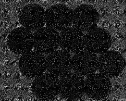
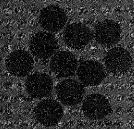


ФОРМОВОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Б.Б.Гуляев, О.А.Корнюшкин, А.В.Кузин  
ФОРМОВОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ

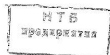


Б Б Гуляев, О А Корнюшкин, А В Кузин

621.744  
584

## ФОРМОВОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ

61/55



Ленинград  
Машиностроение  
Ленинградское отделение  
1987

и-  
с-  
ое  
м-  
д-  
их  
ти  
ат,  
зы-  
рх-  
ло-  
ра-  
ых  
ях  
ном  
лес-  
оды  
ате-  
лад-  
дго  
нус,  
вам,  
ике,  
шоч-  
йст-  
рому  
при-  
шой  
изу-  
ждв  
Об-  
й си-  
при  
атур  
ных  
i на  
бора-  
чных  
данн.в.  
про-

Рецензент С. С. Ткаченко

Гуляев Б. Б. и др.

Г94 Формовочные процессы / Б. Б. Гуляев, О. А. Корнюшкин, А. В. Кузин — Л.: Машиностроение Ленинградского отделения, 1987. — 264 с. — ил.

(В пер.) 1 р. 20 к.

В книге рассмотрены теория и практика процессов, протекающих в формочной смеси на различных стадиях литейного производства: при затвердевании, перемещении, во время заливки и охлаждения металла. Даны классификация смесей и сварочные технологии, анализ конвективных свойств, математических моделей и методов расчета напряженно-деформированного состояния, показаны основные направления и процессы, идущие во время литья металлов — форма, структурообразующие принципы выбора оптимальных режимов формования по критериям качества форм и отливок.

Книга предназначена для инженерно-технических работников литейного производства.

Г 2704020000-241  
Г 038(01) 87 — 241 87

ВБК 34.612  
ИЛ 1

Производственное издание

Ворж Борисович ГУЛЯЕВ, Олег Алексеевич КОРНЮШКИН,  
Анатоль Васильевич КУЗИН  
ФОРМОВОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Редактор Л. М. Пинскер Художественный редактор Н. В. Зяблюк  
Технический редактор Т. М. Жилина. Корректоры: З. С. Романова, Н. В. Старостина. Переплет художника В. Н. Помощникова

ИБ № 4287

Сдано в набор 24.11.86. Подписано в печать 10.04.87. М-23665. Формат 60x90<sup>1/4</sup>. Бу-  
мага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 16 2/3.  
Усл. экз.-шт. 36,5. Уч.-изд. л. 15,25. Тираж 6700 экз. Заказ 195. Цена 1 р. 20 к.

Ленинградское отделение издательства «Трудное Красное Замечание»  
издательства «Машиностроение»  
191060, Ленинград, ул. Дзержинского 10

Ленинградская типография № 6 им. Трудного Красного Замечания  
Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгения Соколовой  
Совхозная типография при Государственном комитете СССР  
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли  
193144, г. Ленинград, ул. Моисеева 10

ПРЕДИСЛОВИЕ

В документах XXVII съезда КПСС указано, что ключевой политической и хозяйственной задачей сейчас является всемерное ускорение научно-технического прогресса. Намечено первоочередное обеспечение коренной реконструкции машиностроительного комплекса составной частью которого является литейное производство. Целью предлагаемой книги является обобщение выделенных в настоящему времени фундаментальных зависимостей в области изготовления литейных форм.

Этот комплекс операций составляет около 60 % трудозатрат, приходящихся на получение отливок. Большое значение оказывает существенное влияние на точность и шероховатость поверхности отливки, что в значительной мере определяет ее металлоемкость и трудозатраты на тяжелые финальные операции. Параметры литейной формы влияют на структуру и свойства литейных сплавов, а также развитие различных дефектов в отливках. Вопросы о теории формовочных процессов как самостоятельном научном направлении впервые были поставлены в 1960 г. на Шестом симпозиуме по теории литейных процессов. За истекшие годы разработка этой проблемы привела к созданию серьезных математического и физико-химического аппаратов, получивших прикладное решение, которое применяется при технологической подготовке производства и проектировании оборудования.

Литейное производство как бог римской мифологии Янус, имеет два «лица»: одно из них обращено к металлургии сплавов, жидкому состоянию, процессам плавки, другое — к механике, литейной форме, процессам уплотнения и упрочнения формовочных смесей, точности отливок, физико-химическим взаимодействиям сплавов и форм. В книге основное внимание уделено второму «лицу».

В качестве главного методологического принципа книги принят системный анализ. Формовочные процессы являются большой системой (содержащей тысячи и более элементов) и характеризуются наличием очень большого числа разнообразных связей между ними, не позволяющим изучение этих связей поэлементно. Общим направлением задач, решаемых в пределах изучаемой системы, является обеспечение заданного качества отливок при минимальных затратах. В книге обобщены материалы литературных источников и результаты исследований авторов, выполненных на кафедре теории и технологии литейных сплавов ЛПИ им. М. И. Калинина совместно с ленинградскими заводами и лабораториями НИИ.

Основными задачами книги являются обобщение накопленных материалов, выделение из них практических рекомендаций, формулировка научных принципов теории формовочных процессов.

## Глава I ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕОРИИ ФОРМОВОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

### 1.1 ЭТАПЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ

Археологические исследования показывают, что первые отливки появились около 6,5 тыс. лет тому назад на территории Анатолии (современная Турция), Месопотамии и Ирана. К 4—5 тысячелетию литейная технология распространилась на Кавказ, северную Африку и Европу. Развитие технологии изготовления литейных форм можно разбить на четыре этапа.

1. Прimitивная технология — от начала возникновения до XIV в. н. э. (примерно 5800 лет). На этом этапе отливки изготавливали преимущественно из медных сплавов и бронзы в начале периода — из меди в конце — частично из драгоценных металлов. Существовало четыре способа литья: 1) формы, полученные вдавливанием эталона (модель) во влажную глину; 2) каменные формы; 3) глиняные формы, полученные по восковым моделям; 4) начиная с VII в. н. э. формы, изготавливаемые по шаблону вращения (котлы). Искло место исключительно индивидуальное производство предметов быта, культа а в конце периода оружие. Письменных документов по технике литья этого времени не сохранилось.

На территории Советского Союза наиболее древние отливки появились в 3—2 тысячелетии до н. э. в районах Северного Кавказа, Средней Азии, Дальнего Востока (Чжурджуни), верховьях Енисея, Причерноморья (скифы), Грузии и Армении. В Древней Руси отливки стали изготавливать в VI—VIII вв. н. э.

2. Ремесленная технология — от XIV в. до середины XIX в. (около 550 лет). Четырнадцатый век стал переломным в истории литейного производства и металлургии. Возникло производство чугуна резко расширились масштабы производства металлических изделий; литье превратилось в самостоятельное ремесло и приобрело серийный характер. Появился ряд способов литья в песчаную глиняные формы, получаемые в опоках по извлекаемым моделям. Первоначально применяли естественные песчано-глиняные смеси, заменяемые позднее синтетическими смесями. Для улучшения их свойств в формовочные смеси вводили вино, мочу, солевые растворы, уксус, суело и др. Получили дальнейшее развитие шаблонная формовка, изготовление форм в почве и в кузках (художественная). Модели делали только из дерева. Основным литейным материалом наряду с бронзой стал чугун. Ручная формовка достигла совершенства.

В конце XVIII в. произошла Великая французская революция для защиты которой потребовалось небывалое количество пушек. Известному математику и общественному деятелю Г. Монж

было поручено разработать новую технологию их «быстрой» формовки, которая основывалась на применении металлических моделей и облицованных песчано-глинястой смесью кокилей. В 1793 г. Монж выпустил книгу «Искусство лить пушки», переведенную на русский язык и изданную в 1804 г. в Петербурге.

К концу этапа начали применять кокильное литье. Во все возрастающих масштабах отливали колокола, пушки, детали. Общее число применяемых способов литья составляло 12. Появились первые печатные описания техники изготовления отливок, которые входят как раздел в новую науку — технологию, которую возглавлял в России академик В. М. Севергин.

3. Промышленная технология — от середины XIX в. до конца XX в. В это время организуется механизированное массовое производство огромного числа отливок из чугуна, стали, промышленных сплавов на любой основе и неметаллических материалов. Создаются новые способы машинного изготовления форм путем прессования, встраивания несометом из формовочных смесей на основе песка и других огнеупорных материалов. Разрабатываются многочисленные специальные способы литья в металлические и оболочковые формы. Происходит химизация литейного производства, ведущая к применению широкого ассортимента синтетических связующих добавок в формовочные смеси.

В 1859 г. в Харькове вышла первая книга по литейному производству, написанная А. Ф. Меркусовым. К концу XIX в. создается самостоятельная, хотя и чисто описательная русская литература по литейному производству. В начале XX в. появляются первые учебники для вузов. В 1905 г. вышла первая книга по литейному производству для рабочих — А. Колесов «Заметки и советы старого формовщика». В книге дана яркая картина работы в литейных цехах дореволюционной России. «Почти на каждом заводе выработан своеобразный местный прием, записанный от формовочных материалов имеющихся под рукой... Каждый формовщик обязан приготовить литейную землю для своих работ сам, руководствуясь в данном случае только своей опытностью. Опытных формовщиков, правда, у нас немало, но, к сожалению, большинство из них малограмотны».

Первая мировая война, гражданская война и последовавшая за ними разруха резко отбрасывают назад все народное хозяйство. После победы Великой Октябрьской социалистической революции в Советском Союзе для литейного производства открылись огромные перспективы. Число известных и применяемых способов литья в настоящее время приближается к 60.

Попытки экспериментальных исследований и научных обобщений в области литейной технологии сделаны только в первой четверти XX в. В связи с этим можно привести слова русского ученого, одним из первых занявшегося формовочными материалами, — К. Неймайера. В 1907 г. он писал: «...до сих пор не только у нас в России, но и в так называемых культурных странах

европейского и азиатского континентов существует почти везде в этой области полный хаос, так как каждая литейная мастерская имеет свой идеальный формовочный песок и свои лучшие в мире смеси формовочной земли, «масты», «глины», «шпакты» и т. д. которые держатся в стражайшем секрете.

Первые экспериментальные исследования процессов уплотнения формовочных смесей были произведены еще в эпоху ручной формовки в 1928 г. П. А. Аксеновым [5]. В 60-х годах началась создание автоматизированных линий формовки в нашей стране и развитие математических моделей уплотнения формовочных смесей. Первые специальные монографии по формовочным материалам были написаны К. Карповым в 1931 г. и П. П. Бергом в 1933 г. по модельному производству — В. М. Андреевым в 1938 г. по специальным видам литья — Н. Н. Рубиновым в 1955 г. Первая научно-исследовательская литейная лаборатория была организована в Ленинграде в 1928 г. П. П. Бергом.

Научный анализ технологии и теории изготовления литейных форм дан в ряде монографий и учебников для вузов [8, 11, 14, 16—18, 31, 35, 68] и др. 1

4 Автоматизация — конец XX в. Он характеризуется созданием автоматических линий формовки применением роботов при выполнении тяжелых операций, автоматизацией технологической подготовки литейного производства на основе ЭВМ. Этап еще только начинается.

## 1.2 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

Литейные цеха выпускают *литые заготовки*, которые нуждаются в механической обработке, но не требуют обработки давлением. Массу металла, затвердевшую в литейной форме и вытесненную из нее, называют *отливкой*. Она отличается от литой заготовки наличием полного комплекта технологических элементов (литниковой системой, прибалками, прорисками и др.), часть которых отделяется в литейном цехе, пригаром от которого должна быть очищена, и тем, что она еще не прошла контроль и может обладать недопустимыми дефектами. Главными признаками формообразования при получении отливки является то, что оно производится путем заливки формы жидким сплавом.

Слово «форма» происходит от греческого (форма) и латинского (*formas*), что первоначально означало «корзина» (место мости) и шлепение (рогожа, переплетение прутьев). В словаре В. И. Даля (1863 г.) литейная форма определяется как «гнездо, в которое отливаются вещи» (в XIX в. вещами называли фасонные отливки). В современном литературном языке главным значением слова «форма» является внешнее очертание, конфигурация предмета. В технической литературе уже давно применяют термин «литейная форма» как сосуд для заливки сплава или инструмент для изготовления отливки.

Основные термины процессов литейного производства установлены ГОСТ 18169—72, содержащим весьма четкие и логичные их определения, хотя он требует существенных дополнений. К сожалению, в литейном производстве исторически сложилось, что слово «форма» имеет два значения. С одной стороны, это целостная система элементов, а с другой — это один из ее элементов. Если строго следовать ГОСТу, то собранную форму как систему следует называть литейной формой. Тогда форму как элемент можно называть просто формой. Последнее положение принято в настоящей книге.

Итак, согласно ГОСТу, литейная форма есть «система элементов, образующих рабочую полость, при заливке которой расплавленным металлом формируется отливка». Элементы, образующие рабочую полость, изготавливают по отдельности, и при сборке они составляют литейную форму. Ниже приведены элементы формы.

1 Основные части формы. Они образуют те поверхности рабочей полости, которые оформляют преимущественно внешние поверхности отливки. Внешние боковые поверхности частей формы образуются опоклой либо стенками кессона. В первом случае с частью формы можно производить сборочные, транспортные или иные манипуляции, во втором случае соответствующая часть формы неподвижна. Если формовку производят в двух опоках, то при заливке их называют *верхней* и *нижней полуформами*. В тех случаях, когда после изготовления части формы опока снимается и при заливке для прочности заменяется кожухом, формовку называют *безопочной*. Поверхность сопряжения двух полуформ называют разъемом (иногда ладом).

2 Литейные стержни образуют те поверхности рабочей полости, которые оформляют преимущественно внутренние поверхности отливки, создавая в них полости и углубления. Сборочные и транспортные операции со стержнями выполняются с помощью зажимов. *Зажимы* представляют собой выступы на стержнях, вставляемые при сборке в соответствующие углубления форм.

3 Холодильники, создающие условия для ускоренного охлаждения отдельных частей отливки.

4 Жеребейки, обеспечивающие правильное положение стержней в формах.

Подвляющее большинство неметаллических материалов, из которых изготавливаются литейные формы, являются дисперсными системами, основу которых образуют зерна огнеупорных соединений, чаще всего кварца. Такие системы называют *формовочными материалами*. Различают *исходные формовочные материалы* и приготовляемые из них *формовочные смеси*, подразделяемые на собственно формовочные смеси и стержневые смеси. В составе формовочных смесей выделяют огнеупорную зерновую основу, связующие добавки, обволакивающие поверхность зерен и обеспечивающие превращение дисперсной смеси в монолит и технологические добавки, обеспечивающие требуемый уровень техно-

логических свойств смеси. Формовочную и стержневую смеси, использованные в технологическом процессе получения отливки и освобождающиеся после ее охлаждения, называют *отработанной смесью*.

Для образования поверхностей литейной формы служит *модельно-опочная оснастка*. Опочка представляет собой ящики без дна и крышки, в которых изготавливается верхняя и нижняя полуформы; опочки оформляют наружные боковые поверхности форм. Они имеют приспособления для транспортировки и сборки полуформ. Модели служат для получения рабочих поверхностей по достой форм, а *стержневые ящики* — для получения стержней. Стержневые ящики имеют вид сосудов, в которых стержневая смесь приобретает заданную конфигурацию и размеры.

*Процесс изготовления литейных форм и стержней (с помощью модельно-опочной оснастки) из формовочных и стержневых смесей называют формовкой.* Формовка означает не только уплотнение формовочной смеси, в нее входит также заполнение рабочей полости формы смесью, удаление оснастки и сборка формы, ее установка и закрепление стержней, установка частей литейной формы друг на друга и скрепление между собой и загрузка. Приготовление формовочных смесей, получение литейных форм уплотнение смесей, взаимодействие форм с отливками при их формировании в совокупности называют *формовочными процессами*.

При изготовлении литейной формы встречается три вида поверхностей модели, формы и отливки. На рис. 1.1 изображены схемы расположения поверхностей модельного комплекта и формы. Форма (рис. 1.1, а) представляет с заформованной половинной модели 3, лежащей на модельной плите 1 в опочке 2. Стержень (рис. 1.1, б) находится в стержневом ящике 7. Рабочая поверхность литейной формы 4 выделена жирной линией; именно по этой поверхности форма после заливки вступит в контакт с отливкой. Поверхности, по которым элементы литейной формы соприкасаются друг с другом, можно назвать технологическими — это поверхности разъемов частей формы б и знаковые поверхности 5.

После сборки литейной формы производится ее заливка жидким расплавом. После затвердевания и охлаждения отливки осу-

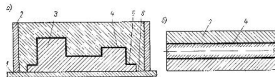


Рис. 1.1. Расположение рабочих и технологических поверхностей в модели и форме (а), стержневом ящике и стержне (б)

ществляются финишные операции, которые состоят из выбивки отливки из формы, очистки обрубки а также из исправления дефектов.

Приято выделять «специальные способы литья». О специальных способах литья А. П. Гапринделю писал еще в начале нашего века, относя к ним литье труб закаленных чугуных изделий (долее жидководородных стрелок, вадков) в металлические формы стальное литье (только начинающее тогда применяться). В разное время различные специалисты относили к специальным способам новые технологические процессы, перспективы, но их получившие еще распространения, литье из новых литейных сплавов, различные виды литья в металлические формы, технологические процессы специфических односторонних отливок, изготавливаемых в больших масштабах (подложки, трубы, поршневые кольца, ювелирные изделия и др.), литье в песчаные формы изготовленные «необычными» методами (по выплавляемым моделям оболочковое литье и др.), виды литья, которые на данном этапе развития технологии обеспечивали повышение точности размеров, качества поверхности, возможности механизации по сравнению с распространенными способами.

Ни в одном литературном источнике не удалось обнаружить определение «обыкновенного» способа литья, которому противопоставляют «специальные».

Стандарт по терминологии содержит понятие «способ литья», но не дает его определения. Технологические процессы, отнесенные к этому понятию различаются по способам заливки, материалам форм, типу оснастки, способам изготовления литейных форм. По видимому, способ литья должен включать совокупность основных материалов и процессов, участвующих в изготовлении литейной формы и получения отливки. Параметры указанных материалов и процессов можно разбить на следующие категории: 1) разновидности основ формовочных материалов и разновидности связующих добавок к дисперсным основным формовочным смесям, 2) типы модельно-опочной оснастки, применяемой для изготовления элементов литейных форм из дисперсных материалов; 3) способы уплотнения дисперсных формовочных смесей и сборка литейных форм; 4) способы заполнения литейных форм жидким расплавом.

Каждый самостоятельный способ литья отличается от других хотя бы по одной из пяти перечисленных позиций, отличие возможно не только по одной, но и по двум-трем по званиям.

Авторы не предлагают отказаться от широко распространенного термина «специальные виды литья», но считают целесообразным внести в применяемую терминологию определенность и ясность.

## Глава 2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ

### 2.1 МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ

Материалы для изготовления форм должны соответствовать общим требованиям: 1) способность выдерживать контакт с жидкими литейными сплавами без расплавления или разрушения; 2) дешевизна, доступность, большие запасы, наличие источников исходных материалов вблизи потребителей; 3) отсутствие токсичности и неприятных запахов как при нормальных температурах при изготовлении форм так и при нагревании связанном с заливкой.

Ниже приведена классификация материалов форм по их природе.

1 Сплошные твердые Типичный представитель — металлический сплав.

2 Дисперсные сплавы Типичный представитель — песок (дробь). Это наиболее распространенный тип формовочных материалов. Их засыпают в опоку, уплотняют тем или иным способом под действием определенных усилий.

3 Дисперсные пластичные Типичный и практически единственный представитель — глина. В настоящее время она как основа формовочной смеси почти не применяется. Этот тип материалов не уплотняется а намазывается на ту или иную подложку.

4 Дисперсные текучие Типичный представитель — жидко стекольная смесь с вспенивающей добавкой. Они обычно не уплотняются, но затвердевают в результате коллоидно химических процессов. В опоку она вводится путем наливания.

Формы из дисперсных материалов — разовые — служат только для одной заливки, а после получения отливки разрушаются. Формы из сплошных материалов — многократные — позволяют получать без разрушения большое число отливок.

5 Неограниченная среда заполнения газом или вакуумом. Форма отсутствует и не требуется. Отливки в этом случае могут получаться либо очень маленьких размеров либо любых размеров в космосе. Фактором формообразования служат силы поверхностного натяжения сплава. Отливки получают сферической формы. Сюда относятся плавки по взвешанному составу аформой для отливки служат электромагнитное поле.

#### *Сплошные твердые материалы*

Ниже приведен перечень материалов для изготовления сплошных твердых форм.

1 Металлические сплавы — чугун — для кокильных отливок из цветных сплавов — чугуна и стали, углеродистая и иногда легированная сталь для отливок из цветных сплавов под давлением или совмещенными процессами, молибденовые сплавы для литья под

давлением стали, медь для оформления водоохлаждаемых внутренних стенок кристаллизаторов при непрерывных выкатах.

Выбор типа материала определяется компромиссом между его стоимостью, сложностью обработки и стойкостью в работе. Последняя очень сильно зависит от температуры плавления сплавов, из которых будут изготавливаться отливки. Все виды металлических форм обладают высокой теплопроводностью, что способствует улучшению структуры и свойств литейных сплавов (исключением является отбел чугунных отливок).

Получение отливок в металлических формах с течением времени расширяется. В Советском Союзе в настоящее время его объем составляет около 20% (кокильные, центробежное, под давлением).

2 Блочный графит. Этот материал легко поддается механической обработке, прочнее. Для повышения прочности можно про изводить его пропитку (кремнем). Применяют при изготовлении форм для отливок из тугоплавких сплавов титана, молибдена. Графит менее теплопроводен, чем металлические материалы.

#### *Дисперсные формовочные материалы*

Зерновые огнеупорные основы дисперсных формовочных смесей кроме вышеперечисленных общих требований должны удовлетворять ряду частных условий огнеупорности — достаточно высокая температура плавления и по возможности слабое взаимодействие с оксидами компонентов сплава, с минимальной склонностью к образованию пригара однородности и сравнительно высокая крупность зерен, теплопроводности, желательнее, чтобы она была повышенной; это ускоряет затвердевание отливки, пластичность или текучесть — способность легко заполнять все детали отливки и давать их хорошей отливкой, хорошая выживаемость после заливки зависящая от сочетания свойств зерновой основы и связующей добавки, отсутствие склонности к комковатости при выдержке в бункерах.

Вдум считать химическую природу исходных материалов первым классификационным признаком дисперсных формовочных смесей. Ниже дана их классификация по этому признаку.

1 Кварцевый песок. Главной составляющей кварцевого песка является минерал — кварц или кремнезем  $SiO_2$ . Достаточно распространенный и дешевый природный продукт. Представляет собой рыхлую, осадочную горную породу. Принято, что границей между песком и глиной служит размер частиц 22 мкм, более крупные частицы считаются песком более мелкие — глиной. При содержании в породе менее 50% глины ее называют песком.

Формовочные пески делятся на природные (необогатенные) и обогащенные. Необогатенные формовочные пески в зависи

МОСТИ от массового содержания глинистой составляющей подразделяют на

	%
Кварцевые К	Не более 2
Тощие Т	От 2 до 10
Подожарные П	10 20
Жирные Ж	20 30
Очень жирные ОЖ	> 30 50

В зависимости от содержания кремнезема и вредных примесей —  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — кварцевые пески делятся на классы

	$\text{SiO}_2$ , %
1К	97
2К	96
3К	94
4К	90

Кроме того, пески разделяются на категории по степени средоточенности массы зерна на трех смежных ситах а также по их средней крупности.

Обогащенные пески содержат глинистую составляющую от 1,0 до 0,2 % и  $\text{SiO}_2$  от 97 до 85,5 % при пониженной концентрации вредных примесей.

Глина Формовку можно производить полностью в огнеупорной глине. Основной глины чаще всего является каолинит, который представляет собой весьма измельченную горную породу, включающую  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . По размерам глинистые частицы разделяют на грубодисперсные от 0,022 до 0,005 мкм мелкодисперсные от 0,005 до 0,001 мкм и коллоидные менее 0,001 мкм. Для изготовления форм используют каолинитовые глины, остальные типы глины — только как связующие добавки.

3 Огнеупорные материалы. Облицовочные смеси для крупных ответственных стальных отливок изготавливают на основе минеральных оксидов, обладающих более высокой огнеупорностью, чем кварц. Это — шамот хромистый железник, циркон, магнезит, хромомagneзит, олинит. Они стоят дороже кварца, но обеспечивают повышенные качества поверхности отливок. Основные характеристики огнеупорных материалов представлены в табл. 2.1.

В смесях для изготовления форм по выплавляемым моделям применяют молотый плавленый кварц с очень мелким размером зерен не изменяющих размеров при нагревании. Он обеспечивает очень высокую чистоту поверхности.

4 Металлические порошки и прочие материалы. За последние годы в основном порядке начинается использование в качестве зерновой основы металлических порошков в виде чулковой или стальной дробин. Ожидавшегося при этом резкого увеличения скорости затвердевания не получено.

Существует способ создания монолитных стенок формы из дисперсных смесей путем наложения магнитного поля. В этом

Таблица 2.1 Характеристика огнеупорных зернистых основ формовочных смесей

Материал	Температура плавления °С	Особенности смеси
Кварц $\text{SiO}_2$	1710	Главная зернистая основа формовочных смесей. Применяется почти для всех видов литей.
Шамот $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$	1670—1750	Обогащенная огнеупорная глина. Применяется в стальном литье и для форм многократного использования.
Олинит ( $\text{MgFe}$ ) $\text{SiO}_4$	1750—1830	Применяется для литья из марганцовых сталей.
Хромистый железник $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$	1450—1850	Не взаимодействует с оксидами железа и не образует шлага. Теплопроводен. Применяется при изготовлении форм для крупных стальных отливок.
Глинозем $\text{Al}_2\text{O}_3$	2050	В чистом виде применяется редко.
Циркон $\text{ZrSiO}_4$	2400	Не дает шлага. Теплопроводен. Применяется для ответственных стальных отливок.
Магнезит $\text{MgO}$	2800	Обладает повышенной теплопроводностью. Применяется для литья из марганцовистых сталей.
Графит С	3750	Слабый огнеупорный материал. Применяется при литье из тугоплавких сплавов. Высокотеплопроводен.
Металлические порошки	1250—1500	Применяются в основном для литей.

случае в качестве зерновой основы используются оксиды железа. Однако этот способ не вышел за пределы опытного опробования.

На рис. 2.1 представлена общая классификация основ материалов для литейных форм.

На втором месте по значимости после зерновой основы стоят связующие добавки. Для проявления своего действия связующая добавка должна первоначально находиться в жидком состоянии, затем образовывать на поверхности зерен основы пленку, далее при уплотнении создать вокруг точек контакта между зернами манжеты и наконец перейти в твердое состояние, превратившись в одну сплошную среду. На рис. 2.2 представлены схематично строения формовочной смеси (а) и манжеты, связывающей смежные зерна (б).

Природа прочности формовочных смесей впервые была вскрыта А. М. Яковом. В 1965 г. он писал: «Процесс связывания разрозненных зерен наполнителя в единую смесь следует рассматривать как процесс склеивания, а связующие материалы можно назвать «клеями». Изучение прочностных свойств формовочных смесей должно основываться прежде всего на исследовании адгезии и когезии связующих материалов. Адгезия есть прилипание двух конденсированных тел на границах раздела фаз. Когезия есть

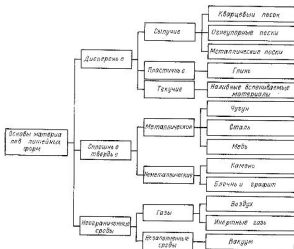


Рис. 2.1 Классификация основ материалов литяных форм

прочность тела вступившего в контакт, т. е. материала жидкой или затвердевшей пленки. Прочность когезии тем выше, чем толще пленка приставшего вещества. Разрушение формовочной смеси может происходить тремя путями: если силы когезии превышают силы адгезии происходит отрыв пленки от зерна, если силы адгезии превышают силы когезии, происходит разрыв пленки связующего; если силы адгезии и когезии соизмеримы разрыв происходит частично по пленке, частично путем отрыва пленки от зерна.

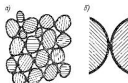


Рис. 2.2. Структура дисперсионной формовочной смеси (а) и мостик между смежными зёрнами (б)

Формовочная смесь должна обладать достаточной прочностью после уплотнения, необходимой для обеспечения операций сборки и транспортировки.

Рассмотрим основные типы связующих добавок в дисперсных формовочных смесях.

1 Добавка вводится в смесь в пластичном состоянии, уплотнению не подвергается. Типичным представителем класса является сырая песчано-глинистая формовочная смесь. Она уплотняется в рабочей пространственной форме. При этом глинистые оболочки деформируются, образуя контактные связи—мостик—между зёрнами. Прочность такого монолита невелика, но достаточна для применения его в качестве элементов формы. Сырые песчано-глинистые формы являются наиболее распространенными в современном литейном производстве. В них изготавливается около 55 % отливок.

2 Добавки, упрочняемые путем удаления растворителя—высушивания. Типичным представителем класса является сухая песчано-глинистая смесь. Глина обеспечивает пластичность формовочной смеси и способность давать хороший отпечаток модели. Особенно хорошими связующими свойствами обладают монтмориллонитовые глины. В формах из сухих песчано-глинистых смесей изготавливается около 15 % отливок.

В тех случаях, когда песчано-глинистые смеси даже в высушенном виде не обеспечивают необходимой прочности, приходится прибегать к более сильным связующим добавкам: декстрина, оксидной клею, барда сульфитного шлека и др.

3 Добавки, проявляющие упрочняющее действие после плавления и затвердевания. Они могут смешиваться с зернистой основной смесью в виде твердых порошков; затем смесь нагревается, добавки расплавляются и оболочкают зёрна песчанки; после охлаждения добавки затвердевают и превращают смесь в монолит. Прочность смесей с такими добавками до нагревания отсутствует.

4 Добавки, вызывающие твердение в результате химических процессов. Компоненты этих добавок вступают в реакцию, приводящую к образованию новых химических соединений, кристаллизующихся с участием воды и устанавливающих механические связи с частями зернистой основы и между собой. Типичными представителями таких связующих являются цементы и гипс.

Жидкостекольные смеси (в особенности для приготовления стержней), относящиеся к этой же категории, получают за последние годы широкое применение. Для обеспечения самотвердения в смесь добавляют феррохромовый шлак, феррохромовый шлак, жидкие отвердители и др. Для вспенивания смеси и придания ей текучести вводится поверхностно-активные вещества. Жидкостекольные смеси твердеют в оснастке, не требуя нагрева, дешево. Их крупными недостатками являются плохая выбиваемость и сложность регенерации.

5 Добавка представляющая собой тот или иной вид масла, которое подвергается окислению в полимеризацию при нагреве. Смесь со связующей добавкой уплотняется в рабочей пространственной оснастке, но не получает при этом весьма низкую в сыром состоянии прочность. Даже при очень небольшом количестве добавки нагрев придает такой смеси высокую прочность. После кон-

такта с жидким сплавом масло выгорает а песок становясь сыпучим легко освобождается от отливки. Вместо растительных масел применяют различные заменители, изготовленные из минеральных продуктов петролатум растворяющий в уайт спиритс и различные комбинированные связующие на его основе.

6 Термореактивные смолы. Первыми представителями такой смолы явился бакелит. Широкую популярность приобрели изготвления на бакелите оболочковые формы.

7 Самотвердеющие связующие добавки на основе синтетических смол упрочняющиеся под действием катализаторов за заданное промежуток времени. Смеси изготавливаются на основе разнообразных синтетических смол: фурановых, фенолоформальдегидных, карбамидных и др. Могут уплотняться в оснастке под действием усилий или заливаться во вспененном состоянии. В последнем случае для повышения плотности подвергаются воздействию вибрации. Твердение таких смесей происходит прямо в оснастке без нагрева.

8 Добавки проявляющие свое действие при обжиге в результате спекания или керамизации. Типичным примером изготовления керамических форм является технология, основанная на использовании этилсиликата. Этот процесс применяется при изготовлении форм по выплавляемым моделям. другой его разновидностью является шоу-процесс. По выплавляемым моделям изготавливают отливки около 0,6 %.

9 Смеси без связующего состоящие только из сыпучей зерновой составляющей. Для превращения таких смесей в монолит требуются непрерывно действующие внешние силы. С этой целью используют пленочно-вакуумную и электромагнитную формовку.

На рис 23 показана классификация способов обеспечения прочности дисперсных формовочных смесей.

Смеси для получения форм, соприкасающихся с отливкой только одной поверхностью находятся в сравнительно более благоприятных условиях. К их газопроницаемости, податливости рабочей прочности предъявляются не самые высокие требования.

Смеси для изготовления стержней, соприкасающихся с отливкой в некоторых сечениях всеми своими поверхностями, находясь в трудных условиях, необходимо получить из компонентов с самыми высокими характеристиками. От них требуется высокая жаростойкость, прочность, податливость и газопроницаемость. Стержни как правило изготавливаются из сухих смесей ХТС и др., подвергаются гораздо более высоким механическим нагрузкам. В отличие от форм стержня не защищены опоками.

При ручной формовке имеется возможность применять различные смеси для оболочкового и наполнительного слоев формы. При машинной формовке как правило применяются единые смеси, имеющие промежуточные характеристики этих смесей. При выборе состава формовочных смесей следует учитывать следующие тенденции:

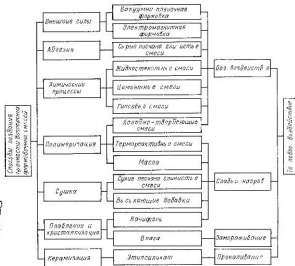


Рис. 23 Классификация способов создания прочности дисперсных формовочных смесей

1) формовочный песок используемый в осежающих добавках для стальных отливок применяется наиболее крупный, для чугунов он может быть мельче и для отливок из цветных сплавов — самый мелкий,

2) наибольшее количество оборотной смеси вводится в смеси для изготовления отливок из цветных сплавов меньше — для чугунов и еще меньше — для стальных,

3) наименьшее количество глины в осежающих добавках вводится в смеси для стальных отливок и наибольшее — для отливок из цветных сплавов

4) влажность несколько повышается в смесях для отливок из цветных сплавов увеличивается для стальных и достигает максимума для чугунов.

В стержневых смесях оборотная смесь как правило, не применяется пески средней крупности или крупнее, содержание глины минимальное. Кроме того при изготовлении стержней при-

меняют связующие добавки, обеспечивающие высокую прочность

Исходная влажность смесей для сухих форм обычно в 1,5—2 раза выше, чем сырых. В формовочных смесях для изготовления крупных отливок уменьшается процент оборотной смеси, содержащей глины, обычно увеличивается; крупность песков тоже увеличивается. Кроме того в формовочные смеси вводятся специальные улучшающие добавки. Добавки, вводимые в формовочную смесь в целях предотвращения окисдрования шлава, должны создавать в порах стенок форм восстановительную среду и предотвращать пригар. В смесях для изготовления чугунных отливок эту задачу решает добавка угольной пыли. В случае изготовления стальных отливок образование пригара предотвращает применение облицовочных смесей из высокоокислительных инертных материалов (Хромомагнезит и др.) Для получения отливок из титана единственным средством предотвращения окисдрования является устранение кислорода из атмосферы формы путем плавки и заливки либо в вакууме, либо в инертном газе. При литье из цветных сплавов пригар фактически не образуется, но происходит окисдрование сплавов с образованием внутренних дефектов в отливках. В случае магниевых сплавов, где такие дефекты интенсивно образуются в смеси вводят 2—4 % борной кислоты или серного цинка. Податливость формовочных смесей выражается в их способности оказывать слабое сопротивление усилию отливок. Для увеличения податливости в формовочные смеси вводят дисперсные добавки органических веществ, которые, выгорая, обеспечивают способность к деформации. Недостаточная газопроницаемость формовочной смеси может способствовать образованию в отливках тех или иных форм газовых пузырей. Ее можно увеличивать за счет регулирования параметров зернистой основы, уменьшения количества отработанной смеси, глины, влаги и др. В качестве добавки возможно введение опилок.

Повышение теплоаккумуляционной способности ускоряет затвердевание отливок и улучшает их свойства. Хромистый железняк, циркон, магнетит обладают большей теплопроводностью, чем кварцевый песок, однако достигаемое при их применении ускорение затвердевания по сравнению с кварцевым песком невелико. Скорость отвердевания уменьшается при добавках опилок и пемзы. Попытки введения в формовочную смесь металлических частиц в виде стружки или дроби оказались неэффективными. Повышенную пластичность дисперсных смесей способствует повышение содержания в них глины (до 20 %) и влаги.

Высокой выбиваемостью отличаются песчано-железные и песчано-слюдяные смеси и смеси, не имеющие связующего. Очень низкой выбиваемостью отличаются песчано-жидкостекольные смеси. За счет введения некоторых добавок ее удается несколько повысить.

## Противопригарные покрытия<sup>1</sup>

Жидкий сплав, соприкасаясь с поверхностью песчаной формы, может проникать в поры между песчинками. В случае если металл сильно перегрет и ничто не препятствует его затеканию в поры формы, глубина проникновения может составлять несколько диаметров зерен. Это механическая фаза пригара. В случае, когда глубина проникновения шлава существенно превосходит радиус зерна, возникает трудноотделимый пригар. Это явление происходит при изготовлении крупных стальных отливок. Иногда глубина проникновения составляет несколько миллиметров и даже сантиметры.

Слав взаимодействует с кислородом атмосферы формы. Если это сплав на железной основе, на его поверхности образуются оксиды железа, в частности FeO. Оксиды железа легко взаимодействуют с кремнеземом кварцевого песка, образуя фаялит  $Fe_2SiO_4$ , являющийся эвтектикой с  $SiO_2$  и FeO, плавящейся при температуре около 1150 °C. Эта легкоплавкая жидкость проникает в толщу формовочной смеси гораздо легче и дальше, чем металлический сплав, продолжая взаимодействовать с кремнеземом. В результате образуется твердый, трудноотделимый слой пригара. Это химическая фаза пригара. Процессы, связанные с развитием химического пригара, полностью заканчиваются только при температуре 800 °C, когда железо перестает окисляться.

Существует несколько путей предотвращения этого дефекта. 1. Создание в порах литейной формы восстановительной атмосферы. Это легко достигается путем введения в формовочную смесь порошка угля. При этом химический пригар не возникает. Угольный порошок может быть заменен добавками мазута. Наряду с введением угля в формовочную смесь применяются и применяются припылы из тонкого угольного порошка, с размерами частиц 0,05—0,10 мм наносимого на поверхность сырой литейной формы. На поверхность сухой формы, где угольный припыл плохо удерживается, может наноситься покрытие в виде эмульсии угольного порошка с глиной в воде. Все эти способы годятся только при изготовлении чугунных отливок.

2. Создание на поверхности литейной формы малогазопроницаемого слоя, предотвращающего проникновение кислорода атмосферы к поверхности формы. В случае стального литья на поверхность форм и стержней наносится покрытие на основе мела того же кварцевого зерна с очень малым размером зерен. Эти мельчайшие частицы закрывают поры между зёрнами основы формовочной смеси и предотвращают пригар.

3. Применение в качестве огнеупорной основы формовочной смеси тугоплавких оксидов не образующих с оксидами железа легкоплавких соединений. В качестве таких материалов исполь-

<sup>1</sup> Известно Т. Б. Гулаев

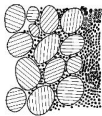


Рис. 2.4 Схем. строение покрытия

зуют шпатот алунит циркон, хромистый железняк. Их можно применять как основу облицовочных смесей или покрытий.

Требования к покрытиям литейных форм защиты от пригара и способность обеспечивать гладкую поверхность отливки седиментационная устойчивость в жидком состоянии до нанесения на поверхность литейной формы; образование равномерного слоя на поверхности литейной формы и хорошее его сцепление с этим материалом прочностью слоя в высушенном состоянии отсутствие трещин и отслаивания.

Разработано много составов покрытий особенно за последнее время [18-33].

На рис. 2.4 схематично представлено строение поверхностного слоя литейной формы с нанесением на нее покрытием. Зерновая огнеупорная основа покрытия должна иметь температуру плавления более высокую чем литейный сплав. Ее материал не должен образовывать с оксидами литейного сплава легкоплавких соединений.

По химической природе зернистые основы покрытий делятся на кислые — чистый кварц, нейтральные или амфотерные — диоксид хрома, корунд шпатот графит уголь, кокс пироуглерод, основные — магнезит хромомгнезит, олинит форстерит тальк. Дисперсионная среда должна легко улетучиваться после нанесения слоя покрытия при сушке и хорошо растворять связующие добавки чаще всего это вода. За последнее время получили распространение неводные жидкости: синтри, углеродороды, кетоны, эфиры. Они гораздо быстрее удаляются при сушке чем вода.

Связующие добавки должны обеспечить связь зерен покрытия с формой после удаления дисперсионной среды обладать термостойкостью при сушке и стойкостью при заливке. Добавки не должны обладать гигроскопичностью и газотворностью. По отношению к дисперсионной среде связующие добавки делятся: на водорастворимые — патака декстрина мочевины формальдегидная смола не растворимые в воде, но образующие тонкие суспензии или гели — жидкое стекло этилсиликат, глины (бентониты) растворимые в неводных средах — поливинилбутираль который поджигается после нанесения краски и «высыхает» практически мгновенно (особенно удобно его применение в механизированном производстве).

Стабилизаторы должны предотвращать коагуляцию суспензии и расслаивание компонентов покрытия при его выдержке в жидком состоянии. Они повышают вязкость системы. В качестве стабилизаторов водных покрытий применяют бентониты маламифт

и др., в неводных покрытиях — резиновый клей уайт спирит, азрогель. В качестве специальных добавок используют поверхностно-активные вещества антистатик, соли.

В последнее время в связи с внедрением химически твердеющих смесей получили широкое распространение неводные самовысыхающие противопригарные покрытия. Большинство неводных противопригарных покрытий обладает невысокой термостойкостью поскольку применяемые органические связующие (ПВБ) разлагаются при нагреве в интервале температур 200—450 °С. В связи с этим наиболее перспективными являются краски с использованием кремнеорганических связующих (например КО 0168 на смоле К 9 гидролизированный этилсиликат) и стабилизаторов (азрогели) материалов. При значительных нагревах эти покрытия сохраняют прочностные свойства, элементы покрытия проникая в глубь формы на 2—4 мм, спекаются образуя вместе с расплюснутым прочным монокристаллическим слоем на границе металл—форма. При заливке этот слой является надежным препятствием для проникновения металла в форму.

Слой покрытия на поверхности литейных форм обычно состоит из 1—1,5 мм. Для получения особо чистых поверхностей покрытие может наноситься в виде пасты слоем толщиной 1,5—4 мм. Содержимое дисперсионной среды в нем составляет 10—20 %.

### Приготовление формовочных смесей

Приготовление формовочных смесей состоит из предварительной подготовки свежих формовочных материалов и собственно смешивания т.е. смешения и регенерации отработанной смеси.

Подготовка свежего песка заключается во первых в его высушивании в сушильных печах для обеспечения требуемого и равномерного распределенного содержания влаги, во вторых в отделе или в раздроблении крупных комков в третьих в просеивании. Глину предварительно сушат при температуре 200—250 °С без тоннажи — при температуре 120 °С. Высушенную глину размельчают сначала на куски размером 15—25 мм, затем разламывают до размеров комков не более 0,1 мм наконец, просеивают. Глину вводят в смесь в виде порошка или суспензии в этом случае глину не сушат. Угольный порошок дробят в просеивают.

Отработанная смесь после выдвки из форм сначала охлаждается просеивается от крупных комков которые разминаются на вальцах затем освобождается на сепараторах от металлических частей. Смесь увлажняется и может применяться для повторного использования. Эти операции в какой-то мере являются регенерацией.

Основной операцией приготовления формовочных смесей является смешение ее составляющих. Задачи перемешивания: обволакивание каждой песчинки пленкой связующего и равномерное

распределение всех связующих в каждом микрообъеме. Наиболее распространены смесители в виде бегунов, работающих периодически непрерывно или в автоматизированном режиме.

Порядок подачи составляющих в смеситель следующий: сначала сухие материалы — песок, глина отработанная смесь которые перемешиваются 1—3 мин; затем смесь увлажняется и еще раз перемешивается, наконец вводится связующие добавки. Общее время перемешивания заполнительных смесей составляет 2—4 мин обдирочной смеси до 10 мин. В процессе перемешивания происходит сокращение количества введенной влаги за счет ее испарения. Для различных смесей перемешивание различается по режимам.

Жидкие самотвердеющие смеси приготавливаются на специальных установках расположенных на формовочных участках. Время их смешения 4—6 мин. Песчано-глиняные смеси изготавливаются в лопастных и винковых смесителях. Время их смешения 3—4 мин.

В настоящее время все шире применяются автоматизированные смесеприготовительные системы непрерывного действия. Готовые смеси транспортируются при помощи ленточных транспортеров или элеваторов в бункеры. В бункерах смеси вылеживаются для выравнивания микроструктуры. Перед изготовлением формы смесь разрыхляется на аэраторах после чего приобретает готовность к изготовлению литейных форм.

## 2.2. ОСНАСТКА

Общие требования, предъявляемые к оснастке

1 Обеспечение получения рабочей полости формы с заданными технологическим чертежом конфигурацией и размерами. Для этого служит модельный комплект элементы которого образуют совокупность опорных поверхностей для формовочной смеси при ее уплотнении.

2 Обеспечение необходимой жесткости и прочности для противодавления нагрузкам возникающим при уплотнении смеси и заливке формы.

3 Поддержание технологических поверхностей, обеспечивающих необходимую точность сборки элементов литейной формы и удобство манипуляций с ними.

### *Средства ограничения формовочной смеси и оформления внешних поверхностей форм*

Для ограничения и оформления внешних поверхностей форм служат определенные виды оснастки.

**Опоки** Форма опок чаще всего прямоугольная реже круглая и еще реже фасонная соответствующая конфигурации модели. Материалом для опок является чугун, сталь, иногда алюминиевые сплавы, очень редко — дерево. Стенки опок изготавливаются из

прочных дутым сварки, сборки на болтах или литая. Они должны иметь приспособления в виде литарей для спаривания с чехободной точностью, приспособления для транспортировки и поворота в виде ручек или паф. В крупных опоках имеются приспособления для удержания формовочной смеси в виде крестовины. Этому же способствуют бурты по контуру. Для выхода газов в стенках опок выполняются щелевидные отверстия.

**Кессоны.** При изготовлении крупных и очень крупных отливок в полу цеха имеются постоянные кессоны. Их стенки и дно облицовывают кирпичной кладкой, слои бетона или металлическими плитами. Для отвода газов от нижней поверхности формы в кессонах предусматриваются специальные каналы.

**Почва.** При изготовлении небольших количеств отливок плоской конфигурации в немеханизованных цехах применяется формовка в почве; в име, вырытой в полу цеха, получается нижняя полуформа.

**Модельные плиты.** Имеются в виду деревянные или металлические плиты, на которых при формовке устанавливаются модели и опоки. Такая плита при машинной формовке жестко закрепляется на рабочем столе.

**Модели и стержневые ящики.** В качестве принципа классификации моделей и стержневых ящиков выбран способ их применения при изготовлении форм.

1 **Вытяжные модели.** После уплотнения формовочной смеси модели этого типа вытягиваются из формы и могут быть использованы повторно. Для того чтобы обеспечить возможность вытягивания, все выступающие части модели должны быть соответствующим образом оформлены. При ручной формовке конфигурация модели может быть и простой, и сложной. При машинной формовке требуются: простота конфигурации и полное отсутствие отливных частей, применение не более одного размера, обтекаемость конфигурации и высокое качество поверхности; преимущественное применение безразъемных моделей, расчлененных с одной полуформе. Этот тип моделей наиболее распространен.

2 **Контурные или шаблонные модели.** Такие модели непосредственно соприкасаются только с частью поверхности рабочей полости и образуют контур формы. В отличие от вытяжной контурная модель не подвергается большим усилиям при уплотнении смеси, а скорее служит средством контроля поверхности формы. Шаблонная формовка возникла при изготовлении форм из глины где уплотнение материала формы не происходит. Шаблонные модели несравненно дешевле, чем вытяжные, но формовка с их помощью требует больших затрат труда и более высокой квалификации формовщиков.

Различают следующие разновидности шаблонов

а) поворотные — шаблон вращается вокруг жестко закрепленной в центре формы вертикальной оси, в других случаях изготовления длинных стержней, являющихся телами вращения, шаблон

неподвижен а стержень, формирующий на горизонтальном трубчатом каркасе вращается

б) протяжные — шаблоном, имеющий две опорные поверхности, движется по направляющим движением может происходить по параллельным или криволинейным направляющим,

в) по контрольным сечениям — форма производится при изготовлении отливок переменного сечения по длине, шаблоны уже не движутся по направляющим а прикладываются к образуемому контуру формы в определенных позициях как средства измерения;

г) по скелетным моделям — модель представляет собой сложную пространственную конструкцию состоящую как бы из сети реек которая не передает всей поверхности полости формы но позволяет контролировать ее контур по отдельным сечениям

3 Уничтожаемые модели Такие модели позволяют изготовлять безразъемные формы с выступающими частями любой сложности однако затрудняют получение сложных внутренних полостей Уничтожение моделей в зависимости от их материала можно производить путем расплавления выжигания и растворения

4 Изготовление литейных форм без применения моделей К этой категории относят те виды металлических форм, в которых отсутствуют полости, оформленные стержнями, например в случае литья под давлением центробежного литья, литья совмещающего с обработкой давлением и др

Литье в металлические формы (кокильное) связано с необходимостью оформлять внутренние полости и выступающие части стержнями которые требуют стержневых ящиков Следовательно к категории безмодельных форм они не могут быть отнесены

На рис 2 5 дана классификация видов модельно-опочной оснастки по способу их применения

Материалы, а следовательно, и технология изготовления модельных комплектов зависят главным образом от числа форм, которые должны быть изготовлены с их помощью т е от серийности производства Чем выше серийность тем большей прочностью и стойкостью должен обладать модельный материал

Ниже приведены материалы для изготовления вытяжных и шаблоновых моделей

**Дерево** В настоящее время область применения деревянных моделей сократилась, хотя в массовом производстве и изготовлении особо крупных изделий деревянные модели в обозримом будущем сохраняются Деревянные модели разделяют по прочностным на три класса, зависящие от масштабов производства и размеров моделей

По первому классу изготавливают модели предназначенные для серийного производства отливок при непрерывной их эксплуатации Заготовки элементов моделей склеиваются не менее чем из трех слоев древесины с различным направлением волокон Не подвижные части моделей соединяются только на клею без гвоз

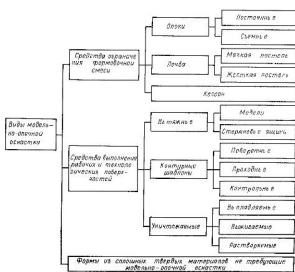


Рис 2 5 Классификация видов модельно-опочной оснастки

дей Части модели, подверженные интенсивному износу армируются металлическими пластинами Модели первого класса допускают от 150 до 300 съемов Второго класса — это модели для серийного и мелкосерийного производства при периодическом их использовании Допускается применение при сборке гвоздей и шурупов Число съемов — несколько десятков но не менее 30 По третьему классу изготавливают модели предусмотренные для единичного производства; они не подлежат длительному хранению Допускается сборка на гвоздях Число съемов от 5 до 10

**Металлы** Металлические модели применяют в крупносерийном и массовом производстве Их стоимость больше чем деревянных но она окупается длительностью службы В настоящее время по металлическим моделям изготавливают около 40 % отливок по номенклатуре и гораздо больше по массе Применяют чаще при машинной формовке Их размеры более точны, поверхности гладче чем у деревянных они не деформируются при хранении В качестве материала для изготовления металлических моделей

используют алюминиевые сплавы марок АЛ3 АЛ24 АЛ25, АЛ26. Небольшие модели делают из чугуна марок СЧ 10 и СЧ 15. Заготовки металлических моделей отливают в песчаные формы по деревянным моделям (прототипам). Заготовки обрабатывают на металлорежущих станках, затем монтируют на модельных плитах вместе с элементами литниковых систем. Съемы с металлических моделей составляют десятки тысяч.

**Пластмассы.** Пластмассовые модели успешно конкурируют с металлическими, их применение дешевле, но неужелюбно возрастет. Для пластмассовых моделей используют эпоксидные и акриловые смолы. Число съемов с пластмассовых моделей составляет при ручной формовке до 2000, при машинной — до 30 000.

**Вязкие материалы.** Такие модели обладают промежуточными характеристиками между деревянными и металлическими моделями. Гипсовые модели просты в изготовлении, дешевы и более долговечны, чем деревянные. При отсыревании гипс не изменяет размеров. Съем с гипсовых форм достигает 1000.

Цементный раствор применяют для изготовления модели с таким же успехом, как гипсовый. Твердение смеси требует не нескольких дней. При больших размерах цементный раствор укрепляют железной арматурой. Число съемов с цементных моделей до 10 000.

В настоящее время выплавляемые модельные составы представляют собой смеси *легкоплавких органических веществ*: парафина, стеарина, церезина, канифоли, бурогоугольного воска и др. Температура их плавления 80—150 °С, температура размягчения не ниже 35—45 °С. Для получения модельей состав запрессовывается в металлическую пресс-форму. Модели, извлеченные из пресс-формы, припаивают к массивным stojкам. Выжигаемые модели изготавливают из гранулированного полистирола ПСВ или других составов. Они обладают высокой прочностью и малой усадкой. Растворимые модели изготавливают из сплавов технической мочевины с добавкой 2 % борной кислоты. Растворение моделей производится в воде. Газифицируемые модели уплотняются путем возгонки при взаимодействии со струей жидкого сплава, заливаемого в форму. Плотность модельного материала 0,02 г/см<sup>3</sup>. Модель вырезается из плит пенопласта при помощи проволоки из никрома, нагретой до температуры 200—300 °С.

## 2.3 ФОРМОВКА

Формовка включает следующие операции: подготовка осанстки и формовочной смеси и доставка последней к рабочему месту; введение формовочной смеси в рабочую полость осанстки; уплотнение формовочной смеси; упрочнение формовочной смеси в осанстке, если оно предусмотрено; освобождение элементов литейной формы от осанстки; упрочнение элементов литейной формы путем

нагрева (или без нагрева) если оно предусмотрено; сборка литейной формы и установка под заливку.

Основными требованиями к литейной форме являются: малая трудоемкость; хорошая транспортабельность и способность к манипуляции литейной формы и ее элементов; точность размеров и конфигурации рабочей полости литейной формы, гарантирующих получение конфигурации и размеров отливки в соответствии с чертежом; прочность и жесткость элементов литейной формы на всех этапах ее изготовления и взаимодействие с заливаемым сплавом; удобство и возможность обеспечения точности сборки элементов формы; гладкость рабочих поверхностей элементов литейной формы, гарантирующие получение требуемого качества поверхности отливки; вентиляция элементов литейной формы, гарантирующая отсутствие газовых дефектов в отливке на стадиях заливки и затвердевания; податливость элементов формы, гарантирующая отсутствие трещин и напряжений в отливке.

### Введение формовочной смеси в рабочую полость осанстки и ее уплотнение

Поскольку значительная часть отработанной формовочной смеси после соответствующей подготовки обычно вновь участвует в формовке, вся совокупность формовочных материалов имеющихся в цехе, находится в непрерывном кругообороте. В зависимости от вида формовочной смеси и способа формовки введение смеси в рабочую полость осанстки выполняется различными методами:

1. Засыпка — в случае применения сыпучих формовочных смесей, при машинной формовке осуществляется из бункера при ручной — лопатой или из бункера.
2. Брошение — смесь поступает в осанстку с ускорением (на несометге); уплотнение смеси происходит одновременно с операцией ее введения в осанстку.
3. Вдувание — при изготовлении стержней. Смесь поступает в резервуар, из которого под действием сжатого воздуха с большой скоростью вдувается в полость осанстки; реализуется в двух вариантах: пескодульный и нескострельный.
4. Намазывание — при формовке в глине.
5. Наливание — смесь переходит в текучее состояние в процессе приготовления и наливается в осанстку как жидкость. На ливневую смесь обычно не уплотняется, если не считать иногда применяемой вибрации.

6. Окунание — при литье по выплавляемым моделям, которые окунаются в бак, заполненный эмульсией. При этом на модель образуется поверхностный слой. Для упрочнения налившегося на модель слоя его немедленно обсыпывают песком. После получения многослойной корки ее тем или иным способом заформовывают.

Уплотнение формовочных смесей приводит к увеличению числа контактов между зернами основы и расширению контактной

площади за счет деформации слоя связующей добавки. Уплотнение формовочных смесей производится нижеприведенными способами.

**Трамбовка.** Данный способ применяют только при ручной формовке. Трамбовка воздействует одновременно на небольшую часть поверхности уплотняемой смеси, место ее воздействия систематически меняется и охватывает всю уплотняемую поверхность. Формовочную смесь засыпают в рабочее пространство оснастки слоями, которые последовательно уплотняются. Уплотнение поочередно не вполне равномерным на микроскопическом уровне и достаточно равномерным на макрокопическом уровне.

В Советском Союзе ручной формовкой в настоящее время изготавливают 24 % отливок (от суммы машинной и ручной формовки). Объем ручной формовки систематически снижается, по в будущем она сохранится в малых немеханизированных цехах и при единичном изготовлении очень крупных отливок. Ручное уплотнение форм — трудоемкая операция и ее всемерное сокращение являясь социальной проблемой.

**Прессование.** Полуформа в опоре с модельной плитой и моделью, наполненная формовочной смесью с некоторым избытком снимается между столом формовочной машины и траверсой. Существует два вида прессования, верхнее — когда траверса опускается погружается в наполнительную рамку опоки неподвижно стоящей на рабочем столе и нижнее — когда опока поднимается на рабочем столе и прижимается к неподвижной траверсе, избыток смеси при этом заполняет проем в неподвижной части стола. Высота наполнительной рамки определяет степень уплотнения. Ход прессования должен соответствовать высоте наполнительной рамки. Суммарное давление при уплотнении прессованием крупных форм достигает значительных величин. Поэтому обычно оно применяется для форм с размерами опок не выше  $800 \times 600 \times 200$  мм. Уплотнение интенсифицируется, если на него накладывается дополнительная вибрация. Прессование осуществляют плоской колодкой или плунжерами, когда различные части формы прессуются одновременно большим числом специальных плунжеров при различных усилиях, и с помощью гибкой диафрагмы.

Вариантом прессования является изготовление мелких стержней постоянного сечения по длине на муштагучных машинах. Стержень продавливается через муштагук поршнем или штекером.

**Встряхивание.** В этом случае полуформа вместе с модельной плитой в моделью устанавливается на рабочем столе формовочной машины, который в свою очередь укреплен на поршне входящем в цилиндр. В нижнюю часть последнего подается сжатый воздух, поднимающий поршень на некоторую высоту, где расположено выпускное отверстие. При достижении отверстия сжатый воздух выходит наружу, а поршень падает ударяясь о преграду. Такой цикл многократно повторяется. В результате падения в формовочной смеси возникают испорционные силы, вызывающие ее

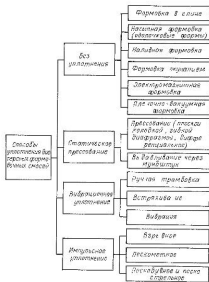


Рис 2.6 Классификация способов уплотнения двусторонних формовочных смесей

уплотнение. По мере увеличения числа ударов степень уплотнения возрастает сначала быстро, затем медленнее, наконец наступает стабилизация. Слишком большое число ударов может вызвать растрескивание формы. Производительность встряхивающих машин ниже, чем прессующих. Их работа сопровождается шумом, ухудшающим условия работы. Они требуют увеличенных фундаментов. Встряхивающие машины не имеют ограничений по размерам опок, их грузоподъемность может составлять десятки тонн.

**Импulsive уплотнение.** На верхнюю часть опоки в засыпанной формовочной смесью плотно устанавливается импульсная головка, представляющая собой коробку с пусковым воздушным клапаном и большим числом отверстий, направленным на поверхность смеси. Пусковой клапан подсоединяется к источнику давления. При его открытии на формовочную смесь воздействует сильный динамический импульс. При этом способе не требуется регулярно движущихся частей, уплотнение производится очень быстро;

в качестве варианта уплотнение может производиться вазы вом.

**Пескобуенное и пескоструйное уплотнение** Данный способ отличается от предыдущего тем что формовочная смесь не засыпается предварительно в оснастку а вдувается в нее. Уплотнение производится как в результате удара вдуваемой массы о стенки оснастки так и под действием последующей фильтрации воздуха через поры смеси. Способ применяется при изготовлении стержней.

**Пескометное уплотнение** Пескомет состоит из транспортных устройств подающих формовочную смесь и головки где она подхватывается вращающимся коншом и выбрасывается отдельными порциями в опоку со скоростью 15—20 м/с. Этой скорости достаточно чтобы достигнуть необходимого уплотнения формовочной смеси в форме. Пакет смеси, выбрасываемый головкой, уплотняется уже в ковше а попадая в форму действует на нижележащие слои подобно трамбовке. Производительность высокая — от 10 до 30 м<sup>3</sup>/ч.

В ряду случаев применяется комбинированное уплотнение со читающее некоторые из перечисленных методов. На рис 2 6 дана классификация способов уплотнения дисперсных формовочных смесей.

### Структура формовочной смеси<sup>1</sup>

Структура — это в общем случае взаимное расположение и характер связей между элементами образующими целостную систему. Элементы формовочной смеси при более внимательном изучении сами оказываются системами состоящими из более мелких частей, образующих иерархию элементов различных уровней. Связи между элементами структуры внутри уровня и между уровнями определяют функционирование формовочной смеси в виде целостной системы.

Элементы структурных уровней формовочной смеси различаются прежде всего своими размерами (табл. 2.2) **Макроруровень** (от 10<sup>0</sup> до 10<sup>3</sup> м) — элементами являются слои стенки формы. Наблюдение структуры уровня можно производить невооруженным глазом. В общем случае стенка формы состоит из следующих четырех слоев: опоки или коужа обеспечивающего прочность и возможность манипулиции с формой; наполнительной смеси, обеспечивающей жесткость формы как целого; облицовочной смеси обеспечивающей сохранение размеров и конфигурацию отливки в условиях высоких температур возникающих при взаимодействии формы с жидким сплавом; покрытия которое должно обладать высокой огнеупорностью обеспечивающего высокое качество поверхности отливки. В случае литья в металлические формы роль покрытия играет облицовка или краска которые кроме обеспече

Таблица 2.2 Иерархия структур литейной формы

Размеры	10 <sup>0</sup> - 10 <sup>3</sup> м	10 <sup>-3</sup> - 10 <sup>-4</sup> м	10 <sup>-4</sup> - 10 <sup>-7</sup> м	10 <sup>-7</sup> - 10 <sup>-9</sup> м	10 <sup>-9</sup> - 10 <sup>-10</sup> м	10 <sup>-10</sup> - 10 <sup>-11</sup> м
Уровень	Макро	Мезо	Субмикро	Микро	Атомный	Элементарный
Средства изучения	Невооруженный глаз	Оптический микроскоп	Электронный микроскоп	Средства разоблачения атома	Рентген	—
Элементы структуры	Слой стенки литейной формы	Зерна осадка порошковой смеси	Частицы сыпучих порошков	Блоки, шпатель, кулач	Блоки, шпатель, кулач	Элементарные частицы
Структурные составные элементы	Стенка формы		Формовочная смесь		Структура зерна	
	Насыщенная смесь	Облицовочная смесь	Покрытие	Полупроводник	Блоки, атомно-кристаллические решетки дисков или пластины	
					Коллоидная дисперсия порошка	
	Жидко-стекловидная смесь	Слово-литиевое	Облицовочная форма	Облицовочная форма	Слово	
Остаток смеси песок					Макромолекулярные полимеры	Неорганические молекулы

<sup>1</sup> Извлечено Т. В. Гуляевым.

ния качества поверхности отливки предохраняют форму от слишком быстрого разрушения. В частных случаях слоев может быть не четыре, а меньше при единственном слое форма превращается в оболочку.

Элементами микропоры (от  $10^{-2}$  до  $10^{-3}$  м) являются зерна огнеупорной основы смеси. Микроструктуру изучают под оптическим микроскопом. Для упрощения микроструктуры смеси можно заменить ее моделью, состоящей из жестких сфер одинакового размера скрепленных между собой точечными контактами через пленку связующей добавки. Расстояние между центрами любой пары соприкасающихся сфер равно их удвоенному радиусу. В неулоточном состоянии сферы образуют рыхлую систему, в которой пористость составляет 70 % (и более), в этом случае общая плотность при плотности кварцевых зерен  $2,6 \text{ г/см}^3$  будет около  $1 \text{ г/см}^3$ . Соединяя сферы могут создавать многочисленные каркасы (рис. 2.7, а). При элементарном уплотнении сферы образуют кубическую систему. Ромбодр построенный в плоскости пересекающей центры соприкасающихся сфер в этом случае является квадратом с углом  $90^\circ$  (рис. 2.7 б). При гексагональной упаковке ромбодр имеет острые углы  $60^\circ$  (рис. 2.7, в). Пористость уплотненной системы  $m$  зависит от угла ромбоэдра  $\theta$  следующим образом:

$$m = 1 - \frac{\pi}{6(1 - \cos \theta) \sqrt{1 + 2 \cos \theta}} \quad (2.1)$$

Расчеты показывают, что при кубической упаковке пористость составляет 0,476, а плотность смеси  $1,3 \text{ г/см}^3$  при гексагональной упаковке соответственно 0,259 и  $1,85 \text{ г/см}^3$ . Приведенные цифры соответствуют плотности реальных формовочных смесей.

Модели представленные на рис. 2.7 наглядно демонстрируют схемы структуры при различных степенях уплотнения. Однако ими нельзя пользоваться для перехода от одной степени уплотнения к другой. Этот вопрос рассмотрен ниже.

Увеличение степени уплотнения смеси повышает число контактов между зёрнами на единицу сечения, а следовательно прочность

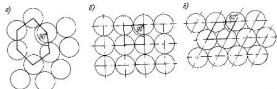


Рис. 2.7. Микроструктура идеальной формовочной смеси при различных степенях уплотнения: а — рыхлая смесь; б — кубическая упаковка; в — гексагональная упаковка

смеси и уменьшает сечение каналов между зёрнами и как следствие — газопроницаемость смеси. Площадь просвета между зёрнами  $l$  зависит от угла ромбоэдра  $\theta$

$$l = 1 - \frac{\pi}{4 \sin \theta} \quad (2.2)$$

Газопроницаемость  $k$  связана с другими характеристиками смеси следующим соотношением:

$$k = d^2 \frac{\eta^2}{96(1 - m)\eta} \quad (2.3)$$

где  $d$  — диаметр зерна,  $\eta$  — динамическая вязкость газа. Из выражения (2.3) следует, что газопроницаемость смеси при прочих равных условиях пропорциональна квадрату диаметра зерна, т. е. резко падает при их измельчении.

Реальная формовочная смесь отличается от вышеприведенной модели следующим зёрна основы не являются строго сферическими; не имеют строго одинаковых размеров; контакты между зёрнами не точечные, а образуют некоторые площадки; в пределах одного микрообъёма различные ячейки имеют несколько разные размеры и углы ромбоэдра. Упаковка реальных формовочных смесей в ячейках носит статистический характер. В разрыхленных смесях имеется много ячеек, в которых не все соседние частицы соприкасаются между собой. Это значит, что ромбодр превращается в многоугольник и среднее значение его угла в этом случае больше  $90^\circ$ . Если размеры зёрен смеси сильно различаются между собой, то плотность вязкости оказывается больше, чем в системе из одинаковых зёрен, а газопроницаемость меньше.

Субмикроромбы (от  $10^{-5}$  до  $10^{-7}$  м), элементами которого являются частицы глины, связующих добавок и молекулярные кристаллы, т. е. детали пленок связующих добавок. Изучение структуры возможно только под электронным микроскопом. Элементы субмикроромбы определяют прочность связи между зёрнами основы смеси, в особенности для глины и других высыхающих за твердеющих и химически твердеющих добавок.

К этому уровню относятся размеры частиц идицидного кварца, составляющие зерновую основу огнеупорного покрытия и мала того угла. В свою очередь их связующие добавки должны иметь еще более тонкую структуру. До сих пор этот структурный уровень формовочных смесей остается слабо изученным. Хотя силы, действующие между его частицами играют весьма важную роль в обеспечении прочности и жаростойкости смесей.

Элементами мезоромбы (от  $10^{-7}$  до  $10^{-6}$  м) в формовочных смесях являются коллоидные частицы кремнекислоты, действие которых проявляется в керамизируемых смесях; ультрадисперсные порошки; молекулы высокомолекулярных соединений, из которых состоят все виды смол. В зёрнах основы смеси к этому уровню от-

носятся атомно-кристаллические решетки образуются двуокисью кремния или иными химическими соединениями их блоки, дислокации и другие дефекты решеток. Их значения проявляются в процессе разрушения зерен ведущих к появлению пыли и сокращению долговечности смесей. Средства исследования на этом уровне весьма сложны они еще только разрабатываются и к изучению характеристик формовочных смесей пока не применены.

Сами атомы, молекулы неорганических соединений, электронные орбиты атомов являются элементами атомного уровня (от  $10^{-8}$  м и меньше). Средства изучения — рентгеновский анализ. Эти элементы в конечном счете образуют все частицы вышедших уровней. Однако проследить пути, связывающие макроскопические свойства тел с характеристиками образующих их атомов удается только в немногих элементарных случаях.

Ввиду огромной разницы в размерах и строении элементов различных уровней рассмотренной иерархии средства воздействия на их характеристики редко выходят за пределы смежных уровней. Следовательно для получения максимальных эффектов целесообразно воздействовать одновременно на несколько уровней и для каждого из уровней предусматривать свои средства.

Следует заметить что в качестве связующих добавок применяются вещества состоящие из более мелких элементов: глина — бентонит — крахмал и сахар — коллоидная кремнекислота — высокомолекулярные соединения (смолы).

### **Заключительные операции формовки и работа литейной формы**

Заключительными операциями формовки являются извлечение модели из формы и стержня из стержневого ящика; упрочнение формовочной смеси; сборка литейной формы.

Извлеченные модели из пластичной смеси является трудной операцией при ручной формовке и может приводить к ее частичному разрушению; поэтому именно с этой операцией следовало начать механизацию формовки. При машинной формовке извлечение модели происходит с помощью перекидного или поворотного стола штифтового подъема протяжных плит. Извлечению модели из формы препятствуют ее выступающие части. В связи с этим при разработке технологии ручной формовки изобретено большое число средств и способов для преодоления этого недостатка. К ним относятся:

1) изготовление отъемных частей у моделей — основная часть модели извлекается через разъем, а выступающая отъемная часть — через полость образовавшуюся после извлечения основной;

2) размещение выступающих частей в плоскости разреза на литейном

3) применение подрезки — в полуформах изготавливается с одной стороны углубление с другой стороны — выступ, пересекающий поверхность разреза и называемый болваном;

4) применение перекидных болванов, которые входят в углубление, имеющиеся в обеих полуформах; перекидные болваны не связаны с полуформами и составляют самостоятельные элементы, которые остаются лежать при переворачивании полуформ на той из них которая размещается внизу.

Однако все эти средства неэффективны при машинной формовке. Остается два выхода: либо введение напусков, позволяющих устранить выступающую часть, либо оформление ее стержнем. Первый способ введения реализуется редко, второй является основным при разработке технологии машинной формовки.

Упрочнение формовочной смеси если оно происходит при нагреве в печи, производится после освобождения элементов литейной формы от модели. Если упрочнение смеси происходит в остатках для его реализации отводится необходимое время.

Операции сборки формы начинаются с горизонтальной установки нижней полуформы. Затем в нее проставляют стержни. Правильность их установки проверяют при помощи специальных шаблонов и кондукторов. Если шапки не обеспечивают правильности положения и устойчивости стержней между их поверхностями и поверхностями формы устанавливают жеревейки. На нижнюю опоку (или часть литейной формы, выполненную в почве) устанавливают верхнюю опоку а на нее — литейную чашу. Правильность установки верхней опоки обеспечивается литейным аппаратом опок. Сборка завершается загрузкой формы, испытанием ее вальцование ее верхних элементов при заливке жидким сплавом.

Ниже приведены специальные методы сборки форм широко применяемые при машинной формовке.

**Формовка в стержнях.** В случае производства очень сложных отливок имеющих большое число внутренних полостей форма в узком смысле этого слова не изготавливается. Все элементы литейной формы являются стержнями. Они собираются в тщательно обработанных металлических жакетах гад и заливаются. Разновидностью формовки в стержнях является формовка в кусках приносимая при художественном литье.

**Безопочная формовка.** Формы изготавливаются в специальных опоках, которые снимаются с заформованных элементов после уплотнения. Перед заливкой на форму надевают жакеты для предотвращения ее разрушения. Для обеспечения точности сборки на полуформах выполняется замок в виде уступа высотой 10 мм с уклоном  $45^\circ$ . Способ позволяет резко сократить число опок и облегчить процесс формовки. Применяется для изготовления мелких отливок.

**Стопочная формовка.** Формовку производят в опоках, но каждый элемент формы оформляется двусторонним прессованием. При установке таких элементов друг на друга образуется литей

ная форма с несколькими одинаковыми этажами при одной литниковой системе. Стопчатая формовка обеспечивает экономию места затрат формовочных материалов и сокращение объема операций. Так же как предыдущий способ применяется для изготовления мелких отливок.

Заливка форм представляет собой процесс заполнения литейной формы жидким сплавом. Рассмотрение способов заливки выходит за пределы данной книги. Однако в связи с рассмотрением понятия способа литья ниже приведено их краткое описание.

1 Свободная — заполнение жидким сплавом неподвижной формы без каких-либо воздействий на расплав в разливочном устройстве струе или при затвердевании.

2 Непрерывная — свободная заливка в неподвижную форму в условиях непрерывного вытягивания из нее затвердевающей части отливки при непрерывном допослевании жидкого сплава из разливочного устройства.

3 Намораживание — через нормированное время после заливки сплава в форму, когда затвердеет определенная часть отливки жидкая часть сливается; образуется отливка с полостью.

4 Центробежная — свободная заливка во вращающуюся форму. Сплав соприкасаясь с формой, выталкивается во вращательное движение. В процессе затвердевания на отливку действует центробежная сила.

5 Совмещающая — в процессе формирования отливки под нижняя часть формы деформирует ее твердую часть и выжимает жидкую.

6 Под давлением — сплав из разливочного устройства поступает в форму под поршневым или пневматическим давлением.

7 Навалка (литье, совмещающее со сваркой) — источником жидкого сплава служит электрод, кончик которого погружен в слой жерсткого шлака, находящийся на поверхности формирующейся отливки. В системе протекает электрический ток вызывающий дуговой разряд между шлаком и плавящимся электродом.

8 Распылением — струя сплава вытекающая из разливочного устройства разбрызгивается на малые объемы, которые под действием поверхностной натяжения приобретают сферическую форму.

На рис. 2.8 представлена классификация способов заливки литейных форм.

В литейной форме сосредоточены: энергия, материалы, трудовая деятельность рабочих, интеллектуальная деятельность технологов — все это можно характеризовать как некоторую обобщенную силу. Процесс превращения сплава в отливку, совершающийся в форме, можно рассматривать как некоторый обобщенный технологический путь. Произведение силы на путь есть работа. Отсюда понятие «работа литейной формы».

Взаимодействие формы с залитым в нее сплавом делится на этапы [29].

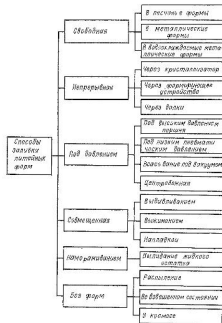


Рис. 2.8. Классификация способов заливки литейных форм.

Первый этап — Взаимодействие поверхности стенок литейной формы с жидким сплавом. Продолжительность этапа на данном участке поверхности формы от доли секунды до 2—3 с. На данном этапе возможно разрывание и частичное разрушение элементов литейной формы металлическим потоком. Может происходить проникновение металлического расплава в поры формы с образованием механического пригара. Из поверхностного слоя формы могут выделяться газы, которые в виде пузырьков будут всплывать в верхнюю часть отливки.

Второй этап — Взаимодействие поверхностного слоя формы с горячей затвердевающей силой в начальной стадии затвердевания. Продолжительность этапа от нескольких до десятков секунд.

В твердой корке на этом этапе могут существовать участки жидкости, в которых развивается обратная дивкация. Отливка отдает основное количество теплоты перегрева. Тепловой поток начинает распространяться в глубину стенок литейной формы. Начинается взаимодействие атмосферы формы с металлом: отливки образуются оксиды металлов, которые вступают в химические реакции с материалами формы, поводится химический пригар. На поверхности раздела литейной формы и отливки повышается давление газов, обычно приводящее к микрокажанию металлической поверхности, а также к образованию поверхностных газовых пузырей в отливке.

Третий этап. Взаимодействие литейной формы с затвердевающей отливкой. Продолжительность этапа от нескольких минут до десятков часов в зависимости от толщины стенки отливки. Затвердевание последовательно продвигается в глубину отливки, тепловой поток последовательно прогревает стенки литейной формы. Формирование химической фазы пригара в форме и измененного при твердости (обезуглероженого) слоя в отливке завершается. Происходит интенсивное механическое взаимодействие отливки и литейной формы. Размеры отливки уменьшаются, размеры формы могут увеличиваться. Усадке выступающих частей отливки препятствуют помещающиеся между ними объемы литейной формы, что может приводить к трещинам. Газовые процессы перестают играть существенную роль. Под действием теплоты отливки в формочных материалах происходит процесс ведущий к их упрочнению или наоборот разупрочнению что определяет их выживаемость.

Четвертый этап. Взаимодействие литейной формы с затвердевшей охлаждающейся отливкой. Продолжительность этапа от часов до нескольких суток. Отливка и литейная форма охлаждаются как единое целое. Процесс завершается, когда отливка приобретает температуру приемлемую для ее выливки.

На протяжении всех четырех этапов взаимодействия литейная форма выполняет работу, которую можно охарактеризовать следующими положениями: придавать отливке конфигурацию и размеры, заданные чертежом, в пределах указанных допусков; получение поверхности отливки требуемого технического условия; качества; обеспечение структуры и свойства сплава отливки в пределах охлаждающей способности материала формы; предотвращение внутренних дефектов в отливке в пределах возможного влияния на их развитие литейной формы. Реализация этих положений обеспечивает успешную работу литейной формы.

### Способы литья

Способ литья определяется точкой в системе из пяти технологических координат с дискретными шкалами характеризующими: 1) основу материала формы; 2) природу связующей до-

бавки; 3) тип оснастки; 4) способ уплотнения (позиции 2, 3 и 4 относятся к формам изготовляемым из дисперсных материалов); 5) способ заливки. Рассмотрим несколько вариантов способов литья.

Первый вариант — литье в несанов глинистые сырые формы. 1) основа материала формы — кварцевый песок, 2) связующая добавка — влажная глина; 3) оснастка — выталкиние или шаблонные модели и опоки, 4) способ изготовления формы — любой вид уплотнения; 5) способ заливки — свободная.

Второй вариант — литье под давлением. 1) основа материала формы — металлический сплав, обрабатываемый механически, позиция 2, 3, 4 — не реализуются; 5) способ заливки — заливка формы под давлением поршня на специальной машине.

Третий вариант — пленочно-вакуумная формовка. 1) основа материала формы — кварцевый песок; 2) связующая добавка — не требуется; 3) оснастка — выталкиние модели и опоки, 4) способ изготовления формы — прессование пленкой под действием атмосферного давления при вакуумировании формы; 5) заливка — свободная.

В настоящее время зафиксировано 54 принципиально различных способа литья, получивших хотя бы небольшое промышленное применение. Многие способы литья осуществляются в нескольких вариантах, не изменяющих их положения в пяти технологических координатах. В числе этих 54 способов литья формы из дисперсных материалов составляет 64%; из сплавных материалов — 30% и не требуют форм 6%. Формы, изготовленные по выталкинии и контурным моделям, применяются в 63% всех способов литья, уничтожаемые формы — в 6% и без изделий изготовляются 31% (глиняным образом металлические). Путем уплотнения изготавливается 59% форм 6% — без уплотнения, 6% не требуют форм и 29% форм получают путем литья из расплавленного состояния или механической обработки. Свободная заливка применяется в 75% всех способов литья; под давлением — в 9% непрерывная — в 6% с деформацией в форме — в 6%; путем наливки и без заливки — в 4%.

Число способов литья с течением времени растет (рис. 2.9). В логарифмическом масштабе этот рост описывается линейной зависимостью следовательно в обычном масштабе он будет описываться экспонентой аналогично другим информационным показателям развития науки и техники. Кривые такого рода обычно

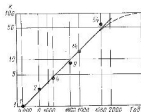


Рис. 2.9. Зависимость числа  $k$  от времени  $t$  в весь период существования литейного производства.

строят, начиная с первой половины XVIII в. т. е. начала развития науки в ее современном понимании. Техника возникла раньше науки. Развитие способов литья удалось проследить за 6000 лет. Несмотря на огромный промежуток времени экспоненциальная зависимость сохраняется на всем его протяжении. Число новых способов литья до недавнего времени росло во все возрастающем темпе: но за последние 15—20 лет интерес к созданию новых способов литья снизился. Традиционно новые решения стали не являться реже, чем в середине XX в. хотя и продолжают и будут выявляться. Трудно представить, чтобы число способов литья в начале XXI в. существенно превысило 100 и продолжало неограниченно расти дальше. Можно ожидать, что в будущем оно начнет изменяться по кривой, указанной на рис. 2.9 штриховой линией. С течением времени способы литья оказавшиеся экономически нецелесообразными, применяться не будут.

#### 2.4 РЕГЕНЕРАЦИЯ СМЕСЕЙ

В настоящее время литейное производство СССР ежегодно по потребляет свыше 20 млн т свежего формовочного песка, расход которого на 1 т годных отливок характеризуется следующими данными:

Год	1940	1960	1974	1977	1984
кг на 1 т. . .	490	809	864	886	810

В 1975 году этот показатель в США и Японии составил 667 [87] и 500 кг на 1 т [90] соответственно. Удельный расход свежего песка для различных отраслей промышленности различен и колеблется от 700 кг в сельско-хозяйственном машиностроении до 1560 кг в станкостроении на 1 т годных отливок [48]. На некоторых заводах этот показатель составляет 1600—1800 кг на 1 т.

Рост удельного расхода свежих формовочных песков объясняется следующими основными причинами: относительным уменьшением производства отливок в песчано-глинистых формах; увеличением производства отливок CO<sub>2</sub>-процессом, с помощью выписки жидких самовтердеющих смесей и смесей с синтетическими смолами (при применении ХТС расход свежих материалов составляет 3000 кг на 1 т [91] в некоторых производствах особенно при использовании ЖСС — 6000 кг на 1 т [72]); отсутствием качественного стимулирования работников занимающихся регенерацией песка вследствие низкой его стоимости завышенными нормами расхода песка и др.

Коренной поворот в сторону всемирной регенерации отработанной смеси является главным направлением сокращения расхода свежего формовочного песка. Благодаря регенерации удельный расход свежего песка можно сократить в несколько раз. Регенерация необходима также для решения проблемы утилизации от-

работанной смеси в связи с охраной окружающей среды. При необходимости регенерации перед специалистами возникает ряд вопросов: какой метод регенерации применить с помощью какого оборудования выполнять эту операцию в каком технологическом процессе использовать регенерат какого экономического эффекта тивности регенерации и др. Решать эти вопросы бывает не просто.

В настоящее время применяются самые разнообразные по составу смеси (универсальных смесей не существует) поэтому сегодня нет и универсального способа регенерации. Следует различать регенерацию смеси и регенерацию песка.

Регенерация смеси есть технологический процесс подготовки отработанной смеси в целях повторного ее использования. Этот процесс находит самое широкое применение на практике, и здесь мы касаться его не будем. Регенерацией песка можно назвать технологический процесс извлечения зерновой основы песка из отработанной смеси на котором мы остановимся.

Основные способы регенерации песка приведены на рис. 2.10. Представляется, что распространение деление методов регенерации на сухие мокрые и термические является не совсем правильным. Во первых, в последние годы появились другие методы регенерации не укладывающиеся в такое деление и во вторых, термическая регенерация по своей сути тоже является сухой. Более правильно регенерацию подразделять на механическую, термическую гидравлическую естественную и комбинированную. Кратко рассмотрим сущность перечисленных методов регенерации.

Укрупненно весь технологический цикл регенерации независимо от методов, можно разделить на три этапа: 1) подготовка отработанной смеси; 2) отделение пленки связующего от поверхности зерен песка; 3) удаление пылевидных фракций из зерновой основы песка т с сепарацией.

Основное в подготовке — дробление отработанной смеси и удаление металла (каркасы, крючки, всплески и т. п.). Во всех методах регенерации исключая гидравлический, этот этап практически одинаков. Смесь начинает дробиться при выбивке отливок из форм, затем проходит дробильные установки и просеивается. Получено из смеси 1—2 раза удаляется металл. Необходимо отметить, что уже на данном этапе в определенной степени начинается процесс отщипки пылинки связующего от поверхности зерен песка. Степень отщипки зависит от вида смеси. В качестве оборудования здесь применяются выбивные решетки, обычные бегуны с перфорированным дном, шековые и вальцовые дробилки и другие подобные установки. Удаление металла из отработанной смеси осуществляется главным образом магнитными сепараторами. Процесс производится с помощью грохотов и сит различной конструкции. В процессе гидрорегенерации как известно дробление смеси осуществляется струей воды. Перезагруженные куски и в этом случае дробятся одним из перечисленных выше способов.

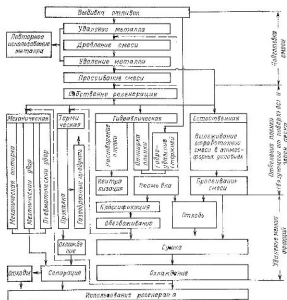


Рис 2 10 Классификация процессов регенерации

Второй этап является главным, от которого исходит название методов регенерации. При механической регенерации отделение пленки связующего осуществляется механическим разрушением этой пленки тем или иным методом. В процессе разрушения связующее превращается в пыль. Механический метод регенерации возможен тогда, когда силы адгезии меньше сил когезии связующего материала, пленка которого должна быть достаточно крупной. Если пленка является эластичной, механическая регенерация оказывается малоэффективной.

Отделение пленки связующего при механической регенерации осуществляется механическим перетиранием механическим ударом и пневмоударом. Механическое перетирание происходит в установках валкового типа в обычных бегунах с катками, облицованными резиной шаровых мельниц и подобных установ-

ках (рис. 2 11), в которых отделение пленки производится за счет трения частиц смеси между собой и о рабочие органы установок. Механическое отделение пленок механическим ударом и пневмоударом состоит в их разрушении за счет возникновения напряжений, достигающих сил адгезии при внезапном столкновении с преградой летящих с большой скоростью частицы смеси. При разгоне частиц смеси механическим путем регенерация носит название механического удара (рис. 2 12) при разгоне потоком воздуха — пневмоудара. В ряде установок отделение пленок совмещается с сепарацией.

В мировой практике наиболее широкое распространение получили пневмоударные установки. Суть процесса состоит в следующем: струя воздуха с большой скоростью достигает 45 м/с, инжектирует отработанный песок в вертикальную трубу (рис. 2 13). При вылете из последней зерна песка ударяются об отражатель. Соударение песчинок между собой имеет место также во время их полета по трубе. При соударении в трубе и ударе об отражатель пленка связующего отделяется от поверхности зерна. Песок, падая от отражателя вниз, частично удаляется, другая его часть может повторно попадать на оттирку. Воздух относит все мелкие фракции к фильтрам. Установка может состоять из одной секции или из нескольких соединенных между собой последовательно. Пневматическая обработка является наиболее интенсивным методом удаления пленки связующего с поверхности зерен песка.

Представляет также интерес регенерация в потоке дробы, являющаяся комбинацией механического отделения пленки связующего с выбивкой стержней и очисткой поверхности отливкой дробью. Дробь, летящая с большой скоростью выбивает стержни, очищает поверхность отливки и отделяет пленку связующего от поверхности зерна песка. Затем магнитной и воздушной сепарацией идет разделение дробы, регенерата и молочных фракций.

Сущность термической регенерации состоит в нагреве отработанный смеси до 650—1000 °С выдержке при этой температуре в окислительной атмосфере и охлаждении песка. Иногда для фурановых смесей применяют регенерацию при температуре

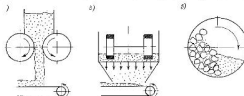


Рис. 2 11. Установки для механического перетирания зерен песка: а — валкового типа; б — бегуны; в — шаровая мельница

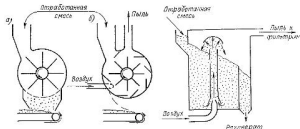


Рис 212 Установки для обработки пьезок связующего механическим ударом  
а — без пылеотсоса; б — с удалением пыли

Рис 213 Установки механического регенерирования песка пневмодуром

250—400 °С. В процессе нагрева при 250—400 °С удаляются все летучие составляющие, при 800 °С и выше выгорают углерод содержащие составляющие. Коксовый остаток и другие мелкие фракции удаляются последующей сепарацией. В определенной степени при термической регенерации в отделении пленок связующего играет роль разница в коэффициентах термического расширения пленок и зерен песка.

Для термической регенерации используются печи различных конструкций: барабанные шахтные, кипящего слоя. В последнем случае отделенные пленки совмещаются с сепарацией. При регенерации смесей с органическими связующими часть топлива ком пенируется за счет теплоты сгорания смесей. По данным [91], смеси обладают следующей теплотой сгорания:

Оболочочные формы и стержни	кДж/кг
Фурановая смесь с $H_2PO_4$	690
» » » $\alpha$ -ТСК	170
» » » $\beta$ -ТСК	210—290
Фенольная смесь с $\alpha$ -ТСК	290—380

При гидрогенерации отработанная смесь после предварительной подготовки поступает на отмывку пленки связующего. Отмывку несбалансированной пильцы осуществляют различными способами в проточной воде. Гидроциклонах отгирочных машинах где несбалансированная смесь интенсивно перемешивается. После сепарации (классификации) идет обезвоживание песка и его сушка. Применяемая в технологическом цикле вода осветляется для повторного использования (массовый расход воды составляет примерно 10 т на 1 т регенерируемой смеси). Обезвоживание производят выдержкой влажного песка в специальных резервуарах центрифугированием где влажность понижается до

6—10 % вакуумированием. Полностью влага удаляется из песка сушкой во вращающихся барабанах или установках кипящего слоя в которых эффективность сушки значительно выше.

Следует констатировать что химическая гидрогенерация с использованием кислот или щелочей для растворения пленки связующего с последующей нейтрализацией песка по существу не вышла из экспериментальной стадии. Исследования ведутся над смесями с синтетическими связующими. По видимому этот метод регенерации может быть использован только в исключительных случаях для восстановления дорогостоящего огнеупорного песка.

Естественная регенерация — процесс восстановления песка в естественных условиях. В этом процессе отработанная смесь после извлечения из нее металла складывается на открытой территории и вылеживается в атмосферных условиях несколько лет. Продолжительность вылеживания зависит от вида связующего материала. Регенерация осуществляется благодаря колебаниям температуры (зима — лето) биологическим процессам и осадкам. Изменения температуры приводят к отделению пленки связующего вследствие разницы в коэффициентах термического расширения. Кроме того многие органические связующие разлагаются биологически. Осадки вымывают еще мелкие фракции и продукты биологического распада. Естественную регенерацию сравнительно просто осуществлять в условиях заводов, расположенных в не больших городах где легче найти свободные территории на небольших расстояниях от заводов. Это практикуется и в СССР и за рубежом [93]. При этом, если по технологическим соображениям естественный регенерат нельзя использовать в литейном производстве, он пойдет как коллоидный заменитель свежего песка в некоторых видах строительства например в дорожном.

Необходимо подчеркнуть что процесс естественной регенерации практически не изучен, его возможности до конца не выяснены. Вместе с тем представляется определенной перспективностью данного метода так как в определенных условиях он может быть наиболее экономичным.

При применении естественной регенерации следует иметь в виду, что фурановый гетероцикл биологически не разлагается поэтому смеси с фурановыми смолами могут заражать почвенные воды. В этом отношении, по свидетельству некоторых исследователей [101], фенол является менее опасным так как он подвержен биологическим процессам. Однако другие исследования подвергают сомнению этот вывод.

К комбинированным методам регенерации могут быть отнесены гидротермический, термомеханический, гидротермомеханический и др. Последовательность обработки может быть и другой: причем чем сложнее отработанная смесь, тем больше в ней трудноотделимых пленок связующих тем больше в цене применяется различных связующих тем больший удельный вес должны занимать комби-

нированные методы регенерации. При этом если перемешаны друг с другом разные смеси, то регенерации даже комбинированными методами становится затруднительной иногда — невозможной. Экономическая целесообразность применения комбинированных методов регенерации может быть оправдана только восстановлением наиболее дорогостоящих флюидных материалов.

Заключительным этапом регенерации является сепарация, т. е. разделение зерновой основы песка и пылевидных фракций. Как она осуществляется? Уже было показано, что в установках пневмодвара эта операция совмещена с процессом отделения флюида связующего. Здесь воздух — основное рабочее тело — выполняет обе функции. Удаление пылевидных частиц потоком воздуха осуществляется и в ряде других установок механической регенерации. При термической регенерации удаление пыли также часто совмещается с основным процессом если используются установки кипящего слоя.

Существуют и специальные пневмосепараторы (рис 2.14). Смесь через трубу снизу подается воздухом со скоростью 18–20 м/с. По выходе из трубы благодаря расширению проходного сечения скорость потока падает до 4–6 м/с. Крупные частицы песка вследствие снижения скорости падают в сборник и удаляются из сепаратора. Более мелкие частицы уносятся вверх, где им с помощью направляющих лопаток придается вращательное движение. Крупные частицы этой фракции попадают во втулочный конус, устремляются вниз и удаляются в сборник регенерата. Вся мелочь пыли воздухом выносятся из сепаратора вверх к очистным фильтрам. Степень сепарации можно регулировать поворотом лопаток на нужный угол.

В установках гидрорегенерации роль рабочего тела сепарации выполняет вода. Мелкие частицы уносятся потоком воды, более крупные оседают в специальных резервуарах — классификаторах. В дальнейшем вода с мелкими частицами осветляется шлам удаляется на свалку.

Высокая эффективность пылеотделения имеет место при электросепарации, где обработанная смесь просиливается в пространство между двумя электродами с напряжением постоянного тока до 50 кВ (рис. 2.15). На поверхности токопроводящих частей смеси закапывается отрицательный электрический заряд, вследствие чего заряженные частицы при падении отклоняются от вертикали на некоторый угол  $\alpha$ , который прямо пропорционален напряженности электрического поля и дисперсности частиц. При прочих равных условиях мелкие частицы отклоняются больше, чем крупные. Внизу под электродами устанавливается перегородка позволяющая разделить мелкие фракции от крупных. Для более полного разделения применяются электросепараторы, состоящие из нескольких секций установленных одна над другой. Габаритные размеры каждой секция в среднем равны 500 × 500 × 500 мм. Следует иметь в виду, что электросепарация

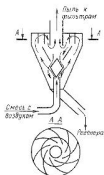
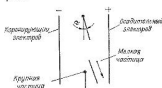


Рис 2.14 Пневмосепаратор

Рис 2.15 Силы электростатической силы



возможна только для токопроводящих материалов, таких как  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZrSiO}_2$  и т. п. Токопроводящие частицы (например хромит) разделяться не будут так как они могут удерживать электрический заряд.

Во многих случаях сепарация производится просеиванием регенерируемой смеси через ряд сит.

С экономической точки зрения сепарация — весьма трудоемкий процесс. Например, в работе [105] отмечается, что по текущим затратам сепарация приравнивается ко всем другим затратам регенерации.

Рассмотрим вопрос регенерируемости основных смесей при изменениях в литейном производстве. Данная проблема еще мало изучена. Известные результаты исследований часто носят по творческий характер.

Выходом при регенерации называют отношение масс полученного регенерата и взятой для регенерации отработанной смеси, выраженное в процентах. Этот показатель зависит от вида смеси и метода регенерации. При установившейся практике регенерации тех или иных смесей на различных установках выход характеризуется следующими ориентировочными значениями:

Механическая регенерация отработанных смесей с использованием:	%
гидравлическая	50
термическая	70
Регенерация:	
гидравлическая	80
термическая	90

При прочих равных условиях зерна песка округлой формы обладают более высокой регенерируемостью по сравнению с дру

гими формами зерен. Наиболее легко регенерируется песчано-глинистая смесь, для которой наиболее простым методом регенерации установленным в мировом практике, является механический, в особенности пневмоударом. Этот вид смесей также легко поддается гидро-регенерации. Общим недостатком регенерации песчано-глинистых смесей является удаление активной составляющей глины и нерепрогративированных технологических добавок. Этот вопрос пока мало обсуждается несмотря на то что утилизация полезных составляющих пылевидных фракций имеет большое практическое значение.

Хорошо известно что чрезвычайно сложно регенерировать жидкостекольную смесь. При заливке металла и последующем охлаждении отливоч прогресс смеси приводит к десегрегации и остекловыванию пески жидкостекольного связующего. Адекватное сцепление таких зленок с поверхностью зерен песка наиболее значительное. Прочность сцепления тем больше, чем выше температура заливаемого сплава. Поэтому жидкостекольные смеси светлого цвета легче поддаются регенерации чем чугуниого или стального.

По вопросу регенерации жидкостекольных смесей нет единого мнения. Одни исследователи считают что отделения зленок связующего можно добиться только интенсивным перетиранием — механическим способом [102]. Термическая и гидравлическая регенерации считаются неэкономичными [107]. Другие [91, 96] утверждают что механическая регенерация жидкостекольных смесей практически не применима и для ее регенерации наиболее эффективна является гидравлический способ. Однако в этом случае в регенерате идет накопление соды, так как в каждом цикле регенерации удаляется не более 30 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Если в регенерате будет 0,6—0,7 % соды, то по мнению специалистов [96, 105, 107] это как полноценный заменить свежего песка использовать нельзя вследствие резкого понижения живучести смеси, прочности газопроницаемости и отлепучности. Такой регенерат требует осветления не менее чем на 50 %.

Существует мнение [93], что для жидкостекольных смесей эффективно применение механической и термической регенерации. В отношении целесообразности термической регенерации жидкостекольных смесей вряд ли можно согласиться. Однако считается [106], что регенерация этой смеси является экономически оправданной, если выход достигает 50 %.

По свидетельству П. А. Борсука и др. [16] отработанные жидкие самотвердеющие смеси могут быть подвержены механической и гидравлической регенерации. При этом физико-механические и технологические свойства ЖСС, приготовленных на одном регенерате, за исключением выживаемости, являются такими же как и на свежем песке. Увеличение кратности регенерации при водит к повышению в регенерате  $\text{Na}_2\text{O}$  (после трехкратного регенерирования ЖСС содержание  $\text{Na}_2\text{O}$  увеличивается примерно

в 4 раза по сравнению с однократным). Рост содержания оксида натрия является причиной некоторого ухудшения выживаемости. Однако свойства ЖСС остаются на достаточно хорошем уровне при непрерывной гидро-регенерации с добавками в смеси 25—30 % свежего песка. Регенерат полученный механическим восстановлением (измельчение отработанных смесей в молотковых дробилках с применением воздушной сепарации), можно до 65 % выводить в смесь.

В последние годы стали применять жидкостекольные смеси, отверждаемые сложными органическими эфирами позволяющими повысить содержание жидкого стекла в смеси в 1,5—2 раза. Регенерируемость такой смеси значительно выше чем продуваемой  $\text{CO}_2$ . При этом некоторые исследователи считают, что применение сложных органических эфиров в качестве отвердителей снимает проблему регенерации (как и выживаемости) жидкостекольных смесей. Однако существует и противоположная точка зрения. Присутствие в регенерируемой смеси ацетата натрия образующегося в результате обработки жидкостекольных смесей органическими эфирами (в частности смесими моно ди и триацетата) делает регенерацию невозможной [102].

Наиболее эффективной является регенерация смесей с органическими связующими. Для этих смесей регенерация по существу, начинается в процессе заливки формы и охлаждения отливки. При прочих равных условиях регенерируемость смесей с органическими связующими зависит от отношения масс металла и смеси в форме и теплоемкости металла. В процессе заливки и охлаждения металла в форме 100 %-ного угара связующих не достигается. В смеси всегда остается большая или меньшая часть не прошедшего деструкцию связующего. Полная деструкция имеет место только в тонких слоях смеси непосредственно контактирующих с металлом отливки. В связи с этим следует отметить [91] что для части смеси связующее которой не прошло деструкции механическая регенерация мало эффективна. зленка связующего не снимается с поверхности зерен. Однако другие исследователи отмечают [105] что при регенерации смесей с органическими связующими наиболее экономичным является механический способ.

За счет модифицирования синтетических смол силиканами и отверждения с помощью ИТСК содержание связующего в смеси возможно снизить в 2—3 раза. В этом случае выход регенерата при механической регенерации следующий:

Смесь	%
ФЛ 2	90
ФФ 1Ф	80—90
ФФ-1	60—75
БС-40 КФ-90	80—70
УКС-1 М19 62	30—50

Следует иметь в виду что при регенерации вовсе не обязательно полностью удалить органическое связующее. По дан-

ным [107] вполне возможно работать на регенерате с потерями при прокаливании равными 3%. Такие потери соответствуют 60% оставшейся в регенерате смолы.

Для смесей оболочкового типа наиболее эффективной является термическая регенерация. Лучшие результаты получаются со смесями из смолых отверждаемых органическими катализаторами. При использовании в качестве отвердителей ХТС фосфорной кислоты термическая регенерация исключена. Смесь насыщается азотом, а вследствие образования фосфата аммония  $(NH_4)_2PO_4$  — и оксидами фосфора — которые не отделяются от поверхности зерен песка даже при его термической обработке. Для получения удовлетворительного качества отливок содержание азота в регенерате допускается не более 0,1% при литье чугуна и не более 0,01% — стали. Содержание фосфора в песке должно быть не более 0,5% [93]. Вследствие высоких единичных и эксплуатационных затрат при высокой стоимости топлива и электроэнергии термическая регенерация широкого распространения не находит. Этот вид регенерации экономически оправдан при переработке дорогостоящих циркониевых песков в случае их использования в качестве зернистой основы оболочкового типа.

В отношении свойств регенерата сведения неоднородны. Одни исследователи утверждают, что регенерат является полноценным заместителем свежего песка, другие отмечают те или иные недостатки при использовании регенерата. Видимо, правы и первые и вторые. Свойства регенерата зависят от метода и полноты регенерации, вида технологического процесса, в котором используется регенерат.

Совместимость регенерированного песка со связующими материалами в технологическом процессе где предполагается его использовать показана в табл. 23. Необходимо также иметь в виду, что хорошо совмещаются регенераты ХТС, если до регенерации смесь отверждалась слабой кислотой после регенерации — сильной. И наоборот, регенерат нельзя использовать в технологическом процессе со слабым катализатором, если до регенерации смесь отверждалась сильным катализатором.

Существует полная совместимость регенерата от ХТС при использовании его в песчано-глинистых

Таблица 23. Совместимость регенератора со связующими [95]

Связующее новой смеси	Связующие среды старой смеси					
		1	2	3	4	5
1 Фенольное	С	С	О	О	Н	О
2 Фурановое	С	С	О	О	Н	О
3 Фенолуретановый	Н	Н	С	С	Н	О
4 Мелкодисперсионный	Н	Н	С	С	О	С
5 Силикатное	Н	Н	С	С	С	О
6 Алмазобор	О	О	С	С	О	С

Примечание: С — совместимы; О — ограниченно совместимы; Н — несовместимы.

смесях для сырой формовки в качестве освежающей добавки. Нельзя совместно использовать регенераты жидкостекольной и смольной смесей, так как они содержат несовместимые кислоты и основания. Песок из песчано-смольных смесей полностью по-прежнему невозможно поэтому при применении регенерата для ХТС рекомендуется добавлять 10—20% свежего песка [105, 106].

Термическая регенерация кварцевого песка минимизирует его расширение при этом ухудшаются его технологические свойства в последующем цикле. Применение такого песка позволяет уменьшить расход связующего материала и брак форм и стержней по трещинам по сравнению с использованием свежего песка. При изготовлении оболочковых форм термически регенерированный песок может приравниваться к свежему который добавляют до 10% для компенсации потерь. При регенерации наблюдается некоторое изменение гранулометрического состава — песок не сколько укрупняется [96, 103].

При использовании регенерата в том же технологическом процессе из смеси которого получают регенерат имеет место ухудшение свойств смеси по сравнению со свежим песком. В частности, это выражается в уменьшении прочностных свойств, а следовательно в возможности уменьшения расхода связующих. Неудивительно объяснить это явление можно двумя причинами: процессом активации поверхности зерен песка при его регенерации и примазками непрореагировавшей части связующего материала, не удаленной при регенерации.

Исходя из литературных данных Г. Энгельсом [91] выполнена ориентировочная оценка технической возможности способов ре-

Таблица 24. Степень пригодности методов регенерации для различных связующих [107]

Связующее	Регенерация							
	каустическая сода	тепловая обработка	термическая сода	кислотная обработка	термическая обработка	флюориды	флюориды	флюориды
Глина	УП	П	Н	ХП	П	П	ХП	ХП
Пемзит	П	П	Н	ХП	УП	УП	ХП	ХП
Жидкое стекло	УП	П	Н	ХП	П	П	ХП	ХП
Экспортное жидкое стекло	Н	П	УП	ХП	П	П	ХП	ХП
Экспортное жидкое стекло	Н	УП	П	П	П	ХП	ХП	ХП
Экспортное жидкое стекло	УП	Н	П	Н	ХП	П	ХП	ХП
Смолы:								
фенольные	УП	Н	П	УП	ХП	П	ХП	ХП
фурановые	П	Н	П	УП	ХП	П	ХП	ХП

Примечание: ХП — хорошо пригодны; П — пригодны; УП — условно пригодны; Н — непригодны.

Таблица 2.5. Экономическая эффективность регенерации

Режимерегенерации	Стоимость 1 т регенерата руб.	Капитальные затраты на 1 т/ч тмт. руб.
Механическая	1—4	9—24
Гидравлическая	3—7	23—48
Термическая	5—8	35—56

ваделей регенерация всегда экономически оправдана. Однако существует и другое, видимо более правильное мнение, в соответствии с которым процесс регенерации будет рентабельным только при достижении определенной производительности и положительный эффект тем больше, чем выше производительность установок регенерации. В связи с этим представляется целесообразной централизация процессов регенерации на базе объединения нескольких заводов, которую необходимо осуществлять на специализированных предприятиях. Только при такой организации производства можно достичь полной механизации — даже автоматизации — технологических процессов регенерации формовочных и стержневых смесей. Наряду с экономической целесообразностью при этом улучшатся санитарно-гигиенические условия работающих, а также снизятся затраты на охрану окружающей среды.

В настоящее время стоимость регенерированного песка и капитальные затраты зависят от вида регенерации и производительности установок. По опыту литейных цехов СССР экономическая эффективность регенерации характеризуется данными, приведенными в табл. 2.5 для установок производительностью 5—60 т/ч [72].

Как видно, наиболее экономически целесообразной является механическая регенерация, которой и должно быть отдано предпочтение. Гидравлическая регенерация должна быть вволе оправданной только в цехах, применяющих гидравлическую стержневую и очистку отливок.

генерации, т. е. пригодности (применимости) того или иного метода регенерации к различным смесям без учета экономической эффективности (табл. 2.4).

Кроме технической возможности при выборе способа и объема регенерации необходимо принимать во внимание экономическую эффективность. По свидетельству многих исследо-

выбора рациональных схем и режимов уплотнения по критериям распределения плотности смеси в форме. При разработке математических моделей возможны три уровня абстрагирования: макроуровень — структурный уровень — ячейки или элементы смеси, уровень молекулярных сил взаимодействия. Математические модели смесей, соответствующие данным уровням, и области их применения представлены в табл. 3.1. Использование математических моделей для решения технологических задач дано на рис. 3.1. Анализ связей задач — модель (показаны стрелками) определяет ведущую роль моделей, учитывающих дискретное строение формочной смеси.

Ниже приведены основные методические принципы, используемые при разработке математических моделей формовочных смесей и теории уплотнения.

1. Сочетание феноменологической макроскопической теории, использующей гипотезу сплошности и статистического подхода, основанного на введении средних для объема частиц характеристик и изучении законов их распределения. Плодотворность таких методов подтверждена многолетним опытом развития механики сплошной среды.

2. Доведение математического аппарата к расчетным зависимостям до конкретных инженерных приложений. Строгая мате-

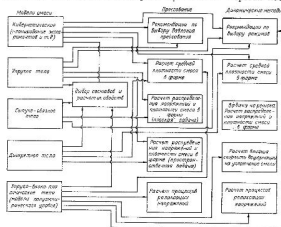




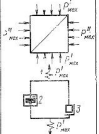
Рис. 3.1. Использование математических моделей для решения технологических задач.



## Глава 3 ПРОЦЕССЫ УПЛОТНЕНИЯ СМЕСЕЙ

### 3.1 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ УПЛОТНЕНИЯ

Основной задачей теории уплотнения является построение математических моделей смесей и процессов уплотнения для описания напряженно-деформированного состояния в цехах

Таблица 3: Классификация математических моделей формовочных смесей

Уровень анализа или масштаба	Модель	Характеристика модели. Примеры разработок	Область применения
Макроуровень	 <p><math>X_1, \dots, X_n</math> — компоненты смеси, параметры обработки и т. д.; <math>Y_1, \dots, Y_n</math> — свойства смеси, форма</p>	Кобернстическая модель, получаемая в результате статистической обработки экспериментальных данных и клипирования экспериментов	Расчет составов смесей, параметров дифференциального процесса, вальцово-уплотнения и т. д.
	 <p><math>P_{max}</math> — параметры механических (упр. лотисающих) воллей стейки на смеси</p>	Смесь моделируется системой уравнений теории упругости и пластичности, ставится сч. пучек среды. Система уравнений распределения напряжений при прессовании жесткой колодой, гибкой диафрагмой, дифференциальной колодой (или сч.ки задачи)	Выход уравнений упр. лотиса. Расчет на практике в разл. их сеч.ных формах
Уровень анализа или масштаба	 <p><math>P_{max}</math> и <math>P_{max}^*</math> — ха. характеристики нагрузки деформирующей на элемент (для всех моделей уровня); 1, 2, 3 — характеристики упругости, вязкости, пластичности</p>	Элемент смеси при моделировании как элемент вязкоупругоупр. лотисающего тела. Сочетание между характеристиками напряжения, разности трактации, вязкоупр. лотисающего тела. Элемент смеси при моделировании как упругоупр. лотисающего тела. Характеристики 1, 2, 3 комбинируются различными способами. Представление формовочной смеси в виде тел Вискоума. Коэффициент вязкоупр. лотисающего тела. Коэффициент вязкоупр. лотисающего тела Гогенберг. Примеры в элементарной статистической теории Сепана; выход условия пластичности	Выход уравнений упр. лотиса. Интерпретация и количественная оценка свойств смеси — коэффициенты внутреннего трения, вязкоупр. лотисающего тела, вязкоупр. лотисающего тела, вязкоупр. лотисающего тела

Уровень анализа	Модель	Характеристика модели. Примеры разработок	Область применения
Уровень анализа или масштаба	 <p><math>\sigma</math> — характеристика условия</p>	Явления смеси при ее моделировании как дискретное тело. Описание структуры смеси	Выход уравнений упр. лотиса. Интерпретация и количественная оценка свойств смеси — коэффициенты внутреннего трения, вязкоупр. лотисающего тела, вязкоупр. лотисающего тела. Анализ кривых упр. лотисающего тела с количественным описанием отдельных элементов
Макроуровень	 <p><math>P</math> — силы, взаимно действующие на частицы; <math>I</math> — частицы; <math>2</math> — взаимодействие по теории</p>	Связь сил взаимодействия между частицами смеси, образования двойных электрических слоев на поверхностях раздела фаз, расслоивания двойных слоев тонких слоев жидкости и т. д.	Интерпретация физико-химических процессов при смешивании в обработке формовочных материалов и смеси, объяснение процессов протекания, вязкоупр. лотисающего тела и других свойств смеси

математическая постановка задач описания структуры и деформации тела типа формовочной смеси даже для простейших случаев часто приводит к их неразрешимости средствами классической математики. В связи с этим целесообразным представляется использование упрощенной математической постановки задачи с последующей разработкой физически обоснованных формул с эмпирически определенными коэффициентами.

Феноменологический подход с применением аппарата теории упругости использован на уровне принятом для решения прикладных задач механики грунтов. Целесообразность статистического подхода обуславливается прежде всего особенностью структуры формовочной смеси.

Для реализации сформулированных принципов использован приведенный ниже комплекс математических моделей (рис. 3.2) [52].

Модель (рис. 3.2, а) описывающая формовочную смесь как дискретное тело. Экспериментальной основой модели являются исходники изучения микроструктур формовочной смеси с помощью прозрачных шлифов и их фотографии. При рассмотрении сечения

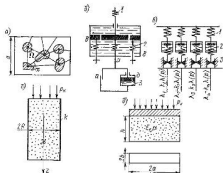


Рис. 3.2. Модели формовочной смеси: а — модель дискретного тела; б и в — реологические модели микро- и макроструктуры; г — модель дискретного тела с учетом влияния статистических процессов; д — модель тонко деформируемого тела

уплотненного объема смеси с линейным размером  $a$  использовано соотношение между площадью не занятой сечениями зерен песка  $\Omega$ , и объемом пор  $V_n$

$$\Omega/a^2 = V_n/a^3 \quad (3.1)$$

Наименьшую пористость имеют пространственные структуры с наименьшим отношением  $\Omega$  ко всей площади сечения. Возрастание плотности упаковки зерен песка при уплотняющих нагрузках оценивалось вероятностью получения максимальных значений площадей, занимаемых сечениями зерен. Решение было получено на основе экстремальных задач геометрии и теории упаковок.

Плотность упаковки сечений на плоскости возрастает с увеличением числа равносторонних треугольников образованных лучами соединяющими центры укладываемых фигур, которое, в свою очередь зависит от закона распределения углов рассматриваемых треугольников. Анализ законов распределения углов  $\alpha$ , принятых за меру упаковки, позволил получить основное уравнение для расчета дискретного строения формовочной смеси

$$\delta_2/\delta_{100} = P_1/P_{100} \quad (3.2)$$

где  $P_1$  и  $P_{100}$  — вероятности появления углов в зоне шпательной упаковки для смесей с плотностями  $\delta_1$  и  $\delta_{100}$ .

Зона плотной упаковки оценена отклонением  $\pm\alpha_1$  от среднего значения  $\alpha = 60^\circ$ . При проведении анализа микроструктур формочной смеси при различных плотностях было определено ради-

ональное значение  $\alpha_1 = 15^\circ$ . Вероятность  $P_1$  в этом случае определяется по следующей зависимости

$$P_1 = 2\Phi\left(\frac{15^\circ}{\sigma}\right), \quad (3.3)$$

где

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-t^2/2} dt$$

табулированная функция Лапласа,  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение углов упаковки.

Если принято состояние  $i$  за исходное, то при переходе к состоянию  $i+1$  при определенных параметрах уплотнения (давление, времени прессования и ускорения вибраций и т.д.) приращение плотности можно рассматривать как приращение вероятности плотной упаковки зерновой составляющей смеси. Такая трактовка закономерности изменения структуры смеси позволила определить основные направления инженерных расчетов.

Главные инженерные приложения данной модели анализа структуры сухого песка, уплотненной смеси расчет кривых деформации, вывод уравнения уплотнения при прессовании смеси для широкого диапазона давлений, расчет энтальпии процесса прессования, вывод уравнения уплотнения для динамических процессов.

**Реологические модели** (рис. 3.2, б и в). Микрообъем смеси на уровне отдельной ячейки представлял усложненной моделью смешанной среды Томпсона — Максвелла с возможностью описания обратимых и необратимых деформаций. Модель характеризуется усложненной конструкцией упругого 1, упруговязкого 2 и вязкопластического 3 элементов и позволяет описывать различные виды и стадии упругих и пластических деформаций. Параметры деформации 1-2 являются обратимыми, деформации 2б — 3а — необратимыми. Для макрообъема предложена реологическая модель, описывающая формовочную смесь как статистически неоднородное упруговязкопластическое тело. Элементарные объемы смеси согласно данной модели отличаются значениями упругих, вязких и пластических характеристик. Для такого рода тел при учете вязкой (в самом общем смысле слова) природы деформаций приращение напряжения  $dp$  влущее на деформацию каждой элементарной ячейки пропорционально приращению скорости  $dv$  т.е.

$$dp = k_i \lambda(\rho) dv, \quad (3.4)$$

где  $\lambda(\rho)$  — средняя для всей смеси пластическая вязкость,  $k_i$  — соответствующие коэффициенты пропорциональности для ячеек смеси  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ .

Основные инженерные приложения данной модели — вывод уравнений для расчета влияния скорости деформации на процесс уплотнения, расчет рациональных режимов ударного прессования и встряхивания с одновременным прессованием.

Модель (рис 3 2 а), отражающая дискретную структуру формовочной смеси и аналогично процесса распределения вертикальных напряжений  $p_z$  с другими статистическими процессами. В этом случае

$$p_z = f(p_0, r, z, k, \kappa), \quad (3 5)$$

где  $p_0$  — давление на прессовой колодке,  $r, z$  — координаты,  $\kappa, k$  — характеристики смеси и условий ее взаимодействия с осью штока.

Главными инженерными приложениями данной модели являются расчет напряжений сжатия и боковых давлений при уплотнении смеси в объемах с произвольным сечением, построение номограмм расчет распределения плотности смеси и построение номограмм уплотнения при прессовании.

Модель (рис 3 2 б), описывающая формовочную смесь как линейно деформируемое тело. При этом компоненты нормальных и касательных напряжений  $\sigma$  и  $\tau$  вычисляются следующим образом

$$\sigma = f(\sigma_0, x, y, z, n, k, E, \mu, f) \quad (3 6)$$

Здесь  $x, y, z, n$  —  $h/a, k = b/a$  — координаты и геометрические параметры;  $E, \mu$  — модули деформации;  $f$  — коэффициент внешнего трения смеси.

Главные инженерные приложения данной модели — это расчет нормальных и касательных напряжений при уплотнении смеси в объемах с произвольным сечением, построение номограмм уплотнения, создание инженерной методики расчета рациональных режимов прессования и последующего прессового метода.

Комплекс статистических моделей, полученных главным образом методами планирования экспериментов. Они были использованы для расчета параметров уплотнения дифференциальным прессованием встряхиванием с одновременным прессованием, вибропрессованием и т. д.

Дальнейшее развитие теории уплотнения основано на исследовании советских ученых применении для расчетов режимов уплотнения интегральной теории наследственных сред Больцмана — Вольтерра [59]; совершенствование реологических моделей формовочных смесей с учетом режимов нагружения и их использование для расчета процессов динамического уплотнения [57, 58]; применение прибора трехосного сжатия для анализа деформируемости образцов смеси при сложных динамических нагружениях [38]; применение в том числе для динамических процессов

конечноразностных методов уплотнения сжимаемых сыпучих сред [56, 64]; общий подход к процессам уплотнения с позиций термодинамики [25].

## 3 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ НЕОБХОДИМОЙ СТЕПЕНИ УПЛОТНЕНИЯ

Под технологически необходимой степенью уплотнения следует понимать распределение плотности формовочной смеси в форме обеспечивающее получение бездефектных отливок. Общее положение о том, что в большинстве случаев качественные отливки получаются при относительной плотности смеси 85–90 % от максимально возможной для данного состава, было экспериментально подтверждено при изготовлении отливок разных конфигураций. Были выделены три группы сложности моделей (рис. 3.3) К группе I отнесены модели с отношением высоты  $H_m$  к поперечному размеру  $b_m$ , значительно превышающим I Переулотненной в этом случае оказывается надмоделная поверхность  $a$ , вазоуплотненными — боковые поверхности  $b$  К группе II отнесены модели имеющие сравнительно небольшую высоту и сложную контур на поверхности. Трудноуплотняемым местом в этом случае оказывается поверхность кармана  $b$  Для моделей группы III трудноуплотняемыми являются «мелкоуглубные» цилиндрические поверхности с большой высотой по образующей, перпендикулярной к разному  $a$  также вертикальные поверхности, образующие конфигурацию ребер (поверхности  $a$  и  $b$ ).

Технологически необходимую степень уплотнения следует определять по минимально допустимому значению плотности смеси в трудноуплотняемом месте поверхностного слоя формы, непосредственно контактирующего с металлом при заливке. Очевидно, что при верхнем прессовании жесткой колодкой значения этих плотностей могут быть достигнуты только за счет переуплотнения верхних слоев формы, контактирующих с прессовой колодкой. Эти слои характеризуются повышенной газопроницаемостью, что при значительном переуплотнении может приводить к образованию газовых раковин, везикулов и т. д. В связи с этим степень переуплотнения верхних слоев формы, обуславливающая снижение газопроницаемости, ниже некоторого «критического» значения и определяют границу применения этого способа уплотнения жесткой прессовой колодкой.

В табл. 3.2 определены трудноуплотняемые поверхности при уплотнении форм с моделями

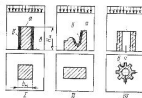


Рис 3 3 Группы сложности моделей

Таблица 32 Минимально допустимые плотности смеси

Вид поверхности	Группа моделей	Минимально допустимая влажность смеси	
		г/см <sup>3</sup>	%
Цилиндрические поверхности: торцы джуларные и ладу полуформы Криволинейные поверхности различных ступеней Междеревья цилиндрические поверхности с большой высотой по образующей, перпендикулярной к ладу полуформы	I	1,55	80
	II	1,55—1,65	80—85
	III	1,55—1,65	80—85

различных групп и приведены ориентировочные значения минимально допустимой плотности смеси для возможности получения качественных отливок (абсолютные и относительные значения).

В качестве ориентировочных рекомендовано применять следующие значения минимальной плотности смеси в трудноуплотняемых местах коутура: для отливок моделей II и III группы  $\delta_{\text{н.н.}} = 1,55 - 1,6 \text{ г/см}^3$ , для ответственных отливок моделей I группы  $\delta_{\text{н.н.}} = 1,55 \text{ г/см}^3$  для неотчетственных отливок моделей I группы  $\delta_{\text{н.н.}} = 1,5 \text{ г/см}^3$ .

Приведенные в таблице абсолютные и относительные значения плотностей получены применительно к смесям конвейерной формовки имеющим следующий уровень свойств: прочность на сжатие 0,06 МПа, влажность 4-3%, газопроницаемость 126 од текучести по Г. М. Орлову 60—70%. Значение максимально возможной плотности для данной смеси принималось равным 1,94 г/см<sup>3</sup>. Коэффициент неравномерности уплотнения (отношение плотности смеси в трудноуплотняемом месте к средней плотности по разрезу поверхности  $v$  на рис. 33) для выделенных групп моделей составлял 0,9—0,95.

Расчет распределения плотности смеси в различных точках формы и соотношения их с технологически необходимой прозой волился на основе теории уплотнения формовочных смесей по зволюющей рассчитывать распределение плотности смеси в форме при заданных режимах уплотнения. Многие ее принципы реализованы для двух классов сложных отливок массового производства (модели II и III групп) — «станина электродвигателя» и «звенно гусеничное». Элементы форм этих отливок будут представлены ниже. Сложность уплотнения форм для отливок «станина электродвигателя» определяется тем обстоятельством, что для межреберного пространства отношение  $H_m/b_m$  в ряде случаев составляет 15—20. Сложность уплотнения форм для отливок «звенно гусеничное» определяется наличием в них сочетания массивных и тонких мест, глубоких «карманов», резких переходов. Важность решения проблемы выбора и оптимизации режимов

формовки для данных классов отливок обусловлена также масштабом их применения в народном хозяйстве. Снижение массы данных отливок только на 2—3% обуславливает экономию в несколько тысяч тонн дорогостоящей легированной стали.

### 3.3 УПЛОТНЕНИЕ ПРЕССОВАНИЕМ

Теория и практика процесса уплотнения прессованием, начавшаяся в конце 50-х годов развивалась по трем направлениям:

1) разработка математических моделей процесса прессования и расчеты параметров напряженно-деформированного состояния смеси;

2) исследование свойств формовочной смеси;

3) выбор рациональных режимов прессования.

Важным достижением теории формовки явилось использование в работах Г. А. Смирнова математической теории упругости Кавасиурыта модель была применена для решения задач об уплотнении смеси статическим прессованием жесткой колодкой в цилиндрической оплоске с моделью и без модели. Математическая модель смеси как сыпучего тела, наибольшее развитие получила в работах Г. М. Орлова. Утверждение авторов ряда работ о несоответствии поведения смеси закону Кулона признано неправомерным. Были разработаны математические зависимости объединения которых с основными положениями статики сыпучей среды позволило решить сложную задачу о распределении напряжений для всех вариантов прессования.

Совершенствовались методы определения текучести, формуемости, пластичности и других свойств непосредственно связанных с поведением смеси в процессе деформации. Основными достижениями явились следующие: разработки по комплексам технологических свойств, определяемых на приборах и теплогидравлических пробках, определение свойств формовочных смесей, которые можно непосредственно использовать в математических моделях, совершенствование методов расчета кривых деформации в координатах плотность смеси — давление прессования (по уравнениям уплотнения) и деформация — время. Модуль деформации определялся на приборах статического прессования гидростатического сжатия. Коэффициенты внутреннего трения и сдвигового сцепления для различных модификаций моделей сыпуче связанного тела Кулона определялись на приборах среза, стабилометрах и т. д. Указывалось на зависимость коэффициентов внутреннего трения и сдвигового сцепления от плотности смеси. Наиболее перспективным представляется совершенствование методов определения свойств смесей на стабилометрах.

Общепризнанным в настоящее время является положение о целесообразности ограничения верхнего предела давлений прессования значениями 2—2,5 МПа. Выбор рациональных режимов прессования осуществляется на основе геометрического моде-

лирования при изменении положения о зависимости конечных результатов прессования не от абсолютных а от относительных размеров формы и модели. Качество формы в основном оценивается значениями плотности и твердости смеси.

В развитии теории основное внимание было уделено созданию нижней теории методики расчета рациональных режимов прессования при заданных размерах и конфигурации оплочки и модели и свойствах смеси. Были проведены расчеты по определению распределения напряжений при использовании математических моделей смеси как сыпуче-связанного а линейно-деформируемого тела. Математическая модель сыпуче-связанного тела позволяет рассматривать напряженно-деформированное состояние уплотняемого объема смеси находящегося в состоянии предельного равновесия. В соответствии с критерием текучести Мора — Кулона касательные напряжения по площади разрушения являются функцией нормального напряжения, действующего в рассматриваемой плоскости. В общей форме критерий Мора — Кулона может быть представлен в виде

$$\sigma_1 = \sigma_2 N^2 + 2cN, \quad (3.7)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  — соответственно наибольшее и наименьшее главные напряжения в предельном состоянии  $N = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$ . При этом предполагается что промежуточное главное напряжение  $\sigma_3$  не влияет на прочность смеси. Входящие в выражение критерия Мора — Кулона параметры угол внутреннего трения  $\varphi$  и удельное сцепление  $c$  — являются количественными характеристиками прочностных свойств сыпуче-связанного тела. При сдвиге на площадке разрушения в точках контакта частиц и по поверхностям их водно-коллоидных (прочно связанных с минеральными частицами) оболочек скользящие частицы будут сопротивляться еще оставшейся и вновь возникающие водно-коллоидные связи. Разделить эти сопротивления на только трение и только сцепление чаще всего не представляется возможным так как одновременно будет иметь место как трение сдвигаемых частиц одна по другой, так и преодоление вязких сопротивлений.

При рассмотрении формовочной смеси как сыпуче-связанного тела переменной плотности решение плоских задач предельного равновесия сводилось к интегрированию дифференциальных уравнений равновесия совместно с прочностным соотношением при учете граничных условий. Плоское напряженное состояние смеси при уплотнении описывалось системой квазилинейных дифференциальных уравнений гиперболического типа в частных производных. При заданных условиях на границах объема уплотняемой смеси расчет напряженного состояния формы представляет собой по типу граничных условий задачу Коши. Произведенные на основе этого аппарата расчеты позволили вычислить напряжения при уплотнении смеси в оплочке без модели и с моделью. После вы-

числения главных напряжений были найдены эпюры вертикальных и горизонтальных сжимающих напряжений касательных напряжений.

По теории линейно деформируемых тел для решения задачи о распределении напряжений применимы уравнения теории упругости базирующиеся на линейной зависимости между напряжениями и деформациями в упругой стадии (закон Гука). В соответствии с обобщенным законом упругости шаровой тензор на напряжений определяющий деформацию объема, пропорционален шаровому тензору деформации а девiator напряжений характеризирующий изометрические формы пропорционален девiatorу деформаций причем коэффициенты пропорциональности определяются двумя независимыми упругими постоянными — модулем упругости  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\mu$ .

Применительно к формовочным смесям при действии внешних сил возникают не только упругие, но и значительные остаточные пластические деформации. Соответственно и параметр  $E$  нельзя отождествлять с модулем упругости а следует рассматривать его как модуль общей деформации. Анализ результатов расчетов [40, 71] показал что эпюры распределения напряжений определенные по различным расчетным моделям по характеру близки между собой и соответствуют предварительным качественным представлениям, полученным на основании богатого экспериментального материала. Так при уплотнении смеси в оплочке с моделью эпюры напряжений по обеим расчетным теориям претерпевают разрыв в точках, соответствующих верхним углам модели. Нам менее напряженной оказывается смесь у вертикальных стенок модели. В этих местах после уплотнения смесь будет иметь по меньшей мере плотность.

Методы основанные на применении положений статистики сыпучей среды и теории упругости, доведены до расчета напряженного состояния формы для задачи двух измерений и продемонстрировали примерно одинаковую точность. Было констатировано, что решение пространственной задачи на основе модели сыпуче-связанного тела сопряжено с серьезными математическими трудностями.

В работе [52] была использована математическая модель смеси как дискретного тела. Использован метод, основанный на аналогии уравнений гидродинамического типа описывающих такие процессы как теплопроводность и диффузия и уравнений распределения напряжений в дискретном теле. При учете математической аналогии между процессом распределения вертикальных напряжений в зернистой среде и процессом блуждания броуновских частиц получено уравнение для распределения вертикальных нормальных напряжений сжатия для пространственной задачи независимо от рода нагрузки. Однако уравнение удалось довести до инженерного расчета только для круглой оплочки без модели. В связи с этим был сделан вывод о перспективности

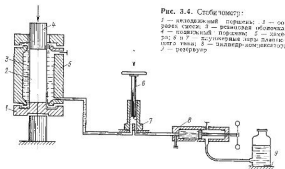


Рис. 3.4. Стабилометр:  
1 — образцовый поршань; 2 — со стальной обложкой; 4 — полимерная обложка; 5 — поршень; 6 и 7 — манометры пары Динке-Лью; 8 — манометр; 9 — резервуар.

совершенствовании расчетных методов теории прессования формовочной смеси на основе методов теории упругости.

Экспериментальные исследования по определению деформативных и прочностных свойств смесей были проведены [49] в условиях трехосного сжатия на стабилометре ГВ-9 конструкции ЛИИЖТа при соблюдении всех необходимых ограничений накладываемых на изготовление образцов, условия нагружения, регистрацию деформаций и т. д. Стабилометр (рис. 3.4) состоит из четырех основных узлов: станины рабочей камеры с индикатором часового типа для измерения вертикальных деформаций образца рычага и прессы для осевого давления и системы создания бокового давления. При испытании образец смеси в резиновой оболочке помещался в стакан камеры, между верхним подвижным поршнем и нижним неподвижным поршнем в основании камеры. Давление в воде заполняющей камеру создавалось системой состоящей из плунжерной пары плавающего типа и цилиндра компрессора служащего для поддержания поршня на одном уровне при изменении объема воды в камере. Вертикальные деформации образца при испытании измерялись индикатором часового типа, укрепленным на крышке камеры. Для исключения влияния торцевых ограничений испытываемым подвергались образцы диаметром 40 и высотой 80 мм. Образцы готовились из кварцевых песков различного гранулометрического состава и смесей с различным содержанием глины или бентонита при переменной влажности. Начальная плотность образцов до испытаний изменялась в пределах  $1,2-1,7 \text{ г/см}^3$ .

Испытания проводили по методу управляемой нагрузки по схеме обеспечивающей возможность одновременного определения в совокупных условиях комплекса характеристик механических свойств смесей. К образцу прикладывалось всестороннее наприя-

жение, равное наперед заданному боковому  $\sigma_2$ , при этом снимался начальный отсчет по индикатору. Это напряженное состояние образца являлось исходным. Затем при сохранении постоянного бокового давления постепенно увеличивалось вертикальное напряжение  $\sigma_1$  с одновременной фиксацией вертикальных деформаций вплоть до разрушения образца (потери устойчивости). За момент разрушения принималось состояние при котором наступало непрерывное деформирование без роста напряжений (последние 2—3 ступени осевой нагрузки перед разрушением не превышала 0,01 МПа). Эксперименты проводились при следующих значениях  $\sigma_2 = 0,1, 0,3, 0,5 \text{ МПа}$ .

Так как образцы деформировались с образованием «бочки», то при вычислении разрушающего значения напряжений учитывалось увеличение площади поперечного сечения приближенным расчетом и предположении, что коэффициент поперечной деформации  $\mu$  в момент разрушения равен 0,5.

По результатам каждого опыта строился график зависимости относительной вертикальной деформации  $\lambda$  образца от разности главных напряжений  $\sigma_1 - \sigma_2$ . В общем случае зависимость между напряжениями и деформациями является нелинейной. Однако на начальном участке при не очень больших изменениях внешнего давления (порядка 0,2—0,8 МПа в зависимости от состава и начальной плотности) с достаточной для практических целей точностью зависимость между деформациями и напряжениями может приниматься линейной. Схема линеаризации кривой деформации на начальном участке представлена на рис. 3.5. После ряда определений можно получить следующую зависимость для определения осевого модуля общей деформации

$$E = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\lambda_{\text{деформ}} / \lambda_{\text{эласт}}} \quad (3.8)$$

где  $(\sigma_1 - \sigma_2)_{\text{эласт}}$  и  $\lambda_{\text{эласт}}$  — соответственно разность главных напряжений и относительная вертикальная деформация в конце интервала линейной зависимости между напряжениями и деформациями.

Так как трехосные испытания не дают непосредственной информации относительно соотношения касательных и нормальных напряжений в критической области, то для выявления их соотношения при разрушении и нахождения характеристик прочностных свойств  $\varphi$  и  $c$  производилось построение кругов Мора и их огибающей, которая и определяет сопротивление сдвигу случайного тела. Поскольку круги напряжений Мора имеют смысл только



Рис. 3.5. Зависимость вертикальных деформаций образцов от разности напряжений в условиях трехосного сжатия

Таблица 33 Модуль деформации смесей различного состава

Номер смеси	Состав смеси	$\delta_0$ , г/см <sup>3</sup>	$E$ тс, МПа		
			в МПа		
			01	03	05
1	K016	1,50	267	1700	1700
2	K02	1,47	500	700	1050
3	K016 + 35 % В	1,24	110	220	370
4		1,56	620	630	—
5	K016 + 60 % В K016 + 5 % гл. + 5,0 % В K016 + 10 % гл. + 5,0 % В K016 + 15 % гл. + 5,0 % В	1,45	150	200	400
6		1,51	140	415	415
7		1,46	72	183	310
8		1,50	55	200	300
9	K016 + 10 % гл. + 2,5 % В	1,20	22	62	93
10		1,37	50	85	164
11		1,50	93	150	384
12	K016 + 10 % гл. + 7,5 % В	1,53	70	190	350
13		1,60	90	207	360
14	K016 + 10 % бент. + 2,5 % В	1,39	61	100	163
15		1,30	80	230	230
16		1,65	187	230	320
17	K016 + 10 % бент. + 5,0 % В	1,22	39	59	108
18		1,35	42	67	183
19		1,43	54	107	200
20		1,36	50	78	137
21	K016 + 12 % бент. + 5,0 % КВ + 0,05 % ДС ПАС + 3,0 % В	1,45	68	107	175
22		1,52	136	162	206

\* Указаны массовые доли компонентов смеси (гл. — глина, бент. — бентонит, в — вода) сверх 100 % песка соответствующего гранулометрического состава.

напряженного состояния в точке использование их предполагает рассмотрение всего образца как точки. С принятием этого допущения характеристики прочностных связей легко определялись после нахождения огибающей к кругам Мора построенным по результатам образцов при различном боковом напряжении  $\sigma_3$ .

Относительная погрешность при определении характеристик прочностных свойств, зависящая от точности построений и точного соблюдения постоянства начальной плотности трех образцов необходимых для определения  $\varphi$  и  $c$ , не превышала 5 %. В табл. 33 приведены значения осевых модулей общей деформации  $E$  для различных плотностей  $\delta_0$ .

Для всех смесей модуль деформации является переменной величиной зависящей от напряжения при исходном всестороннем сжатии  $t$  с от величины  $\sigma_3$  с увеличением которой происходит увеличение модуля. При постоянном  $\sigma_3$  модуль деформации возрастает при повышении начальной плотности образцов  $\delta_0$ . С ростом  $\delta_0$  и  $\sigma_3$  до 0,5 МПа  $\sigma_3$  увеличивается до 0,8—1,3 МПа при которых сохраняется приблизительно линейная зависимость между напряжениями и деформациями.

Наибольшие модулями общей деформации обладают сухие кварцевые пески. Деформируемость водно-глинистых коллоидных оболочек в формовочных смесях значительно больше таковой у кварцевых зерен что обуславливает значительное снижение модулей деформации формовочных смесей по сравнению с песками. Изменение содержания глины (бентонита) и воды в смесях приводит к изменению свойств и толщины оболочек связующего, а следовательно и к изменению модулей деформации.

Зависимость между нормальными и касательными напряжениями в исследованном диапазоне изменения боковых напряжений глинына, угол внутреннего трения для каждой смеси постоянен и в зависимости от состава и начальной плотности может принимать значения от 22 до 33°. В смесях с бентонитом уменьшение влажности от 5 до 2,5 % при прочих равных условиях приводит к увеличению сопротивления сдвигу. Сопротивление сдвигу кварцевого песка зависит от гранулометрического состава влажности на начальной плотности. Уменьшение сопротивления сдвигу при увлажнении объясняется переходом от сухого трения к полужидкому.

Наиболее важным фактором обуславливающим повышение прочности на сдвиг смесей различного состава является увеличение начальной плотности образцов  $\delta_0$ . На рис. 3.6 представлена зависимость угла внутреннего трения от  $\delta_0$  (цифры на рис. 3.6 соответствуют номерам смесей в табл. 3.3).

Данный комплекс исследования свойств смесей послужил экспериментальной основой решения пространственной задачи определения напряжений при уплотнении формовочной смеси. Для аналитического решения был применен один из методов прикладной теории упругости — дискретный метод. В дискретном методе искомыми функциями (перемещениями в направлении) представляются в координатно-разностной форме для двух переменных для третьей — функ-

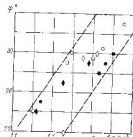


Рис. 3.6. Зависимость угла внутреннего трения  $\varphi$  от плотности смеси  $\delta_0$ . Номера смесей:

● — 3, 4, □ — 9, 10, 11, ■ — 12, ○ — 13, 14, 15, 16, ● — 17, 18, 19, ○ — 20, 21, 22.

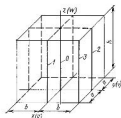


Рис. 3.7. Расчетная схема для скрепного метода

длиной  $2b$  ( $a < b$ ), высотой  $h$  с шероховатыми абсолютно жесткими стенками. Граничные условия были записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned} u &= v = 0, \quad w = w_0 \quad \text{при } z = h \\ u &= v = x = 0 \quad \text{при } z = 0, \end{aligned} \quad (3.9)$$

где  $u$  и  $v$  — соответственно перемещения в направлении осей  $x$  и  $y$ ,  $w$  — результирующее перемещение прессовой колодки соответствующее внешней приложенной нагрузке  $p$ . Первое условие записано для границы колодки — смеси, второе — для разреза.

Учет сил внешнего трения смеси о боковые стенки опки при вадит к крайним условиям

$$\text{при } x = \pm a \quad \tau_{xz} = f\sigma_x \quad (3.10)$$

$$\text{при } y = \pm b \quad \tau_{yz} = f\sigma_y \quad (3.10a)$$

где  $f$  — коэффициент внешнего трения смеси о стенки опки.

В соответствии с расчетной схемой дискретного метода при решении пространственной задачи исследуемое тело разлагалось взаимно перпендикулярными плоскостями, параллельными координатным плоскостям  $xOz$  и  $yOz$  на параллелепипеды размерами  $a \times b \times h$  и искомого функции определялись для узловых ребер (рис. 3.7). Так как граничные условия задачи заданы в пере смещениях, то использовался метод перемещений  $u, v, w$  за основные неизвестные принимались функции перемещений.

Из условий симметрии и абсолютной жесткости ограничивающих стенок вытекает что имеется четыре неизвестных: вертикальные перемещения  $w_0, w_1, w_2, w_3$  точек центрального ребра ребра в центре широкой стороны ребра в центре узкой стороны и углового ребра соответственно. В результате выполнения процедуры дискретного метода были получены системы уравнений для

напряжений и перемещений. Система уравнений для перемещений записана в виде

$$\left. \begin{aligned} \alpha_n \frac{1}{n^2} \frac{d^2 w_0}{dz^2} - w_1 + \frac{w_2}{k} - \frac{k^2 + 1}{k^2} w_0 &= 0 \\ \alpha_n \frac{1}{n^2} \frac{d^2 w_1}{dz^2} - 2f\mu_n \frac{1}{n} \frac{dw_0}{dz} + w_0 - \frac{w_2}{k} - \frac{k^2 + 1}{k^2} w_1 &= 0 \\ \alpha_n \frac{1}{n^2} \frac{d^2 w_2}{dz^2} - 2f\mu_n \frac{1}{nk} \frac{dw_2}{dz} + w_2 + \frac{w_1}{k} - \frac{k^2 + 1}{k^2} w_2 &= 0 \\ \alpha_n \frac{1}{n^2} \frac{d^2 w_3}{dz^2} - 2f\mu_n \frac{k+1}{nk} \frac{dw_3}{dz} + w_3 + \frac{w_1}{k} - \frac{k^2 + 1}{k^2} w_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

где  $\mu = h/a$ ,  $k = b/a$ ,  $z = z/h$  (безразмерная координата),  $\alpha_n$  — коэффициент поперечной деформации;  $\alpha_n, f\mu_n$  — коэффициенты зависящие от  $\mu$ .

Таким образом получена линейная крайняя задача для системы четырех дифференциальных уравнений второго порядка с постоянными коэффициентами. Для понижения порядка и при ведении системы (3.11) к нормальному виду были проведены преобразования отражающие процесс утончения смеси в замкну том объеме в условиях действия сил внешнего трения. Прежде всего были учтены соотношения (3.9) (3.10) и (3.10a). Кроме того были использованы подстановки

$$\left. \begin{aligned} W_0 &= y_1 W_0, \quad W_1 = y_2 W_0, \quad W_2 = y_3 W_0, \quad W_3 = y_4 W_0 \\ W_0 &= y_5 W_0, \quad W_1 = y_6 W_0, \quad W_2 = y_7 W_0, \quad W_3 = y_8 W_0 \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

где  $y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 8$ ) представляют собой перемещения и их производные, соответствующие единичному перемещению колодки.

При использовании соотношений (3.9) (3.10) и (3.10a) выражений для напряжений в дискретной форме были определены нормальные напряжения в точках по высоте рассматриваемых ребер. Перемещение  $w_0$  соответствующее приложенной внешней нагрузке  $p$ , определялось при рассмотрении уравнения равновесия сил внешних и внутренних сил в сечении под колодкой при  $z = 1$

$$4\rho ab = ab (\sigma_z^{(0)} + \sigma_z^{(1)} - \sigma_z^{(2)} - \sigma_z^{(3)})_{z=1} \quad (3.13)$$

Окончательное выражение для  $W_0$  было представлено в виде

$$W_0 = \frac{4h(t+\mu)}{\sum_{n=1}^{\infty} y_n} p \quad (3.14)$$

С учетом приведенных выше соотношений и после понижения порядка (3.11) были вычислены значения приведенных (в отношении к приложенной нагрузке  $p$ ) напряжений. Они представлены в табл. 3.4

Таблица 34 Значения приведенных напряжений

Напряжения	Номер ребра	
	1	2
$\sigma_2$	$\frac{4}{\sum_{i=1}^4 y_i} y_1$	$\frac{4}{\sum_{i=1}^4 y_i} y_2$
$\sigma_3$	$\frac{\alpha_3}{\alpha_4} \frac{4}{\sum_{i=1}^4 y_i} y_1$	$\frac{\beta_3}{\beta_4} \frac{4}{\sum_{i=1}^4 y_i} y_2$
$\sigma$	$\frac{\beta_3}{\alpha_3} \frac{4}{\sum_{i=1}^4 y_i} y_1$	$\frac{\beta_3}{\alpha_3} \frac{4}{\sum_{i=1}^4 y_i} y_2$
$\sigma_2$	$\frac{4}{\sum_{i=1}^4 y_i} y_3$	$\frac{4}{\sum_{i=1}^4 y_i} y_4$
$\sigma_3$	$\frac{\beta_3}{\alpha_3} \frac{4}{\sum_{i=1}^4 y_i} y_3$	$\frac{\beta_3}{\alpha_3} \frac{4}{\sum_{i=1}^4 y_i} y_4$
$\sigma_f$	$\frac{\alpha_f}{\alpha_3} \frac{4}{\sum_{i=1}^4 y_i} y_3$	$\frac{\beta_f}{\beta_3} \frac{4}{\sum_{i=1}^4 y_i} y_4$

Расчет пространственного напряженного состояния формочной смеси был проведен на ЭВМ «Мирск-32» в вычислительном центре ЛПИ им. М. И. Калинина. Была разработана программа на алгоритмическом языке ФОРТРАН позволяющая получать численные значения вертикальных сжимающих напряжений в точках угловых ребер и графическую зависимость от высоты формы. В качестве исходных данных вводились значения параметров  $l$ ,  $k$  и  $\mu$ . Рассмотрены семейства кривых при вариации пара-

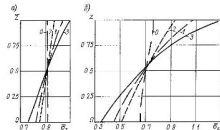


Рис. 38 Эпюры вертикальных сжимающих напряжений по высоте опоки для  $n = 0,5$  (а) и  $n = 2$  (б)

метров (использовано 30 вариантов) позволяет определять влияющие основные факторы на распределение напряжений. Диапазоны изменения параметров приведены ниже:

$$\begin{matrix} n & k & f & \mu \\ 0,5-0,15 & 1-4 & 0,15-0,6 & 0,2-0,4 \end{matrix}$$

На рис. 38 в качестве примера представлены эпюры распределения вертикальных сжимающих напряжений по высоте опоки для  $n = 0,5$  (а),  $n = 2$  (б) при  $f = 0,5$ ;  $\mu = 0,32$ ;  $k = 2$  (номера для кривых соответствует нумерации ребер). Выпуклость и вогнутость эпюр распределения напряжений соответственно на развесе и под колодкой оксидная. За счет действия сил внешнего трения происходит падение ваденные сжимающих напряжений по высоте наиболее интенсивное в зонах смеси при лежащих к углам опоки (кривые 3) и наименее — в центральных областях смеси (кривые 1). Аналогичные эпюры были получены для  $\beta_x$  и  $\beta_y$ . Расчеты подтвердили возможность применения метода геометрического моделирования при отладке и внедрении новой технологии при прессовании.

На рис. 39 приведено сопоставление расчетной зависимости при ваденных значений средних вертикальных напряжений на дне одностороннего «кармана»  $\sigma_{z=0}$  от геометрического параметра  $n$  (при  $k = 2$ ) с экспериментальными дан-

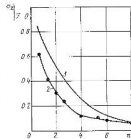


Рис. 39 Сопоставление расчетных и экспериментальных данных  $f$  — расчетная кривая; 2 — экспериментальные данные

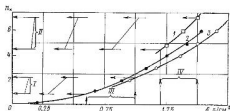


Рис 3.10. Характеристики структуры сухих песков и смесей со связующим: I — рыхлая смесь; II — сухой песок в насыщенной глинистой; III — максимальное уплотнение смеси; IV — зависимость плотности сухих смесей

ными. При переходе от значений напряжения к значениям плотности смеси относительная погрешность расчета не превышает 5—8 %.

Таким образом на основе достаточно строгой математической модели произведен расчет напряженного состояния с учетом всех факторов учитывающих геометрические соотношения полостей формы, характеристики внешнего и внутреннего трения.

Анализ этапов формирования плотности сухого песка и смесей совершенствовались методов оценки структур по характеристикам «дальнего» и «ближнего» порядка и координационным числом позволили оценить закономерности укладки зерен песка и построить диаграмму структур песка и смесей в насылок состоянии (рис 3.10).

Значение усредненного координационного числа ( $n_c = 3,12\delta_r$ ) в рыхлых смесях составляет 1—2. Это свидетельствует о наличии в рыхлой смеси ажурной структуры, объем пор которой превосходит объем занятый зернами с оболочками связующего. На рис 3.10 кривая I относится к сухим пескам, кривая 2 — к песчано-бетонитовым смесям (7 % бетонита и 4 % воды) и кривая 3 — к песчано-глинистой смеси (12 % оглеушной глины и 5 % воды). Если песок в насыщенном состоянии характеризуется координационным числом 4,5—7,1 то рыхлые смеси имеют координационное число равное 0,8—2,2. Чем выше содержание глинисто-водного связующего тем при большей плотности достигается то же самое координационное число.

Можно выделить три этапа уплотнения песчано-глинистых смесей отражающихся соответствующими участками кривых уплотнения.

1 Инкубационный этап во время которого снимаются прочно сцепленные структуры рыхлых смесей и они приобретают предельно рыхлое уплотненное состояние. Смеси с разнообразным количеством глинисто-водного связующего уплотняются в различных условиях имеют начальный общий участок кривых уплотнения

в диапазоне давлений прессования от 0 до 0,02—0,03 МПа, когда достигается плотность смеси равная примерно 1,23 г/см<sup>3</sup> с координационным числом в структуре 3,7—4,4 и вероятностью плотной упаковки 0,36—0,38. Для рыхлых сухих смесей такое координационное число и вероятность плотной упаковки являются минимально возможными. По сравнению с исходной структурой плотность на этом участке увеличивается на 0,2—0,6 г/см<sup>3</sup>.

2 Основной этап, во время которого структура смеси переходит от предварительно уплотненного состояния в начально упорядоченное с наличием дальнего порядка. Происходит окончательное заполнение зернами пор, размер которых больше диаметра зерен, и выжимание значительной части объема глинисто-водного связующего из зон контактов зерен. При достижении плотности смеси 1,35—1,62 г/см<sup>3</sup> возникает структура с координационным числом 4,7—5,7 и вероятностью плотной упаковки 0,39—0,44.

3 Завершающий этап наиболее длительный, во время которого упорядоченная структура перестраивается с увеличением плотности укладки при сохранении дальнего порядка. Происходит перегруппировка зерен песка в более компактные упаковки с ростом координационного числа от 5,7—4,7 до 7, что в пересчете на плотность смеси дает 1,7—1,8 г/см<sup>3</sup>.

Расчет зависимости плотности смеси  $\delta$  от давления прессования  $p$  для различных стадий процесса уплотнения производился на основе уравнения уплотнения  $\tau$   $e$

$$\delta = \delta_1 \frac{\Phi \left( \frac{15(A-B \lg p)}{\Phi(15/A)} \right)}{\Phi(15/A)}, \quad (3.15)$$

где  $A$ ,  $B$  — коэффициенты уплотняемости

Они определяются по следующим зависимостям

$$A = 35,5 - (\delta_1 - 1)/0,055 \quad B = (\delta_2 - \delta_1)/0,055 \lg p_2, \quad (3.16)$$

где  $\delta_1$  — плотность смеси уплотненной давлением  $p = 0,1$  МПа

$\delta_2$  — плотность смеси, уплотненной при фиксированном давлении прессования  $p_2$

Вероятность появления углов в зоне «плотной» упаковки для смеси с плотностью  $\delta$  при помощи функции Лапласа определяется соотношением

$$P = 2\Phi \left( \frac{15}{A - B \lg p} \right) \quad (3.17)$$

Функции  $\Phi(z)$  или  $2\Phi(z)$  табулированы. Крайние значения составляют  $\Phi(z) = 0$  при  $z = 0$  и  $\Phi(z) = 0,49999$  при  $z = 5$ .

Физический смысл отношений функции Лапласа в этом уравнении состоит в том, что оно показывает отношение вероятностей углов плотной упаковки полученных при уплотнении давлением прессования  $p$  и давлением  $p_1 = 0,1$  МПа. Величина  $P$  при уплот-

нения реальных смесей не превосходит 0,7—0,8. Приведенные выше ориентировочные данные о вероятности плотной упаковки на различных этапах уплотнения были получены с помощью зависимости (3.17). Для песчано-глинистых смесей различных составов  $A = 32-25$  и  $B = 2-7$ .

Уравнение (3.15) рекомендуется применять для значений давлений прессования мелких «критических» при которых начинается дробление зерен песка.

В работе [52] показано что эмпирические уравнения уплотнения, известные в теории формовки до 70 х годов, могут быть получены как частные случаи при решении системы уравнений (3.15)—(3.17). Достоверность расчетов по разработанным уравнениям была продемонстрирована для широкого диапазона составов смесей, размеров форм и давлений прессования. При этом исследовались зависимости коэффициентов  $A$  и  $B$  от состава смеси, отношения высоты опоки к наименьшему поперечному размеру отношения объема модели к объему опоки.

В 70-х годах были опубликованы обобщающие работы Г. Ф. Баладина и Г. М. Орлова по отечественному и зарубежному опыту разработки уравнений уплотнения. В связи с этим представляет интерес сопоставление уравнения (3.15) с уравнениями данных работ Баладиным предложено следующее уравнение

$$\delta/\delta_{\infty} = (\delta_1/\delta_{\infty})^c \sigma^2, \quad (3.18)$$

где  $p \approx 0,1$  МПа

$$v = \lg \frac{\lg \delta_{\infty} - \lg \delta_1}{\lg \delta_{\infty} - \lg \delta_2}$$

$\delta, \delta_1, \delta_2, \delta_{\infty}$  — плотности смеси соответственно при текущем давлении  $p$  при  $p = 0,1$  МПа при  $p = 1$  МПа и максимально возможная для данной смеси.

Необходимость вычисления трех коэффициентов уплотняемости несколько усложняет расчеты по уравнению (3.18) при преобразовании которого получаются зависимости не решаемые относительно  $\delta_{\infty}$  эту величину приходится определять графически.

Г. М. Орловым путем аналитического расчета с учетом внешнего трения смеси при уплотнении получено следующее уравнение

$$\delta = \frac{GM_0}{\lg |1 - GM_0(\delta_1 p)^B|} \quad (3.19)$$

Здесь  $G$  — масса уплотняемой смеси и — коэффициент уплотняемости;  $M_0$  — параметр, учитывающий условия внешнего трения.

Главным достоинством уравнения (3.19) является определение коэффициентов уплотняемости в условиях отсутствия внешнего трения смеси.

Сопоставление расчетных данных по уравнениям (3.15) (3.18) и (3.19) с экспериментальными данными показало что использо-

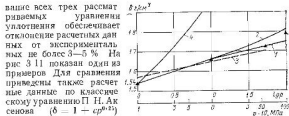


Рис. 3.11 Зависимость плотности смеси  $\delta$  от логарифма давления  $p$   
 ▲ — экспериментальные данные;  $v = 0,225$  (3.15) при  $A = 20,7$  и  $B = 2,13$ ; (3.19) при  $G = 150$  и  $M_0 = 0,075$ ; Г. М. Орловым при  $c = 0,61$

вание всех трех расматриваемых уравнений уплотнения обеспечивает отклонение расчетных данных от экспериментальных не более 3—5%. На рис. 3.11 показан один из примеров. Для сравнения приведены также расчетные данные по классическому уравнению П. Н. Аксенова ( $\delta = 1 - cp^{0.25}$ ) диапазон применения которого ограничивается давлением прессования от 0,3 до 0,5 МПа ( $c$  — коэффициент уплотняемости  $c = \delta_1 - 1$ ). Для удобства расчетов при записи всех уравнений уплотнения и определении коэффициентов уплотняемости значения давлений прессования принимались в кг/см<sup>2</sup>.

Плотность формовочной смеси определяет формирование ее важнейших свойств — модуля деформации, коэффициентов внутреннего трения, сдвигового сцепления бокового давления. Расчет напряженного состояния смеси на основе математической модели сцепно-связного тела и экспериментальные данные показали что при увеличении угла внутреннего трения уменьшается влияние внешнего трения смеси о стенку опоки что приводит к более равномерному распределению напряжений сжатия по объему формы. Это позволяет расширить диапазон сложности форм которые можно изготавливать прессованием. Увеличение угла внутреннего трения достигается либо изменением состава смеси либо увеличением ее начальной плотности перед прессованием. Второй путь значительно более эффективен. Обеспечение высокой степени предварительного уплотнения, а соответственно и значительное повышение угла внутреннего трения перед прессованием может быть достигнуто при предварительном падении. Теоретическое обоснование широких технологических возможностей несодувно-прессового метода уплотнения является одним из важнейших выводов при анализе экспериментов по определению механических свойств формовочных смесей.

Особенностью компрессионного сжатия является однозначность и постоянство коэффициента бокового давления  $\xi$ . По литературным данным значение  $\xi$  определенное при компрессионных испытаниях на стабилометре независимо от плотности смеси равно примерно 0,48.

В реальных условиях уплотнения в замкнутом объеме коэффициент бокового давления зависит от плотности смеси. В этом

случае он может рассматриваться как основная технологическая характеристика, показывающая закономерности распределения энергии уплотнения. Значение коэффициента зависит не только от свойств формовочной смеси, но и от условий ее уплотнения. Реальные условия уплотнения лучше всего характеризует статистический коэффициент бокового давления, показывающий отношение среднего значения бокового давления (вычисляется по эпюре) и давления прессования.

Методом статистической механики при использовании модели смеси как дискретного тела было получено следующее уравнение, демонстрирующее связь коэффициента бокового давления с первичными характеристиками — коэффициентами внутреннего трения  $[\operatorname{tg} \varphi]_2$  и сдвигаемого сцепления  $c_2$ :

$$\xi = 1 - \beta [\operatorname{tg} \varphi]_2 - \gamma c_2 / p \quad (3.20)$$

где  $\gamma$  и  $\beta$  — суммарные структурные коэффициенты, зависящие от степени уплотнения  $\delta$  определяемой давлением прессования  $p$ .

Величины  $[\operatorname{tg} \varphi]_2$  и  $c_2$  определяются по следующим зависимостям

$$[\operatorname{tg} \varphi]_2 = \frac{a^2 R_0 - 1}{2a\delta}, \quad c_2 = \frac{R_0}{2a\delta}, \quad (3.21)$$

где  $R_0$  — прочность на сжатие образца формовочной смеси таких геометрических размеров при которых исключается влияние гордечного трения  $a$  — постоянная, зависящая от состава формовочной смеси и условий уплотнения. Значения величин  $[\operatorname{tg} \varphi]_2$  и  $c_2$  были определены при комплексных испытаниях на одноосное сжатие и срез. На рис. 3.12 нанесены области изменения угла внутреннего трения от плотности при различных методах его определения. Тенденция изменения  $[\operatorname{tg} \varphi]_2$  от плотности сохраняется что позволяет использовать экспериментальные данные, полученные при различных методах испытания, вводя поправки, характеризующие условия уплотнения. С учетом уравнений (3.21) уравнение (3.20) было представлено в виде

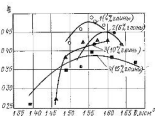
$$\xi = 1 - \beta \frac{a^2 R_0 - 1}{2a\delta} - \gamma \frac{R_0}{2a\delta} \frac{1}{p} \quad (3.22)$$

На рис. 3.13 приведено сопоставление экспериментальных данных с расчетным по уравнению (3.22). Экспериментальные значения коэффициента бокового давления для смесей с различным содержанием глины определялись при испытаниях на срез. При расчетах  $[\operatorname{tg} \varphi]_2 = 0,5 - 0,76$ ,  $c_2 = (0,02 + 0,24)10 \text{ МПа}$ ;  $R_0 = (0,08 - 0,1)10 \text{ МПа}$ ,  $a = 1,12 \pm 0,20$ . Изменение коэффициента бокового давления определяет закономерности распределения энергии деформации. Увеличение коэффициента бокового давления при данной скорости деформации указывает на преобладание



Рис. 3.12. Зависимость угла внутреннего трения  $\varphi$  от плотности смеси  $\delta$  при различных методах испытаний: 1 — на сжатие; 2 — на срез

Рис. 3.13. Зависимость коэффициента бокового давления  $\xi$  от плотности смеси  $\delta$  с различным содержанием глины:  $\circ, \triangle, \square$  — экспериментальные данные;  $\Gamma, \Delta$  — кривые по уравнению (3.22)



процесса рассеивания энергии — уменьшение коэффициента бокового давления свидетельствует о накоплении энергии деформации. Повышенные коэффициенты бокового давления при уплотнении смеси в замкнутом объеме при прессовании как правило, наблюдаются до плотности упаковки зерновой составляющей  $\delta_{\text{к.о.}} = 1,3 - 1,4 \text{ г/см}^3$ ; при больших плотностях коэффициент бокового давления начинает понижаться. Учитывая энергетические характеристики, можно утверждать, что процесс уплотнения при прессовании до достижения формовочной смеси ускоренной структуры (кубической упаковки) происходит с рассеиванием энергии деформации, при плотностях смеси для которых плотность зерновой составляющей больше  $1,4 - 1,5 \text{ г/см}^3$  уплотнение происходит с накоплением энергии деформации.

Для решения проблемы выбора рациональных режимов и определения технологических границ применения прессования в условиях автоматизации технологической подготовки производства использованы результаты расчетов пространственного напряженного состояния при различном наборе параметров, характеризующих геометрические размеры формы, состав смеси и условия трения. Учитывалась конфигурация полостей формы — барнов и геометрические критерии, характеризующие соотношение их размеров. Разновидности полостей в форме по классификации литейщиков ГДР представлены на рис. 3.14. Она определяют сложность формы с точки зрения возможности получения выгуклых элементов — болванов. В соответствующих полостях формы образуются соответственно одно-, дву- и трехсторонний болван.

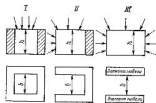


Рис. 3.14 Разнобидности вностей в форме:  
 $h$  — высота и поперечный размер вности;  
 $b$  — капиллярная пористость смеси при уплотнении

Наибольшие трудности при одинаковом геометрическом критерии  $n$  — отношении высоты  $h$  к ширине  $b$  — возникают при уплотнении форм имеющих односторонние болваны. Перетекание смеси при уплотнении было учтено при относительном сопоставлении результатов для одно-дву и трехстороннего кармана.

Была построена [28] составная сетчатая номограмма (рис. 3.15) позволяющая осуществлять выбор рациональных технологических пара-

метров в зависимости от вида и геометрических характеристик  $n$  и  $k$  кармана, коэффициента внешнего трения  $f$  давления прессования  $p$  и начальной плотности смеси  $\delta_0$ . Номограмма построена для следующих пределов изменения переменных: вид кармана — одно-дву и трехсторонний;  $n = 0-18$ ;  $k = 1-4$ ;  $f = 0.25-0.5$ ;  $p = 0.5-4$  МПа;  $\delta_0 = 1-1.5$  г/см<sup>3</sup>. Ока охватывает практически все встречающиеся случаи и является таким образом универсальной. В качестве выходного параметра номограммы была принята твердость  $T$  в единицах твердомера 071 в наиболее трудноуплотняемом месте — на дне кармана. Номограмма состоит из четырех сопряженных квадрантов. Семейство прямых с параметром «вид кармана» (правый нижний квадрант) было получено после обработки экспериментальных данных, характеризующих влияние вида кармана на приведенных (в долях  $p$ ) значениях вертикальных напряжений сжатия на дне его  $\sigma_z |_{z=0}$ . Семейство прямых с параметрами  $k$  и  $f$  (правый верхний квадрант) построено при обработке в полулогарифмических координатах  $\lg \sigma_z |_{z=0}$  данных полученных при расчете на ЭВМ пространственного напряженного состояния смеси в одностороннем кармане для различных вариантов набора параметров.

Семейство прямых с параметром  $p$  (левый верхний квадрант) получено расчетом в логарифмических координатах  $\lg \sigma_z |_{z=0} - \lg p$ . Семейство кривых с параметром  $\delta_0$  построено после обработки в координатах  $\lg \sigma_z |_{z=0} - T$  расчетных данных по уравнению уплотнения (3.15). Соединение отдельных номограмм в одну производилось путем совмещения координатных осей.

Стрелками на рис 3.15 показана последовательность решения задачи по определению  $T$  при заданных  $n, k, f, p, \delta_0$ . Номограмму можно использовать при разработке технологии для определения параметров процесса прессования: выбора метода получения углублений и модели (с помощью кармана формы или стержня)

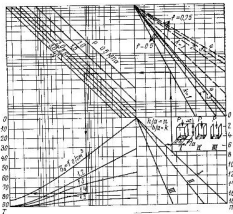


Рис. 3.15 Номограмма уплотнения

материала оснастки расчета минимально допустимых расстояний между элементами оснастки, номенклатуры отливок для изготовления с помощью имеющегося парка формовочного оборудования.

Опыт проведения расчетов по номограмме показал, что для форм со сложными моделями даже значительное повышение давления прессования до 4 МПа и выше не обеспечивает качественного уплотнения. Главными результатами проведенных исследований явились выводы подтверждающие целесообразность ограничения верхнего предела давлений прессования значениями 2—2.5 МПа, и рекомендации по выбору давлений прессования при изготовлении отливок определенной номенклатуры: для различных форм с моделями группы I давление прессования 0.5—2 МПа; для форм с моделями группы II давление прессования 1.5—2.5 МПа. Формы с моделями группы III изготовлять прессованием не рекомендуется; при этом необходимо использовать динамические и комбинированные процессы уплотнения.

Повышение эффективности процесса уплотнения прессованием осуществляется двумя методами: а) совершенствованием прессового органа формовочных машин (применение гибкой диаграммы профильной многорукавной и гидростатовой колодок и т.д.) б) применением надува в целях предварительного уплотнения смеси перед прессованием.

Конечной целью обоих методов является получение технологически необходимой степени уплотнения при пониженных давлениях прессования что значительно уменьшает брак форм и отливок.

Различные варианты дифференциального прессования позволяют управлять перетеканием смеси при уплотнении. В СССР эксплуатируется ряд автоматических линий, использующих дифференциальное прессование.

Г. М. Орловым на основе модели смеси как сыпуче связанного тела с привлечением идей статистки сыпучей среды решены близкие задачи распределения напряжений при прессовании форм профильной и многорукавной литой со сторонами лада и контроля и предложена система уравнений для расчета средних вертикальных напряжений, действующих под отдельными колодками в определенный момент времени. Совершенствованию процесса способствовали исследования по разработке математических моделей с помощью методов планирования экспериментов по оценке эффективности различных методов профилирования формы на основе геометрического моделирования по разработке методов и схем управления процессом в том числе с использованием относительного перемещения элементов оснастки и т. д.

При оценке приведенных выше исследований необходимо констатировать следующие рекомендации по верхнему пределу давлений прессования разнообразны на формовочных автоматах линий, как правило используется одновременное воздействие прессовых колодок на смесь что не позволяет в полной мере использовать технологические возможности дифференциального прессования. Очевидно что при таких режимах велика вероятность образования дефектов отливок присущих обычному прессованию под высоким давлением. Аналитические методы расчета режимов дифференциального прессования в настоящее время еще не доведены до инженерных приложений и не могут быть использованы для различных составов смесей и параметров оснастки. Практически отсутствуют экспериментальные и расчетные данные по эффективности применения и рационализации режимов в целях управления процессом перетекания смеси при уплотнении форм с моделями сложных конфигураций. В связи с этим наибольшее значение приобретает проведение исследований по определению эффективности различных программ воздействия прессовых колодок при уплотнении форм с целью снизить технологически необходимое давление прессования.

Исследования дифференциального прессования выполнены [42] применительно к изготовлению форм с моделями группы II (отливка-представитель — «звено гусеничное»).

Уплотнение форм дифференциальным прессованием осуществлялось на экспериментальном прессе, техническая характеристика которого приведена ниже.

Давление прессования, МПа	0,3—4,0
Число прессовых колодок	30
Площадь прессовой колодки см <sup>2</sup>	89,25
Ход колодки, мм	250

Расположение групп прессовых колодок по площади опоки показано на рис. 316. Применены сварные опоки размеров в свету 600×600 мм и высотой 125 и 250 мм. Высота наполнительной рамки 115—200 мм. Протитку модели производили с помощью гидроцилиндров. Уплотнение форм на дифференциальном прессе осуществлялось при различных значениях давления прессования 1, 2, 1, 5, 2, 5 МПа в 10 программах. В программах соответственно группы прессовых колодок 1, 2, 3 уплотняли смесь в последовательности: одновременно 1, 2, 3; 1 + 2 + 3; 1 + 3 — 2, 2 + 1 + 3; 2 + 3 + 1; 3 + 1 + 2; 3 + 2 + 1, (1, 2) + 3, (1, 3) + 2, (2, 3) + 1 (знак «+» обозначает последовательность воздействия групп).

Большинство экспериментов по дифференциальному прессованию было проведено с применением смеси состоящей из 90 % отработанной смеси, 8 % любесдского песка КО2А, 2 % глины и 0,2—0,3 % специального концентрата. Такой состав смеси обеспечил влажность 4—4,8 % предел прочности на сжатие в сыром состоянии 0,04—0,05 МПа, текучесть по Г. М. Орлову 85 %, газопроницаемость 120 ед.

Выбор рациональных режимов дифференциального прессования особенно важен для полуформы низа отливки «звено гусеничное» (рис. 317). Сложная конфигурация модели обуславливает наличие в полуформе тошкорельефных поверхностей 1, 2 и глубоких впадин 3, между которыми располагаются тонкие болванки 4, 5 — лимитирующие уплотнения точки. Допустимый интервал

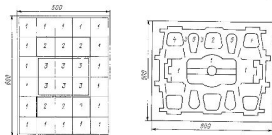


Рис. 316 Расположение групп прессовых колодок по площади опоки

Рис. 317 Конфигурация полуформы низа отливки «звено гусеничное» и расположение точек диаметра твердости смеси

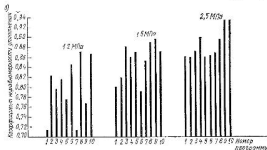
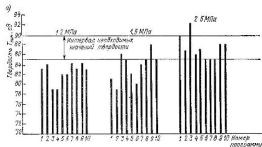


Рис. 3.18 Изменение твердости смеси в лимитирующих точках (а) и неравномерности уплотнения смеси в полужоле низа отливка (завено гусеничкой) (б)

изменения параметров следующий: разброс твердости смеси по поверхности (без учета лимитирующих точек) отпечатка не более 3—7 ед. твердость в лимитирующих точках 85—90 ед., коэффициент неравномерности уплотнения не менее 0,85. Результаты экспериментов, характеризующие изменение твердости в лимитирующих точках и неравномерности уплотнения, представлены на рис. 3.18 а и б. С учетом данных ограничений был рекомендован рациональный режим — прессование давлением 1,5 МПа при реализации программ 3 и 9. Программа 3 характеризуется следующей очередностью внедрения колодок: наружные колодки — 18 шт. внутренние (группа III) — 6 шт. и промежуточные (группа II) — 6 шт. Программа 9 позволяет одновременно внедрять наружные и внутренние колодки (группы I и III) 24 шт.

а затем группу II колодок 6 шт. Коэффициент неравномерности для выбранных программ составляет соответственно 0,88 и 0,89.

В связи с бесконечным разнообразием конфигураций группы II отливок и невозможностью их количественного описания геометрическими критериями рациональные программы воздействия колодок в каждом случае должны определяться исходя из технологических возможностей дифференциального пресса. В качестве исходной может быть предложена следующая программа (соответствует программе 9): одновременное внедрение группы колодок при смыкающих к стенкам отливки и групп исходящих над глубокими карманами формы, а затем внедрение промежуточных групп колодок.

Влияние программы воздействия колодок на распределение твердости смеси на развитых вертикальных поверхностях форм изучалось [42] при уплотнении форм «ступенчатая проба». Данная проба имитировала элементы конфигурации отливок групп I и III. Для уплотнения форм отливок группы I применение дифференциального прессования не рекомендовано, исключения могут составить лишь формы с самыми неблагоприятными геометрическими критериями уплотнения для отдельных полостей. Главная же задача экспериментов состояла в определении целесообразности использования дифференциального прессования для сложных форм отливок III группы — типа ребристых цилиндров.

Следует отметить, что различие в программах внедрения колодок мало влияет на распределение твердости на развитых вертикальных поверхностях полуформ. При определенной геометрии отливки по геометрическим критериям сложности уплотнения необходимо корректировать в основном давление прессования. Эксперименты показали, что снизить давление ниже 2—2,5 МПа при исследуемом варианте дифференциального прессования не удается. В связи с этим дальнейшая рационализация процесса путем разработки программы воздействия колодок была признана нецелесообразной.

Для уплотнения форм ребристых цилиндров перспективно использование последовательного прессования с движением отдельных элементов оснастки. В работе [30] были разработаны варианты последовательного прессования, основанные на перемещении относительно друг друга элементов оснастки в процессе прессования. Процесс дифференциального последовательного двустороннего прессования форм моделью протяжной и прессовой плиты применен для изготовления станин электродвигателей. Отмечена высокая эффективность и управляемость процесса по критериям качества форм и отливок.

#### 3.4 ПЕСКОДУВНЫЙ И ПЕСКОДУВНО-ПРЕССОВЫЙ ПРОЦЕССЫ УПЛОТНЕНИЯ

Основы пескодувного процесса заложены в трудах П. Н. Аксенова, В. Г. Ракогина, В. Л. Лесничего и др. Их главными результатами явились описание закономерностей формирования песчано-

воздушной струи в резервуаре машины и определение влияния ее кинетической энергии и сил фильтрации на плотность смеси. Приведены рекомендации [54] по конструированию резервуара, плант олок ящиков.

Сочетание пескоструйного заполнения и последующего прессования под высоким давлением значительно повышает эффективность процесса по сравнению с технологическими решениями в которых после пескоструйного заполнения применялась подпрессовка при малых давлениях. В связи с этим было рекомендовано использование давления дутья 0,4–0,6 МПа для последующего прессования до 1,5 МПа и более. Основное внимание было уделено изучению механики пескоструйного процесса применительно к ящикам, происходящим в резервуаре машины. Практически не изучено распределение плотности смеси на стадиях наддува (предварительное уплотнение) и прессования (окончательное уплотнение) применительно к формам с моделями конкретных конфигураций. Обобщенных критериев для выбора рационального соотношения давлений наддува и прессования не предложено. Осведомлено, что такие разработки особенно актуальны для выбора рациональных схем и оптимизации режимов изготовления форм с моделями сложных конфигураций.

Пескоструйно-прессовый процесс является одним из ведущих и перспективных для изготовления форм отливок типа ребристых цилиндров (группа сложности III, отливка-представитель — «станина электродвигателя»). В связи с этим его экспериментальное исследование [36–81] и выбор рациональных параметров выдвинуто в основном применительно к моделям данной группы. Очевидно, что с уменьшением сложности модели значения давлений наддува и прессования понижаются. Для демонстрации возможностей изменения параметров пескоструйно-прессового процесса разработаны также его рациональные режимы для изготовления форм с моделями группы I (отливка-представитель — «щит электродвигателя»). Учитывая диапазон изменения сложности моделей, рекомендации по выбору рациональных режимов пескоструйно-прессового процесса являются универсальными.

Надув смеси производился на пескоструйной машине по дельте 305 последующее прессование в направлении перпендикулярно к направлению наддува осуществлялось на гидравлическом прессе типа ПЛ47Б. При обработке технологических параметров процесса изготовления безопочных форм в опоках размерами 480 × 395 × 290 мм давление наддува изменялось от 0,3 до 0,6 МПа, давление прессования — от 1,2 до 2 МПа. Наддув смеси в опоку осуществлялся через отверстие длиной 175 мм и шириной 50 мм. Места расположения вент и их число было определено на основании предварительных экспериментов исходя из условия получения высокой и равномерной плотности во всех трудноуплотняемых местах. Конструкция опоки и режимы уплотнения позволяли имитировать пескоструйно-прессовый про-

Таблица 35 Составы песчано-бентонитовых смесей

№ пер. смеси	Массовое содержание, %			Свойства				
	пес. ок. А016	Бентонит	вода	Прочность на сжатие ФК 12, МПа	Натяжная вязкость, г/см <sup>2</sup>	Текучесть по I М. Орлову	Текучесть по Ш14	Индекс формования
1	100	8	2,6	0,94	1,04	76	73	91
2	100	10	3	1,80	1,05	77	76	95
3	100	12	3	2,21	1,15	82	82	98
4	100	12	3,6	1,77	0,83	60	69	67
5	100	12	4,1	1,39	0,58	55	21	33

цесс реализованный в формовочных комплексах типов АЛ2002 «Дисаматик» и т. д. Эксперименты проводились с песчано-бентонитовыми смесями, составы и свойства которых приведены в табл. 35.

Пескоструйно-прессовый процесс уплотнения рассматривался как прессование предварительно уплотненной с помощью наддува смеси. Повышение предварительной плотности  $\delta_0$  позволяет получить значение технологически необходимой конечной плотности  $\delta$  при меньших давлениях прессования, что снижает энергоёмкость процесса и обуславливает меньшую мощность прессового механизма формовочных машин.

Работу прессования  $A_0$  можно определять по формуле

$$A_0 = F \int_{\delta_0}^{\delta} \rho H \delta_0 \frac{d\delta}{\delta^2}, \quad (3.23)$$

где  $F$  — площадь опоки  $\delta_0$  и  $\delta$  — плотность смеси до и после уплотнения;  $\rho$  — сопротивление смеси уплотнению в данный момент времени (при определенной плотности смеси  $\delta$ ),  $H_0$  — высота смеси до уплотнения (соответствующая начальной плотности смеси  $\delta_0$ ). Энергоёмкость рассчитывали с помощью уравнения уплотнения (3.15). Интегральная функция Лапласа была разложена в ряд

$$\Phi(z) = \frac{1}{2} z \left( \frac{z}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ 1 - \frac{z^2}{2 \cdot 1!} \zeta + \frac{z^4}{2^2 \cdot 2! \cdot 5} - \frac{z^6}{2^3 \cdot 3! \cdot 7} \right] \quad (3.24)$$

Анализ ряда (3.24) показал, что для используемых в расчетах значений  $z$  приближенно можно считать

$$\Phi(z) = kz \quad (3.25)$$

где  $k = 0,39$  ( $\delta < 1,6$  г/см<sup>3</sup>),  $k = 0,37$  ( $\delta > 1,6$  г/см<sup>3</sup>).

Учитывая выражения (3.15) и (3.25) можно записать

$$\lg p = \frac{A}{B} - \frac{15\delta\delta_0}{B\Phi(15A)} \frac{1}{\delta} \quad (3.26)$$

Обозначая  $A/B = \alpha$  и  $15\delta\delta_0/[B\Phi(15A)] = \beta$  имеем

$$\lg p \approx \alpha - \beta/\delta \quad (3.27)$$

Принимая во внимание выражение (3.27), формулу (3.23) записываем в виде

$$A_0 = FN\delta_0 \int_{\delta_1}^{\delta} 10^{\alpha - \beta/\delta} \frac{d\delta}{\delta^2} \quad (3.28)$$

Вычисление интеграла  $\int_{\delta_1}^{\delta} \frac{d\delta}{\delta^2 10^{\beta/\delta}}$  способом подстановки дает приближенное значение  $\frac{1}{2.303} e^{2.3\beta/\delta}$

Окончательное выражение для вычисления работы прессования получаем в виде

$$A_0 = \frac{FN\delta_0}{2.3\beta} 10^{\alpha - \beta/\delta_1} \quad (3.29)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — постоянные для данных условий уплотнения

Уравнение (3.29) обеспечивает удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных при расчете энергии уплотнения для широкого диапазона давлений прессования. Для обеспечения возможности применения уравнения (3.29) для расчета энергоемкости при различных значениях плотности смеси  $\delta_0$  (обусловленных значениями давления наддува) была исследована зависимость коэффициентов уплотняемости  $A$  и  $B$  уравнения (3.15) от начальной плотности смеси (рис. 3.19). Использование этих данных в комплексе с зависимостями  $A$  и  $B$  от состава смеси (отношений высоты опилки к наименьшему поперечному размеру и объема модели к объему опилки) позволяет использовать уравнение (3.29) для широкого диапазона составов смесей и параметров оснастки. На рис. 3.20 приведена зависимость работы прессования от конечной плотности при различных начальных плотностях. Данные получены для условий, моделирующую при уплотнении формы отливки стали из электродвигателя (по значениям коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $\beta$ ). Очевидно, что для существенного снижения энергоемкости процесса окончательного прессования (давлений прессования) необходимо обеспечить значения начальной плотности (после наддува)  $\delta_0 > 1.3-1.4$  г/см<sup>3</sup>. Рациональные значения давлений наддува смеси выбирались с учетом данного ограничения. Закономерности распределения плотности смеси  $\delta_0$  изучались при наддуве смеси в опилку размерами

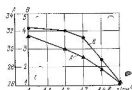


Рис. 3.19. Зависимость коэффициентов уплотняемости от начальной плотности смеси

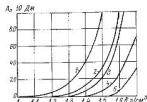


Рис. 3.20. Зависимость работы прессования  $A_0$  от конечной плотности смеси  $\delta$  при различной начальной плотности ( $\delta_0$  в г/см<sup>3</sup>): 1—1; 2—1.3; 3—1.4; 4—1.4; 5—1.5

480×290×395 мм. Для имитации полости расположенной перпендикулярно к направлению наддува на боковой стенке опилки крепились втулка диаметром 95 мм и высотой 80 мм без вент в глухом торце. Плотность смеси определялась пробоотборником в трех сеченных формы — над наддуваем отверстием сбоку от наддуваемого отверстия и в сечении втулки — в трех точках по высоте. Конфигурация и размеры оснастки и точки замера твердости смеси представлялись на рис. 3.21.

Анализ экспериментов показал, что повышение влажности смеси выше 3% с точки зрения достижения достаточно высоких плотностей смеси  $\delta_0$  явно нежелательно: изменение содержания связующего оказывает меньшее влияние на  $\delta_0$ .

Данные эксперимента с учетом предварительных исследований по параметрам заполняемости объемов и формоустойчивости при пескоструйно-прессовом уплотнении а также исходя из требования повышенной прочности смеси на сжатие позволили определить следующий рациональный состав смеси (массовое содержание, %):

Песок кварцевый	100
Битопит	10-12
Пенообразователь	0.05
Вода	2.9-3.2

Данный состав обеспечил следующий уровень свойств.

Прочность на сжатие, МПа	0.18-0.22
Начальная плотность, г/см <sup>3</sup>	1.0-1.2
Индекс формоустойчивости, %	90-98
Текучесть по Г. М. Орлову, %	75-80
Штир-надж, %	60-70
Газопроницаемость, ед.	Не менее 90

Распределение плотности смеси данного состава при различных давлениях наддува представлено на рис. 3.22

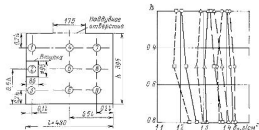


Рис. 3.21. Расположение точек измерения твердости в форме после наддува

Рис. 3.22. Распределение плотности смеси  $\delta_s$  в форме после наддува в зависимости от относительной высоты формы  $h$  при различных давлениях, МПа:  $\square$  — 0,3;  $\triangle$  — 0,45;  $\circ$  — 0,6; — — — — — сечения под наддувным отверстием — — — — — сечения от наддувного отверстия — — — — — сечения впадины

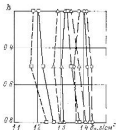
Увеличение давления наддува обуславливает как повышение плотности смеси во всех сечениях формы так и повышение коэф. фициента неравномерности уплотнения  $k = \delta_{\text{впа}} / \delta_{\text{стн}}$ , где  $\delta_{\text{впа}}$  — минимальное значение плотности смеси (внутри впадины),  $\delta_{\text{стн}}$  — максимальное значение плотности смеси (под наддувным отверстием). При значениях давлений наддува 0,3; 0,45; 0,6 МПа коэф. фициент  $k$  соответственно принимал значения 0,86; 0,91; 0,95. Для качественного уплотнения замкнутых полостей располо женных перпендикулярно к направлению наддува рекомендо вано обеспечивать давление наддува не менее 0,55—0,65 МПа причем в стенках этих полостей следует устанавливать венты для интенсификации процесса уплотнения за счет фильтрации возду шного потока.

Анализ приведенных экспериментов позволил сделать два важ ных вывода.

1 Ограничения по значению необходимой плотности смеси после наддува  $\delta_s > 1,3$ —1,4 г/см<sup>3</sup>, а также возможности уплотне ния смеси в полостях формы расположенных перпендикулярно к направлению наддува, могут быть выполнены при значениях давлений  $p_n \geq 0,55$ —0,65 МПа.

2 Предложенная смесь по составу и свойствам удовлетворяет требованиям пескоструйно-прессового процесса.

Учет необходимости снижения энергоемкости окончательной прессыонации явился первым ограничением при выборе рациональ ных режимов пескоструйно-прессового метода уплотнения. Основ ное внимание было уделено необходимости достижения техноло гически требуемой плотности (твердости) смеси в межреберных пространствах модели. Рациональные давления прессыонации ко



торы при заданном давлении надду ва могут обеспечить получение мини мальной технологически необходимой плотности смеси  $\delta_{\text{впа}}$  в межреберном болване, на поверхности разреза определялись по номограмме (см рис. 3.15). Значение  $\delta_{\text{впа}}$  принималось равным 1,55 г/см<sup>3</sup>, что соответствует примерно 80 ед. твердости по Дитерту. Замер твердости смеси при раз личных соотношениях давлений над дува и прессыонации производился для сопоставления расчетных и экс периментальных данных (рис. 3.23). При построении расчетных кривых изменения твердости смеси в трудно уплотняемом месте были использо ваны следующие данные: вид карма на — двусторонний  $\alpha = 17$ ;  $k = 2$ ,  $f = 0,5$ ;  $\delta_0 = 1,25, 1,35, 1,4$  г/см<sup>3</sup> (соответственно при двусторонних над дува 0,3; 0,45; 0,6 МПа).

При анализе расчетных и экспериментальных данных было констатировано что увеличение давления наддува при постоян ном давлении прессыонации приводит к значительному росту степени уплотнения смеси на дне межреберного пространства. Увеличение в исследуемом диапазоне давления прессыонации (при постоянном давлении наддува) обеспечивает повышение твер дости, наиболее ощутимое при низких (0,3 МПа) значениях да вления наддува. При более высоких (0,45—0,6 МПа) значениях давления наддува влияние увеличения давления прессыонации сказывается слабее.

Таким образом увеличение давления наддува, обуславливаю щее повышение начальной плотности смеси до прессыонации обес печивает возможность снижения технологически необходимых значений последующего давления прессыонации.

На основании исследований были выбраны следующие зна чения давления наддува и прессыонации для изготовления форм станин электродвигателей пескоструйно-прессовым методом.

Давление, МПа	
наддува	0,55—0,6
прессыонации	1,8—2

Данные режимы являются универсальными для изготовления форм сложных конфигураций с моделями типа ребристых цилин дров.

Исследования, проведенные для форм отливок статоров электро двигателей показали, что для изготовления форм с моделями

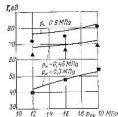


Рис. 3.23. Зависимость твер дости  $T$  смеси в наиболее трудно уплотняемом месте от давле ния прессыонации  $P_{\text{пр}}$  и надду ва  $P_n$  при изготовлении форм станин электродвигателей:

■ — экспериментальные дан ные при давлении наддува соот ветственно 0,3; 0,45; 0,6 МПа

Таблица 36 Состав и свойства смесей

№ смеси	Тип смолы	Массовое содержание, %			Свойства					
		смола	диализируемая	фуралового спирта	Вязкость по Бруксу, дин	Температура, °С, по вязкости	Жидкость, мм	Содержание, %	Плотность на давлении в 11, МПа, черн., с	
1	ОФ-1	2,6	1,4	0,8	0,2	40	25	0,5—1	1,8	15—20
	ФФ-1Ф	3	0,5	—	0,2	20	8	0—0,1	5,8	15,3
	УКС ЛФ	3	1,5	0,4	0,2	60	20	0,1—0,4	0,3	Св. 20

более простых конфигураций давления наддува могут быть снижены до 0,45—0,5 МПа а давления пресования до 0,6—0,7 МПа

Универсальность и возможность широкого применения полученных решений обеспечены: а) уравнениями уплотнения (3.15) и энергоемкости (3.29) для расчетов в широком диапазоне составов смесей и параметров оснастки, б) номограммой уплотнения (рис 3.15) которую можно использовать для расчета технологии смеси необходимого давления пресования для значений  $\delta_0 = 1,0 \div 1,5$  г/см<sup>3</sup>, что соответствует всему диапазону давлений наддува  $p_n$ , применяемому в современных установках; в) возможностью получения зависимостей  $\delta_0 = f(p_n)$  для моделей любых конфигураций (для использования номограммы в квадрате  $T - \delta_0$  при переходе от  $\delta_0$  к  $p_n$ ).

Проведенный комплекс исследований во многом способствовал решению проблемы изготовления высококачественных отливок станин электродвигателей.

Для изготовления стержней пескодувных (пескострельных) процесс уплотнения применяется в комбинации с последующими тепловыми, химическими и другими воздействиями. Особенно актуально исследование пескодувного уплотнения стержневых смесей в связи с широким распространением смесей с синтетическими смолами.

В работе [20] исследован пескострельный процесс уплотнения холоднотвердеющих смесей, разработанных на основе трех классов смол наиболее пригодных для изготовления стержней стальных и чугунных отливок: фенолформальдегидной ОФ-1, фенолформальдегидфураровой ФФ-1Ф, карбамадиформальдегидной УКС-ЛФ, смешанной с фурулоном спиртом в соотношении 1:0,7. Для смол ОФ-1 и ФФ-1Ф катализатором был принят 70 %-ный водный раствор безосульфокислоты, для УКС-Л — 50 %-ный водный раствор ортофосфорной кислоты. Составы и свойства смесей приведены в табл. 3.6.

При оптимизации составов основное внимание уделялось тем свойствам смеси, определяемым по пробе ЗИЛ

Пескострельный процесс исследовали на установке, смонтированной на базе машины модели 348. Заполнение полостей стержневых яднок смесью различной текучести изучалось с помощью кинематки камерой СКС-1М со скоростью 2000 кадров в секунду. Давление в ресивере контролировалось встроенным в машину манометром, давление в резервуаре — пьезоэлектрическим датчиком, позволяющим подучать данные об изменении давления в течение  $10^{-3}$  с. Начало истечения смеси со скоростью проточки тенты 125 м/с. Моменты начала и конца истечения смеси от металки на осциллограмме в виде двух всплесков от контактов.

Качественная картина заполнения технологической емкости изучалась при изготовлении стержней из «цветной слоистой» смеси. Для этого в гильзу машины постоянно загружались песчано-смоляная и жидкостеклянная смеси. После выстрела и отверждения смеси стержень разрезался в поперечном и продольном направлениях. Так как холоднотвердеющие смеси в отвержденном состоянии имеют разные цвета (ОФ-1 — розовый, ФФ-1Ф — темно-зеленый, черный, УКС-ЛФ — светло-зеленый) а жидкостеклянная смесь цвета не меняет (желтый), то границы слоев были отчетливо видны в разрезе.

Исследование степени уплотняемости холоднотвердеющих смесей и установление взаимосвязи между уплотняемостью и текучестью, определенной по пробе ЗИЛ проводилось при уплотнении смесей в ядике с цилиндрической полостью диаметром 50 мм и высотой 230 мм. Приготовленная смесь выдерживалась определенное время до заданного уровня текучести и свободно засыпалась в полость ядника. Ядник устанавливался на пескострельную машину и производился выстрел (смеси в гильзу машины не было). При помощи осциллографа измерялся импульс определяющий уплотняемость смеси. Номенклатура стержней была разделена на три группы по сложности:

- 1) изготовление которых не вызывает затруднения,
- 2) тонкостенные (отношение высоты к толщине стенки до 10 и более);
- 3) с затрудненным заполнением участков удаленных от оси вдувного отверстия (экспериментальный стержень представлял собой пирамиду высотой 140 мм, толдиной 40 мм с шестью ступенями расширения по направлению наддува — от 30 до 210 мм).

Качество уплотнения оценивалось распределением плотности (среднее значение и неравномерность — отношение разности максимальной и минимальной плотности к средней в продольном) и заполняемостью полости оснастки. Заполняемость оснастки оценивалась отношением высоты стержня к четким отпечаткам к расстоянию от него до оси вдувного отверстия. Определение плотности производилось взвешиванием отдельных частей отвержденных стержней. Стержни первых двух групп разрезались пер-

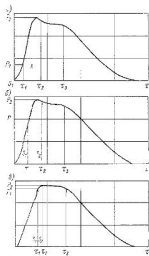


Рис. 3.24. Осциллограммы давлений воздуха в пескострельной головке при различной текучести смеси: а — 50; б — 30; в — 4

давлением  $p_0$  то импульс  $S_1$  определяет энергию затраченную на перемещение смеси из гильзы в оснастку и ее уплотнение. Применение смесей с малой текучестью сопровождается резким уменьшением импульса  $S_1$ . Текучесть смеси обуславливает скорость истечения и форму струи (рис. 3.25) с точки зрения ее компактности. При определенном значении текучести происходит распыление струи после ее выхода из дугового отверстия. Анализ стадий уплотнения смеси на основе уравнений реологии и механики грунтов позволил выделить главные факторы, обуславливающие формирование плотности смеси: масса и текучесть смеси, давление надува, геометрические параметры оснастки. Влияние факторов на численное значение и распределение плотности было оценено дисперсионным анализом. Установлена связь текучести поprobe ЗИЛ с критерием текучести, представляющим собой изменение поверхности уплотняемой смеси, под действием единичного импульса силы. Данная зависимость позволила включить текучесть

пендикулярно к оси выстрела, а третьей группы — параллельно ей.

Анализ «слоеных» стержней позволил установить границы движения смеси как твердого цилиндрического стержня. Осциллограммы давлений в пескострельной головке приведены на рис. 3.24 (индексы 1 и 2 соответствуют началу истечения смеси и окончанию заполнения оснастки). Момент начала истечения смеси и давление, при котором оно начинается при одном и том же давлении в ресивере зависят от текучести смеси. Энергия, затраченная на перемещение смеси, зависит от импульса сжатого воздуха который равен площади под кривой  $p = f(t)$ . При уменьшении текучести смеси увеличивается часть импульса  $S_1$ , расходуемая на преодоление вязких сил сопротивления при достижении предельного напряжения сдвига. Так как заполнение оснастки заканчивается при минимальном или близком к нему

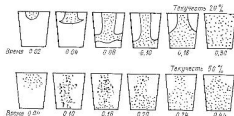


Рис. 3.25. Классика заполнения технологической емкости смесями различной текучести

в энергетический критерий учитывающий совместное влияние факторов. Предложено использовать следующий критерий:

$$K = \rho m T / \rho_0 \quad (3.30)$$

где  $\rho$  — давление сжатого воздуха в ресивере машины;  $m$  — масса смеси в гильзе;  $T$  — текучесть смеси;  $\rho_0$  — исходная объемная плотность смеси текучестью  $T$ .

Размерность предложенного критерия соответствует размерности работы (энергии)

$$[K] = \frac{ML^3 M T^2}{L^3 M} = L^2 M T^2 \quad (3.31)$$

Критерий (3.30) пропорционален работе, затрачиваемой на перемещение и уплотнение смеси объемом  $m/\rho_0$  текучестью  $T$ . Анализ данных неравномерности уплотнения (рис. 3.26) позволил выделить область оптимальной текучести. Выделена область (на рисунке заштрихована) значений в интервале от 7 до 16 кДж, где неравномерность уплотнения смеси имеет наименьшие разброс и абсолютные значения (от 12 до 16 %). Этой области критерия соответствуют значения текучести от 16 до 40 %. Вместе с тем было установлено, что колебания давлений и изменение количества смеси в гильзе в этой области практически не влияют на неравномерность уплотнения

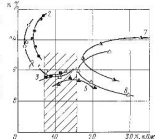


Рис. 3.26. Зависимость неравномерности уплотнения от энергетического критерия  $K$ . Текучесть смеси, %:  
1 — 5; 2 — 9; 3 — 10; 4 — 20; 5 — 30; 6 — 44; 7 — 50

При малых значениях текучести (менее 20 %) значительная доля энергии сжатого воздуха расходуется еще в гильзе машины. При этом скорость истечения смеси падает, что влечет за собой недостаточное уплотнение смеси. Увеличение текучести более 40 % приводит к разрыву струи смеси, поэтому кинетическая энергия струи падает. Несмотря на то что скорость фронта такой струи больше чем для струи с текучестью, например 40 %. Таким образом применение смесей с текучестью от 20 до 40 % обеспечивает оптимальные условия для истечения и уплотнения.

### 3.5 ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ УПЛОТНЕНИЯ

Динамические процессы уплотнения позволяют интенсифицировать формовку. Идея их применения основана на возможности достижения технологически необходимой степени уплотнения при пониженных давлениях прессования за счет наложения на формовочную смесь динамических воздействий, приводящих к повышению ее текучести. Итенисивные исследования направлены на создание эффективных машин динамического уплотнения, проводились в СССР с 60-х годов с начала конструирования ВПИ-литрониом вибропрессовых и виброударно-прессовых машин с высокочастотной вибрацией (рис 3.27).

При вибропрессовании опока со смесью совершает гармонические колебания при виброударно-прессовом методе появляются дополнительные ударные нагрузки обусловленные введением ограничителей. Для вибропрессования были предложены следующие режимы: частота колебаний 110 Гц; амплитуда 0,75 мм; давление прессования 0,2 МПа; продолжительность вибрации около 10 с. Для виброударно-прессового метода предложены следующие режимы: максимальное действующее линейное ускорения вибрации 30g; давление прессования 0,2—0,5 МПа; время уплотнения 5—10 с.

Совершенствование конструкций встряхивающих машин (ВМ) при помощи машин с амортизацией ударов (ВМА) обладающих повышенной удельной мощностью привело к созданию современных прессово-встряхивающих машин (ПВМА). Разработкой конструкций таких машин в СССР занимается ВНИИ литмаш НИИТавтопром,

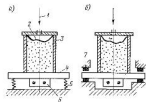


Рис. 3.27. Схемы методов вибропрессования (а) и виброударно-прессового (б).  
 1 - подача сжатого воздуха (давление 0,6—0,8 МПа); 2 - гильза деформации; 3 - опока; 4 - стержень; 5 - амортизатор-рас; 6 - вибраторы; 7 - ограничитель.

Таблица 37. Параметры машин динамического уплотнения

Параметр	ВМ	ВМА	ПВМА
Частота ударов встряхивающего стола, кГц	100—300	600—1140	300—960
Ход, мм: встряхивающего стола; бойла-амортизатора	200—100 —	2—4 3—25	— 6—24

Примечание. Данные для ПВМА приведены для режима одностороннего встряхивания и прессования.

МАМИ МВТУ им. Баумана. В табл. 3.7 приведены примерные диапазоны параметров машин.

Машины реализуют широкие программы уплотнения (различные варианты сочетания высокочастотного встряхивания и прессования). В отличие от традиционных встряхивающих машин с подпрессовкой современные ПВМА имеют механизм прессования (часто дифференциального типа), обеспечивающий давление до 2,5 МПа. Для ряда машин характерна малая мощность встряхивающих механизмов вследствие чего при работе в режиме одно-временного встряхивания с прессованием преобладающее значение для уплотнения смеси имеет прессование. Опыт эксплуатации таких машин в СССР и за рубежом показал, что дальнейшее их распространение ограничивается сложностью конструкции прессово-встряхивающих механизмов и высокой стоимостью. Важное значение в связи с этим имеет решение проблемы создания высокоэффективных экономических схем уплотнения и соответствующего оборудования на базе обычных встряхивающих машин широко распространенных в литейных цехах СССР.

Основные достижения в области теории процессов динамического уплотнения:

1. Разработка системы уравнений движения формовочной смеси при ударном нагружении встряхивающей, встряхивающей с одновременным прессованием вибропрессования и виброударно-прессовом методе.
2. Формулировка положений о различных фазах и соотношениях действия статических и динамических нагрузок на основе различных моделей и качественных представлений.
3. Введение понятий о динамическом модуле упругости эффективных коэффициентах внутреннего и внешнего трения и также пороге текучести для объяснения характера формирования и распределения плотности смеси в форме.

Однако ни одна из разработок этих направлений не была доведена до главного инженерного приложения — общего уравнения

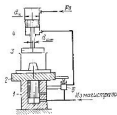


Рис. 3.28 Установка для уплотнения форм встряхиванием с одновременным прессованием

тивного уплотнения при применении прессового механизма малой мощности (пневмопривод); в) необходимость создания схемы воздушораспределения обеспечивающей рациональный цикл работы машин

Установка (рис 3.28) для реализации метода уплотнения состоит из станины 1, встряхивающего стола 2 прессовой плиты 3, закрепленной на штоке поршня цилиндра 4. В верхнюю полость цилиндра 4 постоянно подается воздух под определенным давлением, под действием которого прессовая плита 3 прижимается к смеси в опокс. Нижняя полость цилиндра 4 через клапан 5 может соединяться либо с магистралью сжатого воздуха при ходе встряхивающего стола вверх, либо с атмосферой при падении встряхивающего стола. Клапан 5 управляется автоматически от встряхивающего стола 2. При ходе встряхивающего стола вверх клапан 5 за счет разности давлений воздуха в сети и верхней части цилиндра 4 разгружает встряхивающий механизм от массы прессующих частей. При ходе встряхивающего стола вниз давление воздуха в верхней части цилиндра 4 увеличивает скорость его падения. Такое конструктивное решение позволяет регулировать скорость падения системы прессовая плита — смесь — встряхивающий стол а также использовать для уплотнения обычные встряхивающие столы. Был создан специальный стенд на базе ВМ модели 271. Основными параметрами работы установки, определяющими интенсивность и продолжительность действия статических и динамических уплотняющих нагрузок, являются  $q$  — давление подвижных прессующих частей;  $p_0$  — давление воздуха в прессовом цилиндре  $n_0$  — число ударов стола при заданной высоте его подъема

Параметр  $p_0$  целесообразно использовать в критериальной форме

$$N = p_0 F_{ц} G_{л} \quad (3.32)$$

уплотнения для расчета плотности смеси в зависимости от уплотняющих динамических воздействий и определения рациональных режимов процесса

Для интенсификации работы обычных ВМ был разработан эффективный метод уплотнения смеси встряхиванием с одновременным прессованием. Предложенные схема и установка обеспечивают выполнение следующих ограничений: а) возможность использования обычных машин низкочастотного встряхивания (число ударов в минуту до 200—300); б) необходимость обеспечения эффективного уплотнения при применении прессового механизма малой мощности (пневмопривод); в) необходимость создания схемы воздушораспределения обеспечивающей рациональный цикл работы машин

где  $F_{ц}$  — площадь поршня прессового пневмоцилиндра,  $\sigma_0$  — суммарная масса подвижных частей (встряхивающего стола, опоксы, смеси и прессовой колодки)

На уплотняемость смеси при различных видах вибродинамического нагружения решающее влияние оказывают линейные ускорения частиц смеси. Значения линейных ускорений, возникающих при уплотнении вибропрессованием определяются расчетным путем, а при уплотнении виброударным прессованием и встряхиванием с одновременным прессованием — на специально разработанных установках. Схема системы измерения для встряхивания с одновременным прессованием показана на рис 3.29. Измерительный преобразователь линейных ускорений 3 вырабатывает электрический сигнал, пропорциональный ускорению. Транзисторный согласующий усилитель 4 усиливает сигнал измерительного преобразователя по мощности. Переносный источник напряжений 5 обеспечивает калибровку каналов усиления вертикального отклонения осциллографа 6 непосредственно после окончания измеремого ударного процесса. В экспериментах измерительные преобразователи монтировали на верхней плоскости прессовой плиты 2 и встряхивающего стола 1. Общий диапазон ускорений плиты составил 68—295 g при длительности удара  $(1,3-2,4) \cdot 10^{-2}$  с, общий диапазон ускорений стола составил 230—785 g при длительности удара  $(0,3-0,7) \cdot 10^{-2}$  с.

Применительно к вибропрессованию и виброударно-прессовому методу интенсификация уплотняемость смеси определяется не абсолютными значениями частот и амплитуд колебаний, а их отношениями, при которых наблюдаются максимумы плотности и текучести. При амплитудах 1; 3; 2; 1; 3; 3,8 мм эти максимумы наблюдались при частотах 4250, 3250, 2750, 2400 колебаний в минуту. Каждому из этих режимов соответствовали линейные ускорения 28—31 g.

При исследовании процесса встряхивания с одновременным прессованием значительное увеличение уплотняемости смеси наблюдалось при увеличении давления воздуха в верхней полости прессового цилиндра — фактора оказывающего основное влияние на численное значение ударных ускорений. Ускорения оказывают разуплотняющее воздействие на контактную связь между частицами смеси, так как обуславливают появление сил инерции выходящих внешними по отношению к межчастичным контактным связям. При рассмотрении действия вибрирующих систем можно выделить участки, на которых возникающие линейные ускорения (инерционные силы) либо не изменяются по направлению

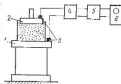


Рис. 3.29. Схема системы измерения линейных ускорений

закону и участки характеризующиеся мгновенным скачком линейных ускорений при ударе вибрирующей системы об ограничитель. Поэтому рассматривая действие вибродинамических нагрузок на формовочную смесь целесообразно учитывать только максимальные значения линейных ускорений (инерционных сил).

Процесс разрушения первоначальных когезионных связей структурных составляющих формовочной смеси определяется не только действующими инерционными силами, но и временем их действия или скоростью изменений направления действия этих сил. Так как инерционные силы способствуют не только разрушению структуры, но и созданию новой, то время действия их находится в прямой зависимости от периода релаксации новых когезионных связей.

При линейных ускорениях смешивания некоторого «порогового» значения интенсивного разрушения смеси не происходит. При ускорениях больших порогового наступает разрушение смеси и при приложении соответствующей нагрузки (давления прессования и т. д.) наблюдается интенсивный рост ее плотности. При значениях линейных ускорений выше «критического» дальнейшего роста плотности смеси не происходит. Применительно к вибропрессованию и виброударному прессованию можно отметить, что при увеличении частоты и амплитуды процесса линейные ускорения и инерционные силы возрастают, но одновременно уменьшается время действия их максимальных (амплитудных) значений на структурные составляющие формовочной смеси. Таким образом интенсивная уплотняемость определяется оптимальным импульсом ускорения.

Применительно к вышеизложенному как для вибропрессования так и для виброударного прессования значения ускорений (30—35) g следует считать критическими. При вибропрессовании эти значения ускорений достигаются за счет повышенной частоты колебаний, а при виброударном прессовании — за счет соударений основания вибрирующей системы с ограничителем. Пороговые значения ускорений в значительной мере зависят от прочности первоначальных когезионных связей формовочной смеси, которые, в свою очередь зависят от приложенной статической нагрузки.

При вибродинамических нагрузках приложение высокого давления прессования (вибропрессование виброударное прессование) в большой массе пресовой плиты (встрихивание с одновременным прессованием) нежелательно ввиду пресвалирующего влияния этих факторов на мощность привода вибрирующей системы. В то же время для лучшей уплотняемости смеси значение этих факторов следует повышать. Таким образом приходится решать комплексную задачу.

Методика замера линейных ускорений непосредственно внутри дисперсных систем типа смесей порошков в настоящее время еще не создана. В связи с этим за ускорения, сообщаемые смесью, ус-

ловно принимались ускорения отдельных частей оснастки, для сопоставимости результатов при различных видах вибродинамических нагрузок ускорения характеризовались относительными значениями (отношение текущих значений линейных ускорений к пороговым и критическим).

За основу детерминированной математической модели процесса была принята модель формовочной смеси как дисперсного статистически неоднородного тела. Использовались также наиболее общий вероятностно-статистический подход к вопросам уплотнения дисперсных сред. Были сформулированы нижеприведенные допущения.

1. При одновременном действии статической и вибродинамической нагрузок возможен три стадии процесса уплотнения. На первой стадии структура смеси формируется в основном за счет статической нагрузки влияние вибродинамических воздействий на эффект уплотнения невелико. На второй стадии процесса интенсивность воздействия вибродинамических нагрузок резко повышается наступает разрушение смеси, сопровождающееся в дальнейшем интенсивным ростом ее плотности. На третьей стадии при достижении определенной максимальной интенсивности вибродинамических воздействий процесс приходит в равновесное состояние и дальнейшего уплотнения смеси не происходит.

2. Основным фактором уплотнения смеси является линейное ускорение сообщаемое смесью при вибродинамических воздействиях.

3. Процессы разрушения смеси и формирования плотной структуры сопровождаются разрушением связей между частицами и конгломератами соответствующих первоначальной статической нагрузке и менее плотной упаковке скелета смеси а также образованием новых связей между частицами и конгломератами смеси соответствующих более плотной упаковке.

4. Кинетика процесса уплотнения определяется зависимостью между приращением плотности смеси и приращением вибродинамических линейных ускорений а также скоростью изменения плотности смеси. При математическом описании процесса получена следующая система уравнений:

$$\frac{\delta \delta}{\delta t} = A(\delta - \delta_{ст}) - \frac{\delta \delta}{\delta t} = B(\delta_{текущ} - \delta) \quad (3.33)$$

где  $\delta$ ,  $\delta_{ст}$ ,  $\delta_{текущ}$  — соответственно плотности смеси текущая, к моменту начала интенсивных вибродинамических воздействий и предельная.

Прежде чем приступить к решению системы уравнения (3.33) в частных производных, следует отметить что для выполнения условия совместности необходимо соблюдать соотношения

$$\delta_{текущ} = \delta_{ст} - F(K_{уст}), \quad (3.34)$$

где  $\Psi(K_{\text{упл}})$  — функция ресурса уплотнения  $K_{\text{упл}}$ , зависящего от типа смеси и параметров оснастки, но не зависящего от величин  $y$  и  $t$ .

Рассматривать систему уравнений (3.33) в явном виде отклонение текущего значения  $\delta$  оценивается в зависимости от  $y$  и  $t$  только от одного параметра  $\delta_{\text{ст}}$  или  $\delta_{\text{прек}}$  непоследовательно, так как это противоречит сформулированным выше основам механики уплотнения. Кроме того, необходимо иметь в виду что в исходных соотношениях не введено никаких ограничений на взаимную обусловленность параметров  $y$  и  $t$ . Это позволяет математически строго получить уравнение выходящее общую тенденцию зависимости  $\delta$  от  $y$  и  $t$ . На основе исходной системы уравнений можно записать

$$\frac{\delta \delta}{A(\delta - \delta_{\text{ст}})} = dy \quad (1/A) \ln(\delta - \delta_{\text{ст}}) = y + \ln \Psi(t), \quad (3.35)$$

где  $\ln \Psi(t)$  — функция, играющая роль постоянной интегрирования.

После преобразований можно получить следующее соотношение

$$\delta = \delta_{\text{ст}} - [e^{\Psi(t)}]^A \quad (3.36)$$

Продифференцируем данное уравнение

$$\frac{d\delta}{dt} = A [e^{\Psi(t)}]^{A-1} e^{\Psi(t)} \dot{\Psi} \quad (3.37)$$

С учетом второго уравнения исходной системы можно записать

$$A [e^{\Psi(t)}]^{A-1} e^{\Psi(t)} \dot{\Psi} - B(\delta_{\text{прек}} - \delta_{\text{ст}} - [e^{\Psi(t)}]^A) \quad (3.38)$$

После преобразования получим уравнение типа Бернулли

$$\dot{\Psi}'(t) + \frac{B}{A} \Psi(t) = \frac{B(\delta_{\text{прек}} - \delta_{\text{ст}})}{Ae^{A\Psi}} \frac{1}{\Psi^{A-1}(t)} \quad (3.39)$$

В дальнейшей записи параметр  $t$  обозначим. Преобразованием (3.39) производится при подстановке  $\Psi^A = z$

$$\left. \begin{aligned} \dot{z} \Psi^{A-1} + \frac{B}{A} \Psi^A = \frac{B(\delta_{\text{прек}} - \delta_{\text{ст}})}{Ae^{A\Psi}}, \quad A \Psi^{A-1} \dot{\Psi}' = z', \\ \frac{z}{A} + \frac{B}{A} z = \frac{B(\delta_{\text{прек}} - \delta_{\text{ст}})}{Ae^{A\Psi}} \end{aligned} \right\} \quad (3.40)$$

Используя традиционную подстановку  $z = w$  и учитывая  $v = e^{-\int B dt} = e^{-Bt}$  как решение линейного однородного уравнения  $v' + Bv = 0$ , после преобразований получим

$$w' e^{-Bt} = \frac{B(\delta_{\text{прек}} - \delta_{\text{ст}})}{e^{A\Psi}} \quad (3.41)$$

Интегрируя (3.41) и учитывая  $z = w$  и  $\Psi^A = z$ , после преобразований получим

$$\Psi = \sqrt[A]{\frac{\delta_{\text{прек}} - \delta_{\text{ст}}}{e^{A\Psi}} - C e^{-Bt}} \quad (3.42)$$

С помощью уравнений (3.36) и (3.42) можно записать конечное решение

$$\delta = \delta_{\text{ст}} - e^{A\Psi} \Psi(K_{\text{упл}}) + C e^{-A\Psi - Bt} \quad (3.43)$$

Дальнейшее преобразование уравнения (3.43) было произведено на основе введения критерияльных значений  $K(y)$  и  $K(t)$ . Окончательное уравнение было получено в виде

$$\delta = \delta_{\text{ст}} + K_{\text{упл}} [1 - e^{-K(y)}] [1 - e^{-K(t)}], \quad (3.44)$$

где  $K_{\text{упл}} = \delta_{\text{прек}} - \delta_{\text{ст}}$ ,  $K(y)$  и  $K(t)$  — критерии, зависящие от линейных ускорений и времени.

Критерии  $K(y)$  и  $K(t)$  при соответствующих граничных условиях определяются по следующим зависимостям

$$K(y) = C \left( \frac{y - y_{\text{п}}}{y_{\text{кр}} - y} \right), \quad K(t) = d \left( \frac{t - t_{\text{п}}}{t_{\text{кр}} - t} \right), \quad (3.45)$$

где  $y$ ,  $y_{\text{п}}$ ,  $y_{\text{кр}}$  — соответственно значения текущих, пороговых и критических ускорений;  $t$ ,  $t_{\text{п}}$ ,  $t_{\text{кр}}$  — соответственно значения текущего, порогового и критического времени с  $d$  — коэффициент пропорциональности.

Критерии  $K(y)$  и  $K(t)$  характеризуют кинетику нарастания плотности смеси при вибродинамических воздействиях, т.е. эффективность использования ресурса уплотнения  $K_{\text{упл}}$ . При  $y = 0$   $t = 0$ ,  $y = y_{\text{п}}$  и  $t = t_{\text{п}}$  имеем  $\delta = \delta_{\text{ст}}$ . При  $y \rightarrow y_{\text{кр}}$  и  $t \rightarrow t_{\text{кр}}$  имеем  $[1 - e^{-K(y)}] \rightarrow 1$  и  $[1 - e^{-K(t)}] \rightarrow 1$ .

Фактор времени влияет как на величину  $[1 - e^{-K(t)}]$ , так и на величину  $[1 - e^{-K(y)}]$ . С одной стороны, текущему, пороговому и критическому значениям времени соответствуют одноименные линейные ускорения. От их абсолютных и относительных значений зависит величина  $[1 - e^{-K(t)}]$ , которая является определяющей для плотности смеси  $\delta$  в данный момент времени. С другой стороны, время действия вибродинамических воздействий определенной интенсивности также влияет на величину  $\delta$ . Однако в интервале  $t_{\text{п}} - t_{\text{кр}}$  влияние  $t$  слабее, чем  $y$ . Для ориентировочных расчетов величина  $[1 - e^{-K(t)}]$  может быть принята равной 1.

При динамических методах процесс уплотнения идет с непрерывным рассеиванием энергии деформации. Это положение может быть доказано анализом зависимости коэффициента бокового давления  $\xi$  от плотности смеси  $\delta$  при различных методах ее уплотнения (рис. 3.30). Повышение коэффициента бокового давления при уплотнении смеси в замкнутом объеме при прессовании как правило, наблюдается до плотности упаковки зерновой составляющей.

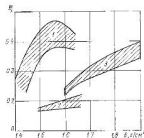


Рис. 3.30. Зависимость коэффициента бокового давления  $\xi$  от плотности смеси  $\delta$ : 1 — прессование; 2 — встряхивание с одновременным прессованием; 3 — вибропрессование.

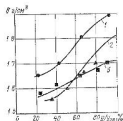


Рис. 3.31. Зависимость плотности смеси  $\delta$  от относительных ускорения  $u/u_{gr}$ : 1 — вибропрессование; 2 — виброударное прессование; 3 — встряхивание с одновременным прессованием.

щей 1,3—1,4 г/см<sup>3</sup>, при больших плотностях коэффициент бокового давления начинает снижаться (максимум коэффициента приходится на значения давлений в интервале 1,5—2,5 МПа).

Таким образом, процесс уплотнения при прессовании до достижения формовочной смеси упорядоченной структуры (кубической упаковки) происходит с рассеиванием энергии деформации, при больших плотностях уплотнение происходит с накоплением энергии деформации. При динамических методах уплотнения (вибропрессование, встряхивание с одновременным прессованием) происходит мощное увеличение коэффициента бокового давления, что обуславливает непрерывное рассеивание энергии деформации и снижение остаточных напряжений по сравнению с прессованием.

На рис. 3.31 приведена зависимость плотности смеси от относительных линейных ускорений для различных процессов уплотнения. Параметры, необходимые для расчета представлены в табл. 3.8.

Различие величин  $\delta$  и  $u$  для рассматриваемых методов уплотнения объясняется их различной эффективностью. Для сопоставления результатов значения  $u$  даны в процентах от  $u_{gr}$ . Величина  $\Pi = e^{-k(t)}$  для всех случаев принималась равной 1. Это допущение тем правдоподобнее, чем ближе параметры вибродинамических колебаний к диапазону частот порядка 5000—6000 колебаний в минуту. При меньших частотах влияние времени действия уплотняющих воздействий (величины  $\{1 - e^{-k(t)}\}$ ) сказывается сильнее.

Таблица 3.8. Параметры динамического уплотнения

Вид уплотнения	$\delta_{ст}$	$\delta_{эфф}$	$u_{п-г}$ , г	$u_{уд-г}$ , г	$\alpha$ , д	$t_{п}$	$t_{уд}$
	г/см <sup>3</sup>						
Вибропрессование	1,65	1,9	8	35	0,6	5	20
Виброударно-сростовой метод	1,55	1,8	12	35	0,6	5	25
Встряхивание с одновременным прессованием	1,55	1,7	20	270	0,7	10	30

Экспериментальные данные о характере изменения параметров линейных ускорений при уплотнении встряхиванием и одновременным прессованием представлены на рис. 3.32. Можно констатировать, что импульс ускорений во время процесса изменяется мало. Это позволило рассмотреть процесс встряхивания с одно временным прессованием как динамическое ударное прессование. При этом вводится допущение:

1. Эффект влияния скорости деформации оценивается зависимо

$$\frac{P_{эф}}{P_{ст}} = e^{-\alpha v} \quad (3.46)$$

где  $P_{эф}$  и  $P_{ст}$  — соответственно «эффективное» и «статическое» ( $v \rightarrow 0$ ) давления прессования,  $v$  — скорость деформации,  $\alpha$  — эмпирический коэффициент, зависящий от  $v$ . Уравнение (3.46) аналитически получено при интегрировании уравнения, характеризующего формовочную смесь как статистически неоднородное упругоэластическое тело. Характер изменения приращений эффективного усилия прессования представлен на рис. 3.33.

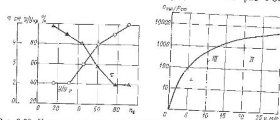


Рис. 3.32. Изменение параметров линейных ускорений при уплотнении встряхиванием с одновременным прессованием.

Рис. 3.33. Изменение эффективности прессования с увеличением скорости деформации.

I — ударное прессование; II — виброударное (ударное) прессование; III — волновое действие ударного и амплитудного прессования.

2 Общая деформация смеси в интервале плотностей  $\delta_{\text{сж}} - \delta_{\text{ар}}$  рассматривается как сумма деформаций при последовательных ударах динамического ударного прессования  $n_0$ . Начало интенсивного использования ресурса уплотнения относится к десятому и последующим  $n_0 \geq 10$  ударам. При этом величина  $y/y_{\text{пр}} \approx 0,4$ .

3 Между деформациями при последовательных ударах  $n_0$  ( $n_0 \geq 10$ ) имеется полулогарифмическая связь. Такая гипотеза широко используется в динамике грунтов.

Сформулированные выше допущения позволили получить волю эмпирические зависимости для расчета процесса уплотнения встраивания с одновременным прессованием в зависимости от конструкторских параметров формовочных машин.

Первым этапом расчета является определение внутреннего диаметра прессового цилиндра  $d_{\text{вн}}$  из условий разгрузки встраивающего стола при его ходе вверх и получения рациональных значений параметра  $N$ . Диаметр следует определять по следующему уравнению

$$d_{\text{вн}} \geq \sqrt{\frac{4(NG_{\text{г}} + \sigma S_{\text{от}} + \frac{\pi}{4} d_{\text{мт}}^2 p_{\text{в}})}{\pi p_0}} \quad (3.47)$$

где  $G_{\text{от}}$  — максимальная площадь опояки в свету,  $d_{\text{мт}}$  — диаметр штока ( $d_{\text{мт}} \geq 40$  мм);  $p_{\text{в}}$  — давление воздуха в сети.

На втором этапе устанавливаются зависимости между деформациями (плотностями смеси) и параметрами машины. Предложена следующая система уравнений для расчета

$$\left. \begin{aligned} \frac{\delta_{\text{сж}}}{\delta_0} \left(1 - \frac{\delta_0}{\delta}\right) &= \left(1 - \frac{\delta_{\text{от}}}{\delta_{\text{н10}}}\right) [1 + k \lg(n_0 - 10)] \\ \delta_{\text{н10}} &= \frac{\beta}{\sigma - \lg\left(q + \frac{\pi}{4} p_{\text{в}} \frac{d_{\text{вн}}^2}{S_{\text{от}}}\right)^{\alpha}}, \quad 10 \leq n_0 \leq (80 - 90), \end{aligned} \right\} \quad (3.48)$$

где  $\delta_0$  — насыщенная плотность смеси,  $\delta_{\text{н10}}$  — плотность смеси после действия «первого» удара динамического прессования,  $\alpha$ ,  $\beta$  — коэффициенты интенсивности уплотнения, определяемые по зависимостям (3.27) при прессовании;  $k$  — коэффициент интенсивности накопления деформаций.

Расчеты параметров установки встраивания с одновременным прессованием были проведены при следующих значениях величин, входящих в уравнения (3.47) и (3.48):  $d_{\text{вн}} = 125$  мм,  $S_{\text{от}} = 390$  см<sup>2</sup>;  $p_{\text{в}} = 0,22$  МПа,  $q = 0,01$  МПа,  $\delta_0 = 1$  г/см<sup>3</sup>;  $\delta_{\text{от}} = 1,55$  г/см<sup>3</sup>,  $\delta_{\text{н10}} = 1,61$  г/см<sup>3</sup> (рассчитано при  $\alpha = 5,8$ ;  $\beta = 8$ ).

Диапазон скоростей деформации 1—3 м/с (по данным рис. 3.33) в зависимости от времени действия ударных ускорений. В расчете  $\alpha = 1,5$  м/с и  $\alpha = 1,94 \cdot 10^{10}$ . Задаваясь технологическими необходимой средней плотностью смеси ( $\delta = 1,65 \pm 1,7$  г/см<sup>3</sup>),

получили необходимость увеличения числа ударов  $n_0$  до  $n_0 = 40 \div 50$  и выше. Значения параметра  $N$  для получения интенсивных уплотняющих нагрузок рекомендуется принимать с ограничением  $N \geq 0,7 \div 0,8$  (это соответствует  $p_{\text{в}} = 0,2 \div 0,25$  МПа).

Дальнейшая корректировка параметров встраивания с одновременным прессованием была проведена с применением полного факторного эксперимента типа 2<sup>n</sup> при трех сериях опытов. На два фактора размерами  $300 \times 300 \times 400$  мм устанавливались две гильзы диаметром 50 мм и высотой 50 мм. Одна из гильз предназначалась для получения образца для определения сырой прочности на сжатие, другая (с выдвигом) — для определения текучести смеси по Г. М. Орлову. Плотность смеси определялась пробой борнником сферидальной конструкции.

Данная серия экспериментов выполнялась с применением песчано-бентонитовой смеси влажностью 3,5 % текучестью по Г. М. Орлову 55—60 %, прочностью на сжатие 0,04—0,045 МПа,  $p_{\text{в}} = 0,05 \div 0,35$  МПа,  $n_0 = 20 \div 40$  ударов,  $q = 0,007 \div 0,013$  МПа. Значения  $n_0$  ниже устанавливаемого предела 40—50 были выбраны из условия определения технологических возможностей метода при исключении вероятности расслоения смеси при уплотнении, опасность которых по данным многих исследователей наступает при числе ударов  $n_0 > 40 \div 50$ . В качестве выходных параметров были выбраны значение плотности смеси у прессовой колодки  $\delta_1$ , в середине формы  $\delta_2$ , у подложной плиты  $\delta_3$ , текучесть смеси по Г. М. Орлову  $\theta$  и прочность на сжатие в сыром состоянии  $\sigma$ . Область рациональных режимов рассчитывалась при  $q = 0,1$  и ограничениях  $\delta_1 \geq 1,6$ ,  $\delta_2 \geq 1,55$ ,  $\delta_3 \geq 1,55$ ,  $\theta \geq 58$  %;  $\sigma \geq 0,4$ . Ограничения параметров обуславливают высокую равномерность уплотнения при некотором снижении требований по средней плотности смеси. Номограммы для выбора рациональных параметров процесса представлены на рис. 3.34. Очевидно что в достаточно широком диапазоне параметров можно обеспечить жесткие требования по значениям плотности смеси и равномерности ее распределения.

В результате исследований кинетики роста ударных ускорений, рас пределов напряжений плотности смеси, вх связи с конструктивными характеристиками исследуемой установки можно предложить следующие значения рациональных параметров процесса:  $q = 0,01$  МПа,  $N \geq 0,7 \div 0,8$ ,  $p_{\text{в}} = 0,2 \div 0,25$  МПа,  $n_0 = 40 \div 50$ .

Интерес к разработке новых конструкций современных ВМ за последние годы практически не снижается. Как отмечено в работе [23], новы

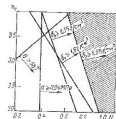


Рис. 3.34 Номограмма для выбора режимов встраивания с одновременным прессованием

шение качества и расширение диапазона изготавливаемых на ВМ форм достигается изменением массы ударника рациональными демпфированием удара, применением дополнительных пружинок и пневмоцилиндров. Решается задача создания конструкций, в которых за счет изменения подводимой энергии массы ударника и жесткости удара, можно менять форму и параметры ударного импульса в соответствии с напряжением деформированным состоянием уплотняемой смеси, а максимальные динамические нагрузки создающие наибольший шум реализуются только в конце встряхивания.

По мнению специалистов [66] большие перспективы имеют различные варианты импульсного метода уплотнения разработанного в СССР в начале 60-х годов. При этом методе смесь уплотняется под воздействием потока сжатого воздуха (воздушно-импульсный метод) или газа, образующегося при быстром сгорании или взрыве газовых смесей или взрывчатых веществ (взрывное уплотнение). В первых воздушно-импульсных установках давление воздуха в ресивере составляло 15—20 МПа. Основные преимущества метода: высокая производительность отсутствие шума в том числе и при взрывном уплотнении равномерная и высокая плотность смеси у модели возможность уплотнения узких болванок возможность применения деревянных моделей низкий расход энергии (почти как при прессовании). Равновидностью метода является импульсно-прессовый процесс, при котором предварительное уплотнение производится сжатым воздухом низкого давления (давление в ресивере 0,6—0,7 МПа) а окончательное уплотнение — прессованием при 0,5—0,7 МПа. По-видимому возможны два направления развития метода: воздушно-импульсное уплотнение с давлением воздуха в ресивере 7—10 МПа (и, возможно, взрывное) для получения крупных опочных форм и импульсно-прессовое уплотнение при низком давлении воздуха для средних (и, возможно, мелких) форм. За рубежом из рассмотренных вариантов предпочтение отдается взрывному уплотнению.

При составлении импульсных методов проведенном в работе [55] отмечено что при импульсной формовке в период уплотнения происходит значительная потеря давления воздуха на деформированной плите рассекателя и во воздушном отверстии перепускающем сжатый воздух из импульсной головки через плиту рассекателя.

При газовой формовке используются различные горючие газы (пропан-бутановые смеси метан, ацетилен и др.) в смеси с воздухом или кислородом. Оптимальной является смесь состоящая из метана и сжатого воздуха. В отличие от процесса воздушно-импульсной формовки в камере сгорания при взрывной формовке отсутствует рассекатель и перепускной клапан. Расчеты пока свидетельствуют что стоимость воздушно-импульсной формовки в 4—5 раз больше газовой.

Для замены ВМ предложено [60 61] использовать процесс высокоскоростного прессования Уплотнение смеси в этом процессе производится прессовой плитой, имеющей скорость 6—8 м/с с энергией 40—60 Дж/кг смеси. Процесс пригоден и для уплотнения безопочных форм, в том числе из жидкостекляных и коллоидотвердеющих смесей. При оценке этого процесса следует иметь в виду, что процесс протекания смеси на модельной области в околомодельную затрубную и менее интенсивен чем при импульсном уплотнении поэтому в случае высоких моделей необходимо использовать профильные прессовые плиты что ограничивает область применения метода. Кроме того для метода характерен относительно высокий уровень шума.

## Глава 4 ПРОЦЕССЫ УПРОЧНЕНИЯ СМЕСЕЙ

### 4.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УПРОЧНЕНИИ СМЕСЕЙ

Природа прочности смесей определяется физическими физико-химическими и химическими силами взаимодействия между связующими материалами и зерновой основой. Физическими (или ван-дерваальсовыми) являются силы межмолекулярного взаимодействия химическими — валентные связи между атомами, к физико-химическим относят силы возникающие на основе подородных связей. Энергия затрачиваемая на разрыв упрочняющих связей (кДж/моль) химических 150—1050 физико-химических 8—250 физических 1—5.

Сущность химической связи состоит в образовании электронных пар связывающих атомы. Если электронная пара после соединения принадлежит одному химическому элементу, то связь будет ионной (гетерополярной) если в одинаковой мере общим элементом — ковалентной (гомополярной). Так в кристаллах глинистых минералов имеет место ионная связь ковалентная наблюдается во многих органических соединениях в частности в синтетических смолах. Физическая связь или межмолекулярное взаимодействие возникает между электрически нейтральными молекулами (или атомами). Этот вид взаимодействия имеет электростатическую природу. Здесь могут возникать так называемые ориентационное индукционное и дисперсионное взаимодействия (в зависимости от природы молекул или атомов). Если последние являются неполярными то взаимодействие будет только дисперсионным у полярных молекул и атомов наблюдаются все три вида взаимодействия. Чем больше дипольный момент молекулы тем все большую роль играет ориентационное взаимодействие. Водородная связь (Н-связь) по своей силе занимает промежуточное положение между химическим и физическим взаимодействием. Этот вид связи возникает между атомами со свободными электрон

ными парами и атомом водорода уже связанным с другими атомами ковалентной связью.

В то же время сегодня считается общепризнанным, что прочность формовочных смесей обуславливается адгезией связующего материала к зернам наполнителя и когезией пленки связующего и зерен Адгезия и когезия являются более узкими категориями связи чем физические, физико-химические и химические виды взаимодействия. Различают адгезию механическую и специфическую. Последнюю подразделяют на адсорбционную, электростатическую, электромагнитную, химическую, диффузную и др. Преобладающей является специфическая адгезия. Механическая же адгезия может иметь место, но не она вносит основной вклад в формирование прочностной связи между разнородными материалами.

Применительно к формовочным материалам когезия зерен наполнителя как правило значительно выше когезии пленки связующего. Соотношение сил адгезии и когезии связующего может быть различным в зависимости от химической природы взаимодействующих материалов. Если когезия преобладает над адгезией то разрушение смеси будет носить адгезионный характер при обратном соотношении разрушение будет когезионным.

Большая часть литейных связующих материалов при отверждении поддержива процессам полимеризации (высыхающие и полувывсыхающие масла, полиуретаны и другие подобные материалы) или поликонденсации (жидкое стекло, этилсиликат, многие синтетические смолы и т. д.) образующийся в процессе отверждения полимер в большинстве случаев постепенно приобретает трехмерную пространственную структуру сначала в отдельных, наиболее активных центрах, переходя затем в сплошной скелет. В некоторых случаях при отверждении получаются полимеры линейного или плоского строения.

Полимеризация и поликонденсация являются химическими процессами при которых химические связи начинают проявлять себя при сближении атомов на расстояния  $(1-2) \cdot 10^{-10}$  м. Поэтому образование пространственной структуры сопровождается уменьшением межатомного расстояния, что сопровождается в уменьшении объема, следовательно и в усадке. Усадка сначала проявляется в отдельных группировках атомов, затем после образования сплошного скелета полимеров — в макрообъемах. Поскольку полимер образуется между зернами наполнителя, неподдержанного усадке, в пленке связующего начинают возникать внутренние напряжения сначала локальные (по аналогии со сплавами — напряжения I рода — в микрообъемах) переходящие затем в напряжения до всему объему смеси (напряжения II рода — в макрообъеме). Одновременно с этим начинаются процессы релаксации степеней развязия которых будет зависеть от химической природы связующего, скорости процесса отверждения, температуры. При отверждении формовочных материалов процессы развития напряжений

преобладают над релаксацией. Под действием внутренних напряжений достигающих предела прочности пленок, в полимере развивается механическая деструкция (разрыв химических связей). В пленке связующего возникают микротрещины.

Многие химические процессы, идущие при отверждении смеси сопровождаются выделением побочных продуктов реакций (главным образом воды), занимающих определенный объем в структуре пленки связующего и мешающих сближению между собой других атомов. Это явление сказывается на уровне прочности смеси в двух направлениях. Во-первых не все атомы прорвагуют понижая таким образом потенциально возможную прочность связующего, и во-вторых атомы побочных продуктов будут искажать атомную решетку связующего еще более увеличивая внутренние напряжения. Некоторые продукты реакций могут интенсивно испаряться что также отразится на уровне внутренних напряжений и количестве макротрещин пленки связующего которую испаряющиеся вещества будут разрывать нарушая ее сплошность.

Действие внутренних напряжений может усугубляться внешними напряжениями возникающими в процессе уплотнения смеси и различных технологических манипуляций со стержнями и формами. Степень развития перечисленных явлений приводящих к возникновению напряжений и разрыву пленок связующего (в конечном счете к механической деструкции) и будет характеровать при прочих равных условиях уровень физико-механических свойств смеси когезионную или адгезионную прочность.

В общем виде прочность смесей можно выразить следующей формулой:

$$\sigma = k n \delta,$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности  $n$  — число контактов между зернами огнеупорной основы приходящихся на единицу объема (или массы) смеси  $\delta$  — прочность одного контакта.

Следовательно анализ прочности смеси нужно вести в двух различных направлениях. Величина  $n$  зависит от степени уплотнения которая при прочих равных условиях является функцией текучести смеси и связанных с ней факторов от гранулометрического состава зерен огнеупорной основы и т. д. Прочность одного контакта определяется во-первых химической природой пары огнеупорная основа — связующее во-вторых, вязкостью связующего определяющей полноту образования мостов вокруг контакта в третьих степенью однородности смеси и т. д. Этот даже очень небольшой анализ показывает сложность задачи прочности смеси от различных факторов выразить которые в более конкретную математическую модель прочности смесей пока и сожалению не удается.

В связи с резким увеличением номенклатуры связующих литейных материалов<sup>1</sup> вызванным химической формовочкой процессов ии одна из предложенных ранее классификаций в полной мере не удовлетворяет требованиям современного уровня литейного производства. Считаем целесообразным несколько видоизменить классификацию И. Б. Куманина и А. М. Лисса усовершенствовавную Г. Ангелович [97]. Такая классификация, представленная в табл. 4.1 основанная на распределении связующих по их природе дает возможность найти свое место любому связующему материалу.

С учетом технологических особенностей предлагается следующее обозначение близких по свойствам типов связующих. На первое место необходимо ставить группу связующих по удельной прочности (1, 2 или 3 где  $1 - \sigma_{\text{уд}} \cdot 10^{-8} > 5 \text{ Па/}\%$ ;  $2 - \sigma_{\text{уд}} \cdot 10^{-8} < 5 \text{ Па/}\%$ ;  $3 - \sigma_{\text{уд}} \cdot 10^{-8} < 3 \text{ Па/}\%$ ); на второе — класс (А, Б или В) — по химической природе, на третье — температурный фактор (Х или Г — соответственно холодное или горячее отверждение) и на четвертое — длительность отверждения (Д или К — см табл. 4.1). Предлагаемая классификация дает возможность технологам и исследователям значительно легче ориентироваться в связующих материалах.

Вследствие большого разнообразия связующих материалов применяемых в литейном производстве сегодня нет возможности разработать четкую классификацию механизмов отверждения смесей. Значительно проще дать классификацию процессов отверждения.

<sup>1</sup> До 30—40-х годов этот вид материалов называли крепящими. По предположению П. П. Вегера их стали именовать связующими обоянами. Однако до настоящего времени у ряда исследователей (и даже в некоторых ГОСТах) этот вариант продолжает существовать.

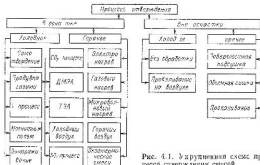


Рис. 4.1. Упрощенная схема процессов отверждения смесей

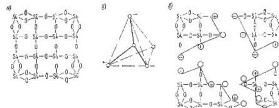


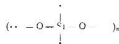
Рис. 4.2. Структура кремнезема а — монокристалл; полимера б — кремнекислородный тетраэдр (SiO<sub>4</sub>)<sup>4-</sup>; в — разрушенный кристалл

ления. В первом приближении такая классификация представлена на рис. 4.1.

Совершенствование технологии изготовления форм и стержней идет в направлении холодного отверждения смесей в объеме что связано с получением более точных отливок с меньшими материальными затратами.

Пески состоящие из зерен кварца с содержанием глинистой составляющей не более 50 %, называют кремнеземистыми. Зернистой основой этих песков является кремнезем (диоксид кремния). Кремнеземы — полимеры на что указывал еще Д. И. Менделеев «... в безводном кремнеземе находится не SiO<sub>2</sub> а сложная частица Si<sub>2</sub>O<sub>2n</sub>, т. е. строение кремнезема есть полимерное сложное а не простое ... выраженное формулой SiO<sub>2</sub>».

При полимеризации образуется элементарная молекула полимера плоская условная структура которой представлена на рис. 4.2, а. В соответствии с современным обозначением, полимер Si<sub>2</sub>O<sub>2n</sub> можно представить как



или брутто формулой (SiO<sub>2</sub>)<sub>n</sub> однако для сокращения его пока вызвано упрощенной формулой SiO<sub>2</sub>.

Из структуры кремнезема видно что атомы кремния соединяются между собой посредством атомов кислорода. Связь  $\cdots \text{Si} - \text{O} - \text{Si} \equiv$  называют силосановой или силосановой соединения чередующихся атомов кремния и кислорода — силосановыми (многомолекулярные соединения — полисилосановыми). В структуре (SiO<sub>2</sub>)<sub>n</sub> обычно выделяют основную структурную единицу — кремнекислородный тетраэдр (рис. 4.2 б) состоя

Т а б л и ц а 4.1 Классификация связующих материалов

Химическая структура материала	Технологическая группа материала	Целлюлоза, крахмал, полисахариды	Целлюлоза, крахмал, полисахариды	Брызг шпатель и т.	
				$100 \geq \text{С}_{\text{вд}} \geq 100 \text{ (кг/л)}$	$100 \leq \text{С}_{\text{вд}} \leq 300 \text{ (кг/л)}$
Органические (класс А)	Нормальная (Х)	Длительная (Д)	Полвинилбутират	Эбуполвинил полиакрилат	Фуркановые смолы Карбамадиформановые смолы
			Кратковременная (К)	Полиуретановые смолы	
	Повышенная (Г)	Длительная (Д)	Химически обработанные не фенолрезисты (П, ПП, ППА и т. п.)	Крахмальные продукты (крахмалит, декстрины и т. п.)	Побочные продукты целлюлозного и слюдяного производства (ЛСТ, коллоиды и т. п.)
			Связующие СПП, КО, ЦГУ (Ф) и т. п.	Подуретановые смолы и продукты их переработки (Связующие ГУФ, ЗИЛ, ДП и т. п.)	
Нормальная (Х)	Кратковременная (К)	Карбамадиформановые смолы	Карбамадиформановые смолы	Резольные феноформальдегидные и другие термостойкие смолы	—
		Полвинилбутират	Полвинилбутират		
Нормальная (Х)	Длительная (Д)	Связующие кислотного спектро типа	Жидкое стекло, отверждаемое	Жидкое стекло, отверждаемое	Жидкое стекло, отверждаемое феррохромными оксидами, перборитовыми шпательными и другими материалами
			Связующие кислотного спектро типа	Связующие кислотного спектро типа	

Примечания: 1. Жидкое стекло — температура отверждения — температура плавления, температура — температура отверждения с использованием отвердителя; 2. Карбамадиформановые смолы — в основном герметики, герметики, герметики — герметики, герметики, герметики.

Нормальная (Х)	Повышенная (Г)	Кратковременная (К)	Жидкое стекло, отверждаемое	Жидкое стекло, отверждаемое	Жидкое стекло, отверждаемое феррохромными оксидами, перборитовыми шпательными и другими материалами
			Связующие кислотного спектро типа	Связующие кислотного спектро типа	
Класс Б	Повышенная (Г)	Длительная (Д)	Жидкое стекло, отверждаемое	Жидкое стекло, отверждаемое	Жидкое стекло, отверждаемое феррохромными оксидами, перборитовыми шпательными и другими материалами
			Связующие кислотного спектро типа	Связующие кислотного спектро типа	
Класс В	Повышенная (Г)	Длительная (Д)	Жидкое стекло, отверждаемое	Жидкое стекло, отверждаемое	Жидкое стекло, отверждаемое феррохромными оксидами, перборитовыми шпательными и другими материалами
			Связующие кислотного спектро типа	Связующие кислотного спектро типа	
Класс В	Повышенная (Г)	Кратковременная (К)	Жидкое стекло, отверждаемое	Жидкое стекло, отверждаемое	Жидкое стекло, отверждаемое феррохромными оксидами, перборитовыми шпательными и другими материалами
			Связующие кислотного спектро типа	Связующие кислотного спектро типа	

ции из одного атома кремния и четырех атомов кислорода. Которые имеют по одной ненасыщенной связи т. е.  $(\text{SiO}_4)^{4-}$ . Каждый атом кислорода одновременно является составной частью двух соседних тетраэдров повторяющихся многократно.

В кремнекислородном тетраэдре имеет место  $sp^3$  — гибридизация валентностей кремния. Атом кислорода имеет неподеленные пары электронов акцептором которых на свободной  $d$ -орбите являются атомы кремния.

Последний привлекает на свою  $d$ -орбиту неподеленную пару электронов атома кислорода связанного с атомами кремния в  $[\text{SiO}_4]^{4-}$   $p$  электронами.

Валентность кремния равна четырем. Это объясняется тем, что внешняя орбита атома кремния содержит четыре электрона. При взаимодействии атома кремния с меньшим чем четыре числом других одновалентных атомов оставшиеся электроны являются ненасыщенными. Такие электроны составляют свободные связи.

Выше была рассмотрена молекула полимера идеального строения, в которой все связи внутренних и наружных атомов кремния и кислорода. В реальной молекуле часть связей между кремнием и кислородом может быть разорванной, ненасыщенной валентной, особенно на поверхности частиц кремнезема. Одной из причин такого положения является раскол зерна кремнезема в результате действия механических сил или термических напряжений (рис 4.2, в). При этом кремнекислородный тетраэдр  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  оказывается разделенным на части одна из которых остается в одной части расколотого зерна кремнезема другая — во втором. Свободнообразованные поверхности называют ювенильными. Ювенильные поверхности обладают повышенной свободной энергией благодаря присутствию на них атомов с разорванными связями (активных центров)  $-\text{O}^{\cdot-}$ ,  $\equiv\text{Si}^{2+}$ ,  $=\text{Si}^{2+}$ ,  $-\text{Si}^{2+}$ . В целом расколотые частицы являются электроннеутральными. Сумма их зарядов равна нулю.

Когда скоро атом кремния находится в центре кремнекислородного тетраэдра на наружной части ювениальной поверхности не ходят только атомы  $-\text{O}^{\cdot-}$ , т. е. поверхностные слои кремнезема имеют отрицательный заряд. Такие атомы являются активными. С течением времени активность ювениальной поверхности падает вследствие адсорбции на нее атомов окружающей среды (воды воздуха и т. п.). Естественно «работают» и положительно заряженные атомы кремния, находящиеся в более глубоких слоях. Их заряды тоже со временем насыщаются вследствие взаимодействия с окружающей средой.

Поверхностный слой кремнезема является наиболее сложным по его структуре. Разнообразие этого слоя представлено на рис 4.3. Обширная библиография по вопросу поверхности кремнезема приведена в монографии Р. Айлера [4]. На рис 4.3 а — д в идеализированном виде приведены различные состояния гидро-

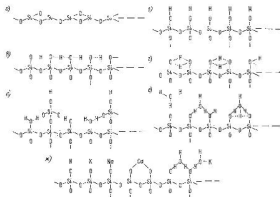


Рис. 4.3. Структурные структуры поверхностного слоя кремнезема (— — — — — поверхность): а — дегидроксилированная поверхность; б — гидроксилированная поверхность с одиночными (свободными) оксигенными OH группами; в — гидроксилированная поверхность с одиночными связанными водородными связями (пухляк) OH-группами; г — гидроксилированная поверхность со связанными (вициальными) парами связанными водородными связями OH группами; д — гидроксилированная поверхность со связанными связанными водородными связями OH-группами; е — гидроксилированная гидратированная различный образом поверхность; ж — расположение различных слоев и молекул на поверхности слоя кремнезема.

ксилированной поверхности. Процесс гидроксилирования можно представить как взаимодействие воды с активными центрами ювениальной поверхности частиц кремнезема. Возможно также взаимное действие воды с  $\text{SiOSi}$  группами.

Гидроксилированная поверхность кремнезема легко адсорбирует воду благодаря созданию водородных связей между атомами кислорода и водорода воды и OH группами. Водородные связи являются основой адсорбции вещества с электроотрицательными атомами их молекул на  $\text{SiOH}$  (силанольной) поверхности. Обеспечение образования максимально возможного числа водородных связей является наиболее прочной формой адсорбции вещества на поверхности кремнезема. Молекулы воды адсорбируются на одиночных (свободных)  $\text{SiOH}$  группах, а также на смежных (вициальных)  $\text{SiOH}$ -группах (рис. 4.3, г). На смежных группах парно взаимно связанных водородными связями большой склонностью к образованию водородных связей обладают молекулы, имеющие сильную электронно-донорную способность (воды,

метнол и т.п.) Наиболее прочный вид адсорбции молекулы воды показан на рис. 4.3 е.

SiOH группы являются активными центрами для полярных молекул адсорбата, поэтому максимум его содержания достигается при наибольшей концентрации SiOH-групп.

При сушке имеет место дегидратация поверхности кремнезема. Физически адсорбированная вода удаляется при температуре 120 °C. При высушивании при температуре 105—110 °C (как предусмотрено стандартом для определения влажности песка и смесей) часть адсорбированной воды остается на поверхности кремнезема в условиях наличия влаги в атмосфере. Вода, адсорбированная в микропорах, удерживается до температуры 180 °C.

Силоксановые группы теряют воду при более высоких температурах. Так, OH группы конденсируются и удаляются в виде паров в заметной степени при температуре выше 175 °C. Нагрев до температуры 400 °C приводит к удалению только около половины гидроксильных групп поверхности. При температуре 750 °C еще остаются одиночные несоединенные SiOH группы. Полное дегидратирование поверхности кремнезема наступает, видимо, при температуре 900—1000 °C в результате чего поверхность становится водостоксановой.

При наличии вредных примесей в кварцевом песке в виде оксидов щелочных и щелочно-земельных металлов часть ионов водорода OH-групп может быть замещена ионами натрия калия и др. Тогда структура поверхностного слоя кремнезема примет вид, представленный на рис. 4.3 ж.

Кремнезем в поверхностных слоях может также иметь аморфную форму (рис. 4.4), подобную слою Байлби на поверхности металла [3]. В аморфном кремнеземе, как и во всех аморфных телах нет дальнего порядка структуры и определенной температуры плавления. Этот слой обладает повышенной химической активностью. Так, согласно исследованиям Ю. С. Черкинского, растворимость кристаллического кварца в воде при нормальной температуре составляет 0,0006 %, а аморфного — 0,015 %.

Частицы формовочного песка на своей поверхности всегда несут всевозможные примазки вредных примесей



Рис. 4.4 Поверхность кремнезема с аморфизованным слоем

Рис. 4.5 Расположение примазок на поверхности частицы кремнезема



Таблица 42 Полимерные превращения кварца

Модификация	Структура	Температура °C	Плотность г/см <sup>3</sup>
$\alpha$ -кварц	Тригональная Гексагональная	Ниже 575	2,65
$\beta$ -кварц		575—870	2,83
Триклин:	Кубическая	870—1470	2,22
Кристаллит:		1470—1710	2,19

(рис. 4.5). Это могут быть адгезивно прилипшие оксиды щелочных и щелочноземельных металлов, железа, сульфиды и другие примеси.

Диоксид кремния в природе встречается в виде трех модификаций: кварца, триклина и кристаллита. Стабильные модификации диоксида кремния переходят одна в другую при следующих температурах (°C):



Каждое полиморфное превращение сопровождается объемными изменениями (табл. 4.2).

Переход из одной кристаллической системы в другую с изменением объемов приводит к возникновению механических напряжений в зернах кварца и некоторому искажению геометрических размеров полости литейной формы а следовательно и отливки.

Исходные формовочные материалы и готовые смеси в том или ином количестве в виде всегда содержат воду. В конечном пункте производства формы и стержней вода является нежелательным компонентом и от нее стараются избавиться. На различных этапах технологического процесса в присутствии воды в формовочных материалах относится по-разному. В свежих исходных материалах воды должно быть минимальное количество в дальнейших технологических операциях во многие виды смесей воду специально добывают так как она является технологически необходимым компонентом (улучшая пластичность, текучесть, формуемость, живучесть и даже прочность смесей). Но и в этих случаях воды должно быть только минимально необходимое количество.

Применительно к формовочным материалам литейного производства воду можно классифицировать по типу связи с компонентами формовочной смеси и принадлежности к исходным материалам. По первому классификационному признаку вода может быть связанной с другими элементами минералов химически, физико-химически физико-механически. В соответствии со вторым классификационным признаком воду подразделяют на входящую в состав минералов и не входящую в состав минералов. В свою

очередь вода, входящая в состав минералов может быть разделена на конституционную кристаллизационную и цеолитную воду не входящая в состав минералов, разделяется на адсорбированную и свободную

Конституционно связанная вода входит в химический состав минералов, т. е. она химически связана с молекулами минералов. В химических формулах минералов конституционную воду показывают в виде OH группы (в каолинитовой глине химически связанная вода составляет 14 %, в бентонитах, кроме межслоевой — 5 % от массы основы минерала). Этот вид воды образует наиболее прочную связь характеризующуюся точным молекулярным соотношением между отдельными компонентами соединений. При нагреве до некоторой температуры конституционная вода начинает выделяться из минерала. Начало выделения у большинства минералов наблюдается при температуре 300—350 °С полная потеря этой воды (т. е. потери OH группы) достигается примерно при температуре 700 °С. Процесс выделения конституционной воды является необратимым, свойства минералов резко изменяются. В связи с этим во избежание падения прочностных свойств смеси, в состав которых входят минералы с конституционной водой необходимо захватывать при температуре, чем на много превышающей температуру начала выделения конституционной воды. Указанное в наиболее полной мере относится к несвязанной смеси.

Кристаллизационная вода входит в состав минералов, но не является химически связанной с другими молекулами минерала. Она отличается от конституционной меньшей теснотой связи и сохраняет свою молекулярную форму. В формулах химических соединений кристаллизационную воду показывают как  $n \cdot H_2O$ . Кристаллизационная вода при нагревании из минералов удаляется (но при более низкой температуре чем конституционная), также изменяя свойства веществ. В отличие от конституционной кристаллизационная вода может возвращаться в состав минералов при их намачивании, придавая им исходные свойства.

Цеолитная вода входит во внутреннюю структуру кристаллической решетки минералов, но не участвует в ее строении, ее входит в химический состав минералов сохраняя свою молекулярную форму. Ее удаление при нагреве резко меняет свойства минералов. При увлажнении такие минералы снова впитывают воду восстанавливая при этом первоначальные свойства. Адсорбированная вода (которую иногда называют пленочной) подразделяется на прочносвязанную — гигроскопическую — и рыхло связанную — осмотическую (рис. 4.6).

Адсорбция воды на поверхности минералов может быть физической и физико-химической. Физическая адсорбция имеет место при молекулярном на границе двух фаз двойного электрического слоя. Согласно правилу Кельна в большинстве случаев твердые вещества заряжаются отрицательно так как имеют меньшую ди-

электрическую проницаемость чем вода. При физико-химической адсорбции поверхность минералов являющихся оксидами сначала гидроксидируется, т. е. покрывается OH группами с которыми затем взаимодействует вода (за счет водородных связей), образуя гидратный слой. При взаимодействии между частицами минерала и диполями воды возникают электростатические связи численное значение которых у самой поверхности составляет сотни МПа. Эти силы быстро убывают по мере удаления от поверхности приближаясь к нулю на расстоянии равном примерно 0.5 мкм. Обладая значительными вязкостью и эластичностью упругостью, прочностью на сдвиг прочносвязанная вода резко отличается по своим свойствам от обычной свободной. Она имеет более низкую температуру замерзания. Рыхлосвязанная вода сравнительно легко отрывается от частицы минерала выдвигаясь из смеси под воздействием внешнего давления равного далям единицы МПа.

Свободная вода подразделяется на капиллярную и гравитационную. Капиллярная вода удерживается в смеси силами капиллярного давления  $p_k$  (рис. 4.7). На нее не распространяются силы межмолекулярного взаимодействия, по она не вытекает из смеси под влиянием собственного веса. Силы капиллярного давления стягивают между собой частицы огнеупорной основы смеси усиливая ее прочность во влажном состоянии. Капиллярную воду в свою очередь подразделяют на капиллярно-стыковую (пендулярную) и капиллярно-точечную (функкулярную). Капиллярно-стыковой является вода которая находится в кольцеобразных зазорах контактов зерен не связанных с соседними подобными зазорами. Капиллярно-точечную называют воду в малых зазорах сливающихся друг с другом. Такая вода может перетекать от одного микростыка к другому. Температура замерзания капиллярной воды ниже нуля и



Рис. 4.6. Взаимодействие минерала с водой  
1 — адсорбированная вода; 2 — гигроскопическая вода; 3 — осмотическая вода; 4 — свободная вода

Рис. 4.7. Капиллярная вода в порах формовочной смеси: а — стыково-вазально действующая между капиллярной водой и частицами минерала; б — капиллярно-стыковая (пендулярная) вода; в — капиллярно-точечная (функкулярная) вода



Рис 4.8 Кривая равновесной влажности воздуха между жидкостью и паром

зависит от диаметра капилляра. Свойства капиллярной воды не отличаются сколько-нибудь заметно от свойств обычной воды. Гравитационной является вода, которая под действием собственного веса свободно вытекает из смеси. В формовочных смесях этот вид воды отсутствует. Частицы минералов, находящиеся в окружении капиллярной и гравитационной воды, испытывают на себе выталкивающее действие архимедовой силы. В этих видах воды отсутствуют предел текучести, сопротивляющиеся статическому сдвигу касательные напряжения.

Позтому капиллярная и гравитационная вода отнесены к категории свободной.

Испарение жидкости при сушке происходит при любой температуре, и при прочих равных условиях оно тем интенсивнее, чем выше температура. Молекулы жидкости беспрерывно находятся в движении. Средняя энергия молекул определяется температурой жидкости. Однако как в отношении температуры так и энергии молекул имеют место флуктуационные явления, в результате которых одна часть молекул обладает большими скоростями, другая — меньшими, чем средняя скорость движения молекул жидкости. Молекулам с большими скоростями, преодолевая силы поверхностного натяжения, покидают жидкость. Часть таких молекул может снова попасть на поверхность. Если число молекул покидающих жидкость больше, чем число молекул падающих на ее поверхность, будет иметь место испарение. Если же при обратном соотношении наблюдается конденсация. Взаимосвязь между испарением и конденсацией является функцией давления газа над зеркалом жидкости и ее температуры (рис 4.8). Чем выше поднимается температура, тем интенсивнее испаряется жидкость и тем больше давление паров этой жидкости. При некоторой температуре давление паров (называемое в этом случае упругостью насыщенных паров) достигает значения внешнего давления, что приводит к испарению жидкости не только с поверхности, но и по всему объему. С этого момента интенсивность испарения резко возрастает, так как при  $t_c = 100^\circ\text{C}$  начинается процесс кипения воды. Если до достижения издеи температуры  $100^\circ\text{C}$  передача влаги на поверхность смеси осуществлялась за счет теплопроводности (вследствие наличия коэффициента диффузии влаги по сечению), то выше этой температуры влага начинает еще передаваться за счет возникновения некоторого градиента давления газов при кипении воды.

Для наглядности единый механизм сушки целесообразно рассмотреть по первым, под действием температуры, во-вторых — влажности (рис 4.9). По изменению температуры сушку можно разделить на три этапа: I — нагрев; II — выдержка при опти-

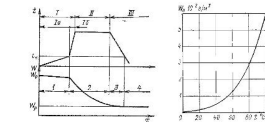


Рис 4.9. Этапы сушки форм и стержней:

$t$  — температура;  $W$  — влажность смеси;  $t_c$  — продолжительность сушки

Рис 4.10. Зависимость влагоскости воздуха  $W_0$  от температуры  $t$

мальной температуре, III — охлаждение. Этап I условно можно еще разделить на два: Ia — медленный прогрев; Ib — быстрый нагрев. Последнее обстоятельство связано с кинетикой испарения влаги. С повышением температуры увеличивается влагоскость ( $t$  — способность поглощать влагу) сушильного агента (рис 4.10). С другой стороны, чем выше температура, тем выше скорость испарения поверхностной влаги, вызывающая миграцию влаги внутренних слоев смеси. Если скорость нагрева окажется такой, что миграция влаги к поверхностным слоям будет отставать от испарения с поверхности, то последние окажутся высушенными. В этих условиях отставание миграции влаги будет еще больше усиливаться вследствие резкого уменьшения теплопроводности сухой смеси по сравнению с влажной. Это обстоятельство затянёт дальнейший процесс сушки и может привести к трещинам поверхности форм и стержней и повышенной осыпаемости вследствие возникновения больших внутренних напряжений в слое связующего материала поверхностных слоев высушиваемого изделия (по причине высокой скорости сушки этих слоев). Поэтому для сохранения влаги на поверхности прогресс до достижения  $t_c$  всем объемом смеси должен быть замедленным. При этом тем медленнее должен быть прогресс на этапе Ia, чем массивнее объект сушки. На этапе Ib процесс нагрева можно резко ускорить без ущерба для качества изделий.

По изменению влаги в формах и стержнях весь процесс сушки можно разделить на четыре этапа: I — этап начальной (исходной) влажности, когда влага уменьшается незначительно; 2 — этап интенсивного испарения влаги; 3 — этап медленного испарения и 4 — этап равновесной влажности. При прогреве смеси до  $100^\circ\text{C}$  влага испаряется в очень незначительном количестве при дости-

жени 100 °С вследствие кинесия начинается процесс интенсификации уменьшения влаги по всему объему. При достижении уровня  $W_p$  — равновесного содержания влаги в смеси при данных термодинамических условиях ( $t$  и  $p$ ) — процесс уменьшения влаги заканчивается. Из суцной формы и стержни извлекаются при температуре 60—80 °С.

При сушке удаляется только свободная вода, связанная вода практически полностью остается в материале, так как для ее удаления нужно иметь более высокую температуру и большее время этапа II. Не исключено однако, что к концу этапа 2 может начаться процесс удаления влаги OH-группы поверхностных слоев SiOH, которые покидают поверхность при температуре 180 °С и выше.

При сушке идет процесс сокращения размеров изделия. Поэтому быстрый нагрев вызывает растрескивание поверхности, так как в поверхностных слоях возникают напряжения растяжения вследствие торможения усадки внутренними слоями, где процесс сушки наступает несколько позже, чем в наружных слоях. Внутренние слои в это время испытывают напряжения сжатия. Напряжения и соответственно поверхностные трещины могут возникнуть также благодаря неравномерному нагреву различных частей изделия по длине.

#### 4.2 ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫЕ СМЕСИ

Глины являются водными алюмосиликатами, или солими поликремневых кислот. Минералогической основой большинства используемых в литейном производстве глин является каолинит, монтмориллонит и гидрослюда. В соответствии с ГОСТ 3226—77\* по минералогическому составу глина делится на каолиновые и каолино гидрослюдистые (основные составляющие — каолинит и каолинит с гидрослюдой), бентонитовые (основа — монтмориллонит, а также некоторые другие минералы) и полиминеральные (основа — смесь различных глинистых минералов). Химический состав глин является переменным, особенно гидрослюдистых, в которых он меняется от каолинита до мусковита.

Химические формулы идеальных глинистых минералов обычно пишут двумя способами: в виде оксидов металлов в последовательности по возрастанию валентности до кремнезема с указанием в конце молекул воды или в виде структурных формул. Так каолинит, монтмориллонит и мусковит показывают соответственно как  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ,  $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O + n H_2O$ ,  $K_2O \times 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$  или  $Al_2 [Si_2O_5] (OH)_2$ ,  $2Al [Si_2O_5] (OH) + n H_2O$ ,  $2KAl_2 [Si_4AlO_{10}] (OH)_2$ . Можно также встретить иные формулы этих минералов в виде солей поликремневых кислот, т. е.  $Al_2Si_2O_7 \cdot 2H_2O$ ,  $Al_2Si_4O_{11} \cdot H_2O + n H_2O$  и  $2KAl_2Si_4O_{14} \times n H_2O$  соответственно.

Глина имеет весьма сложное строение. Структуру глинистых минералов можно рассматривать как сочетание чередующихся

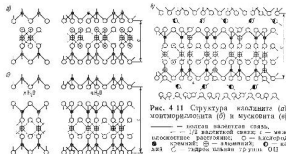


Рис. 4.11 Структура каолинита (а), монтмориллонита (б) и мусковита (в)

слоев различных групп атомов кислорода кремния, алюминия, водорода, калия и др. Комбинация из этих слоев образует пакеты (рис. 4.11).

Пакет каолинита (рис. 4.11 а) состоит из слоя кремнекислорода тетраэдрической упаковки (в верхних атомы кислорода, в центре — кремния) и гидроксильных групп, в которых в виде октаэдрической упаковки расположены атомы алюминия. Пакеты находятся на равном расстоянии друг от друга. Межслойное расстояние с по данным различных исследователей составляет (7.13—7.2)  $10^{-10}$  м. Ионы в каждом пакете каолинита (равно как и в других глинистых минералах) связаны между собой прочными валентными силами. Пакеты соседние удерживаются друг с другом более слабыми водородными связями, возникающими между кислородом тетраэдров и водородом внешних OH-групп. Пакеты электрически нейтральны.

Пакет монтмориллонита (рис. 4.11 б) состоит из трех слоев: двух кремнекислородных тетраэдрических расположенных на внешних плоскостях, и одного внутреннего алюмокислородного с OH-группами октаэдрической упаковки. Как и в каолините здесь связь между ионами внутри пакета валентная прочная. Взаимодействие пакетов осуществляется межмолекулярными (ван-дерваальсовыми) силами между одноименными внешними ионами кремнекислородного тетраэдра соседних пакетов. Это взаимодействие более слабое, чем в каолините (где действуют H-связи). Такая взаимосвязь позволяет между пакетами проникать воде ( $+ n H_2O$  в формуле монтмориллонита) увеличивая межслойное расстояние с до  $21,4 \cdot 10^{-10}$  м (вместо  $(9,2—9,4) \cdot 10^{-10}$  м у сухого бентонита) что вызывает набухание минерала при увеличении его объема в 10—15 раз.

Структура кристаллической решетки мусковита (рис. 4.11, в) имеет такой же вид как и монтмориллонита с той разницей

что вместо молекул воды между пакетами расположены ионы калия и каждый четвертый ион кремния в кремнекислородном тетраэдре замещен ионом алюминия в соответствии со структурной формулой  $KAl_2(Si_6AlO_{20})(OH)_2$ . При замещении ионов кремния ионами алюминия образующийся недостаток зарядов компенсируется зарядами ионов калия, которые располагаются между пакетами в середине гексагональных пустот поверхностного кислородного слоя. Пакеты падаются друг на друга так, что ион калия оказывается равноудаленным от 12 атомов кислорода (по 6 атомов от каждого пакета). Большим различием между структурой монтмориллонита и мусковита является то, что катион калия компенсирующий заряд алюминия очень прочно удерживается в пакете, не имея возможности проявлять обменных свойств. Кроме того, близкое соответствие между размерами ионного радиуса иона калия и гексагональных пустотей кремнекислородных тетраэдров дает возможность осуществлять плотную укладку с координационным числом 12. Следовательно в мусковите между пакетами наблюдается валентная связь за счет ионов калия. Однако и здесь легче оторвать пакет от пакета, чем разорвать валентную связь внутри пакета. Междоузельное расстояние  $c$  в мусковите составляет примерно  $10 \cdot 10^{-10}$  м.

Наиболее слабые связи между пакетами у монтмориллонита наиболее прочные — у мусковита каолинит занимает промежуточное положение. Такое состояние со связями между пакетами тесно коррелирует с удельными поверхностными разбрасываемыми глинистых минералов. Вот почему бентонит имеет наибольшую удельную поверхность гидрослюдистые глины — наименьшую. Удельная поверхность, в свою очередь, в определенной степени характеризует прочностные способности глины, связанные с активными центрами глинистых минералов.

По мнению Р. И. Злочевской активные центры в системе глина—вода, обладающие повышенной энергией, на частичках глины возникают следующим образом: каждый ион кристаллической решетки, находящийся внутри тела, имея какой-то заряд, окружен определенным числом ионов с зарядом противоположного знака, вследствие чего полностью пассивен с этими ионами. Такое положение нарушается на поверхности частицы, где возникают нескомпенсированные поверхностные заряды вследствие изоморфных замещений ионов решетки (выходящей на поверхность частицы) на ионы с меньшим зарядом, в углах и ребрах кристалла, в местах сколов. Кроме того в определенных условиях молекулы поверхностных частиц глины диссоциируют на ионы, часть которых уходит в дисперсионную среду, другая часть остается на своем месте, нарушая электростатическое равновесие. Возникновение новых активных центров может иметь место также вследствие так называемой сверхэквивалентной избирательной адсорбции ионов из дисперсионной среды, когда часть заряда адсорбата остается нескомпенсированной. Еще одним из

точником образования активных центров является обмен водорода OH-группы глинистой частицы на металлические ионы. Могут быть и другие источники появления активных центров на поверхности частиц глины.

Итак, в системе глина—вода на поверхности частиц глины имеет место наличие активных центров интегрировано выражаемых нескомпенсированностью заряда численное значение которого зависит от природы глины и характера дисперсионной среды (рН температуры, состава растворенных веществ и др.).

Ионы, расположенные на внешних поверхностных пакетах глины, имеют менее прочные связи с основной решеткой кристалла, чем ионы внутренних слоев. Поэтому часть внешних ионов при соответствующих условиях может быть замещена другими ионами, находящимися в дисперсионной среде без нарушения целостности кристаллической решетки. Это явление называют ионным обменом.

Ионный обмен схематически можно представить идущим по следующей реакции [85]



Смешанные реакции вправо или влево зависят от природы и концентрации ионов  $X$  и  $Y$ , а также от природы самой глины. Обменными ионами в глинах являются главным образом катионы натрия, калия, водорода, кальция и магния. Максимальное количество ионов, которое может быть замещено в глинах, называют суммой обменных катионов, которая колеблется в следующих пределах (мг-экв./100 г сухой глины): для каолиновых 10—35, гидрослюдистых 10—25 и монтмориллоновых 35—135. Увеличение удельной поверхности приводит к увеличению суммы обменных катионов.

Ионный обмен в значительной степени изменяет химический состав глин. Так, при обмене ионы  $Si^{4+}$  замещаются ионами  $Al^{3+}$  и далее — ионами  $Al^{3+}$  — ионами  $Mg^{2+}$  или  $Ca^{2+}$ , последние в свою очередь могут быть замещены ионами  $K^+$  или  $Na^+$ . Ионы решетки глинистого минерала переходят в раствор, из которого в несбалансированные по электронам иейки поступают другие ионы, идущие в нем ионы. Если пакеты заряжаются зарядами одинаковых знаков то они отталкиваются друг от друга, что ведет к самопроизвольному диспергированию. Такое явление наблюдается у бентонита.

При ионном обмене большое значение может иметь концентрация активных ионов водорода в промышленной воде. рН которой может изменяться от 5 до 7,5. По сведениям Д. С. Уильямса, рН водопроводной воды составляет 9,6—10,7, рН влажного кварцевого песка — 5—8. Этот показатель необходимо систематически контролировать.

Для повышения эффективности использования глины необходимо подвергнуть химической активации заключающейся в за-

мене ионов Ca Mg Fe Al диффузионного слоя глинистой частицы на поп Na<sup>+</sup>. Это приводит к увеличению дисперсности глины и как следствие к повышению ее связующей способности.

В настоящее время до 75 % отливок получают в песчаноглинистых формах примерно половина из которых не подвергается сушке [44]. Однако все формы должны обладать той или иной конструктивной прочностью. За счет чего обеспечивается необходимая прочность в сырых и высушенных формах? На прочность песчаноглинистых форм в сыром состоянии влияют следующие основные факторы: качество и количество формовочной глины зерновой основы (наполнителя) и технологических добавок (влагосодержащие: степени усадки смеси). На прочность сухих форм кроме перечисленных факторов влияет еще режим сушки.

Нет необходимости пояснять тезис о влиянии качества и количества формовочной глины на прочностные характеристики смеси. Отметим только некоторые моменты. Чем выше связующая способность глины тем выше прочность смеси тем следовательно меньше содержание глины требуется для достижения нужной прочности. Вспонтия следует всегда вводить меньше чем коллоидной или полимеральной глины. По свидетельствам П. П. Берга, Р. Э. Грима и др. смешивание различных по минералогическому составу глин (например каолиновых и монтмориллонитовых) дает относительно более высокую удельную прочность чем применение каждой глины в отдельности. Разнородные глины как бы активируют друг друга.

На прочность сырых смесей большое влияние оказывает материал зерновой основы. Видно в этом случае нужно придать во внимание главным образом его совместимость со связующим по концентрации водородных ионов pH. О зерновой основе следует также судить по форме и размерам зерен, гранулометрическому составу. Чем больше коэффициент угловатости зерен тем выше прочность смесей и наоборот. Угловатые зерна имеют более шероховатую поверхность чем полукруглые или округлые. По вышке прочности в смесях с угловатыми зёрнами обязательно часто механическим путем возникающим между шероховатыми поверхностями. Влияние размера зерна наполнителя на прочность смеси увязывается с содержанием активной глины и влаги. Чем меньше средний диаметр зерна тем больше его удельная поверхность. Следовательно для достижения оптимальной толщин пленки связующего при которой наблюдается максимальная прочность необходимо иметь большее содержание связующего в данном случае — глины и воды. Чрезвычайно важным при этом является соотношение между глиной и водой которое различно для глин разной минералогической природы и гранулометрического состава. Это соотношение для каждой новой партии глин следует определять опытным путем.

Вода в смесях играет двойную роль: во первых служит смазочным материалом во вторых является поставщиком атомов

водорода и кислорода — связующих мостиков между разрозненными частицами. Как смазочный материал вода уменьшает трение между частицами компонентов песчано глинистой смеси. Смазочным материалом служит только свободная вода как обладающая значительно меньшей вязкостью чем адсорбированная.

Формовочные смеси с зерновой основой имеющей высокую однородность по гранулометрическому составу укладываются в го раздо меньше стеснен чем смеси с распродолженными зёрнами. Следовательно первые смеси будут иметь более высокую пористость и газопроницаемость более низкую прочность в сыром состоянии чем вторые. Максимальная прочность во влажном состоянии обладают смеси содержащие влаги в которых не столько меньше (или равно) тому которое соответствует смеси малой удельной массы после улотнения стандартных образцов. Максимальная прочность в высушенном состоянии будет у смесей имеющих до сушки влажность большую чем соответствует нижней пределу пластичности. Добавка ПАВ по вышке текучесть смеси снижает прочностные показатели в сыром состоянии. Добавка каменноугольной пыли или других высокодисперсных материалов имеющих весьма высокую удельную поверхность приводит к повышению прочностных свойств в связи с чем для поддержания их на должном уровне необходимо увеличивать содержание связующих материалов.

Прочность смесей является результатом сложного взаимного действия различных компонентов между собой. Прочность песчано глинистой смеси в сыром состоянии обусловлена физическими и физико химическими силами взаимодействия материала зерновой основы и водно-глинистым связующим. Основой прочности формовочных смесей являются Н связи хотя декоративную легу в формование рассматриваемого показателя выюк также силы по поверхностного натяжения воды капиллярные силы и силы межмолекулярного взаимодействия. Водородные связи возникают между атомами водорода и атомами наиболее электроотрицательных элементов в частности с кислородом. Соединение атомов водорода и кислорода как раз и наблюдается на базальных поверхностях частиц глины и поверхностных слоях диоксида кремния и других оксидов служащих материалом зерновой основы.

Физические силы взаимодействия существуют практически всегда, однако при наличии более мощных источников сил как ими являются Н связи, они отходят на второй план. Водородные связи возникают непосредственно между гидроксипропанскими слоями частиц наполнителя а также между ними и слоями атомов базальных поверхностей глинистых частиц. На рис 4.12 схема точно показано такое взаимодействие между зёрнами диоксида кремния (рис 4.12 а), а также между кремнеземом и каолинитом (рис 4.12 б). Разрыв прежних Н связей между OH-группами поверхностных слоев зёрен диоксида кремния происходит в процессе перемешивания и улотнения смеси. Возникновение новых

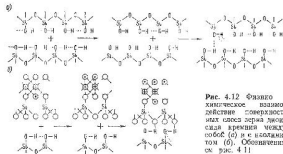


Рис. 4.12 Физико-химическое взаимодействие поверхности слоев зерна диоксида кремния между собой (а) и с силиконом (б). Обозначения см. рис. 4.11

Н связи имеет место в процессе уплотнения и при сушке. Аналогично может быть представлено взаимодействие между зернами диоксида кремния и чистым илиолином или другим глинистым минералом. Такая картина может быть ближе к вакуумному состоянию, когда большая часть молекул воды испарилась. В сыром состоянии между OH группами (в случае взаимодействия частиц диоксида кремния между собой), а также между OH-группами диоксида кремния и атомами базальных поверхностей глинистых частиц находится молекулы воды в гидратированном состоянии. Чем больше слоев этих молекул тем меньше связь между молекулами тем меньше прочность смеси в сыром состоянии. Возникновение Н-связей препятствует разрыву примыкающих находящихся на поверхности зерен (см. рис. 4.5), отсутствие контакта между взаимодействующими группами атомов и т.д. Поэтому далеко не все возможные Н связи реализуются. Их число увеличивается при испарении влаги повышая тем самым прочность смеси в вакуумном состоянии.

Для достижения наиболее полного контакта между частями при уплотнении когда наблюдается максимальная прочность смеси в вакуумном состоянии, необходима более высокая влажность смеси чем влажность обеспечивающая максимальную прочность в сыром состоянии. Это объясняется тем обстоятельством, что при формовке смеси для заливки по сухому всегда содержат больше влаги чем смеси для заливки по-сырому.

В строгой формулировке сушкой является процесс удаления из вещества жидкости. Такой жидкостью обычно является вода. В литейном производстве под сушкой понимают технологические операции с формами и стержнями связанные с нагревом в результате которых имеет место упрочнение вакуумируемых изделий. В данном случае сушкой являются процессы собственно удаления влаги из форм и стержней а также процессы в которых никакого

удаления влаги нет (например операция нагрева стержней с масляными связующими с целью ускорить процесс полимеризации в литейном производстве также носит название сушки, хотя при этом нет никакого удаления воды или какой-либо другой жидкости). Основная цель сушки литейных форм и стержней состоит в упрочнении смеси и уменьшении газотворности материала для получения отливок без газовых раковин и пористости. Побочным положительным эффектом сушки является повышение газопористости смеси.

Процесс сушки происходит при тепло и массообмене между влагой высушиваемого материала и так называемым сушильным агентом (точные газы воздух и т.п.). С повышением температуры возрастает давление паров влаги над поверхностью нагреваемого тела которые диффундируют в движущийся сушильный агент. Благодаря возникающему концентрационному градиенту влаги материала, последняя перемещается к поверхности из все более удаленных слоев высушиваемого объекта.

В зависимости от способа подвода тепла нагрев высушиваемого материала может быть конвективный, радиационный, контактный, диэлектрический. При конвективном нагреве сушащийся материал находится в потоке нагретого сушильного агента; радиационный нагрев осуществляется за счет инфракрасного излучения; контактный нагрев подразумевает передачу тепла высушиваемому материалу через непосредственный контакт с нагретой поверхностью (например, через электро или газообогреваемые плиты). Диэлектрическим является нагрев диэлектриков в переменном электрическом поле. При сушке материалов используют два вида диэлектрического нагрева в поле высоких частот (0,3—300 МГц), т.е. в поле конденсатора с ламповым генератором и в поле сверхвысоких частот (300 МГц—300 ГГц) генерируемых специальными установками — магнетронами (этот вид нагрева называют также микроволновым). Нагрев в этом случае осуществляется за счет внутреннего трения, вызванного вращением дипольных молекул материала (в данном случае воды) создаваемым за счет изменения полярности электрического поля. Достоинства диэлектрической сушки — высокая скорость нагрева материалов имеющая высокую теплопроводность, и равномерность прогрева по всему сечению изделия.

Кроме перечисленных видов может быть также сублимационная сушка — удаление влаги при которой производится под вакуумом при пониженных температурах. В литейном производстве наиболее широкое распространение получила конвективная сушка. Диэлектрическая сушка обладает высокой производительностью и высокой стоимостью.

В последние десятилетия объем высушиваемых форм и особенно стержней, резко сократился. Это произошло благодаря внедрению в промышленность весьма прогрессивных технологий  $\text{CO}_2$ -процесса ЖСС ПСС ХТС изготовление стержней с синте

Таблица 43 Продолжительность сушки песчано-глинистых форм [78]

Размер окон в свету мм	Температура °С	Время сушки ч
500×600 — 800×1200	400	6—8
900×1200 — 2000×3000	400	8—12
3000×3500 — 3000×5500	450	16—24
3500×5000 — 4000×5500	450	24—36
Св. 4000×5500	450	36—48

тическими смолами по нагреваемой и холодной оснастке и др. Следует различать полную (сквозную) сушку форм и стержней поверхностную подсушку проваливания и повторную сушку (или подсушку). Полная сушка подразумевает сушку всего объема форм и стержней, поверхностная подсушка является сушкой только рабочих поверхностей на глубину примерно от 10 до 80—100 мм в зависимости от материала и массы отливки. Проваливание есть процесс выдержки форм и стержней в воздухе после их изготовления. Повторная сушка необходима для форм и стержней, подвергнутых отделке с применением материалов, содержащих воду или после окраски водными красками.

Продолжительность и температура сушки зависят от массы форм и стержней, вида связующих материалов. Продолжительность сушки песчано-глинистых форм в зависимости от габаритных размеров окон приведена в табл. 4.3, стержней в зависимости от их массы — в табл. 4.4. Вид связующего материала определяет температуру сушки, оптимальное и максимальное значения которой представлены в табл. 4.5

Необходимо иметь в виду, что сушка форм отнюдь не аналогична сушке образцов смеси на которых производят механические испытания. При этом нужно также учитывать различия в способах уплотнения смеси форм и образцов; поэтому результаты испытаний образцов являются лишь некоторым приближением механических свойств смеси реальных форм к стержней

Таблица 44 Продолжительность сушки стержней мин

Вид связующего	Масса стержня кг							
	до 1,5	1,5—10	10—25	25—30	35—38	80—140	160—240	
Органические глинистые	45—60	90—130	130—150	150—210	210—300	300—360	360—420	
Глинистые	90—120	120—150	150—165	165—240	240—360	360—450	450—600	

Таблица 45 Температура сушки стержней

Вид связующего	Температура °С		Вид связующего	Температура °С	
	оптимальная	максимальная		оптимальная	максимальная
КВс	140—160	170	КТ ДП	220—230	240
Казифоль	140—160	175	КО	220—240	250
Патика	150—170	175	П, ПП, ППА	230—240	250
ССБ	160—180	180	Масляное	200—250	250
Декстран	160—180	180	СДБ	300—350	360
СП, СБ, КВс ГТФ	180—200	210	Глина	300—400	450
ГТУ (в)	190—200	210			

#### 4.3 СМЕСИ С ЖИДКИМ СТЕКЛОМ

Жидкое (или растворимое) натриевое стекло (ГОСТ 13078—81) представляет собой коллоидный водный раствор силиката натрия  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ . Упрощенно химическую формулу жидкого стекла часто представляют в виде  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  или  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . В работе [94] указывается, что в жидком стекле содержится молекулы  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , зивектика  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5 + \text{SiO}_2$  а также ионы  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Si}_2\text{O}_7^{2-}$ ,  $\text{SiO}_4^{2-}$ , сложные ионы кремневой кислоты типа  $(x\text{SiO}_2 \cdot y\text{SiO}_3 \cdot z\text{H}_2\text{O})^z$ , гидраты оксидов кремния  $n\text{SiO}_2 \cdot k\text{H}_2\text{O}$ , гидраты молекул  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot k\text{H}_2\text{O}$ . Эти данные свидетельствуют о том, что жидкое стекло имеет сложный химический состав, молекулы которого нельзя описывать одной химической формулой. Кроме натриевого существует еще и калиевое жидкое стекло, однако последнее в жидком производств не применяется.

Жидкое стекло готовят из силиката натрия выпускаемого промышленностью в виде глыбы и гранулата в соответствии с ГОСТ 13079—81. Силикат натрия производят двух видов: содовый и содово-сульфатный. Получают его при температуре 1300—1500 °С сплавлением кварцевого песка с содой, сульфатом натрия и углем. Основной характеристикой жидкого стекла является силикатный модуль  $M$  представляющий собой величину равную

$$M = K \frac{[\text{SiO}_2]}{[\text{Na}_2\text{O}]},$$

где  $[\text{SiO}_2]$  и  $[\text{Na}_2\text{O}]$  — масса диоксида кремния и оксида натрия, %;  $k$  — коэффициент, показывающий отношение молекулярной массы оксида натрия к молекулярной массе диоксида кремния т. е.

$$K = M_{\text{Na}_2\text{O}}/M_{\text{SiO}_2} = 1,032$$

Следовательно силикатный модуль есть молярное отношение  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Na}_2\text{O}$ , т. е. число молекул  $\text{SiO}_2$ , приходящихся на одну молекулу  $\text{Na}_2\text{O}$ .

В соответствии с ГОСТ 13078—81 различают три марки А В и В (с силикатным модулем соответственно 2,31—2,6 2,61—3 и 3,01—3,5) содового и две марки А и В (с силикатным модулем соответственно 2,31—2,6 и 2,61—3) содово сульфатного жидкого стекла. Кроме указанных марок специально для литейного производства выпускают жидкое стекло с модулем, равным 2—2,3.

Чем больше силикатный модуль жидкого стекла, тем быстрее формовочная смесь отверждается. Поэтому уровень силикатного модуля связующего целесообразно устанавливать в зависимости от назначения смеси:  $M = 2-2,3$  — для крупных форм и стержней с многосуточным циклом производства;  $M = 2,31-2,6$  — для отливок с циклом производства, равным 1—2 сут,  $M = 2,61-3$  — для небольших форм и стержней. Такие области применения жидкого стекла связаны с тем, что силикатный модуль предопределяет прочность смеси в сыром, и особенно отверженном, состоянии, ее пластичность и, самое главное, живучесть.

В литейных цехах практически используется жидкое стекло с силикатным модулем, равным 2,2—2,8. В летний период при повышении температуры исходных материалов до 30—32 °С живучесть смесей резко падает. В таких случаях рекомендуется работать с жидким стеклом, имеющим модуль, равный 1,6—1,7. Понижение силикатного модуля можно осуществлять добавлением в жидкое стекло 42—48 %-ного водного раствора NaOH. Зависимость между силикатным модулем плотностью ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup> — по ареометру) и массовым содержанием воды (%), согласно Ю. П. Васину и А. Я. Расулову, выражается уравнением

$$\frac{[H_2O]}{182 - M} + \frac{38,46\rho}{86,31 - M} = 1.$$

В работе [26] приводятся номограммы, связывающие между собой силикатный модуль, плотность, содержание воды и количество добавляемой щелочи.

Жидкое стекло с силикатным модулем, равным 2—3, содержит 35—50 % сухого остатка. Следовательно, в жидком стекле находится 50—60 % (по массе) воды. Кроме того, в жидком стекле в качестве примесей присутствуют оксиды железа, алюминия и кальция, а также серный ангидрид, общее массовое содержание которых может достигать 0,6 %. В зависимости от силикатного модуля жидкое стекло замерзает при (—2) — (—11) °С.

Современные технологические процессы изготовления форм и стержней с использованием жидкого стекла в качестве связующего материала предъявляют к последнему более жесткие требования контроля для получения отливок высокого качества. В настоящее время является явно недостаточным контроль жидкого стекла только по силикатному модулю и плотности. В последние годы появились новые виды контроля жидкого стекла перед его использованием. В частности для более глубокой характе-

ристики жидкого стекла предлагается использовать порог коагуляции  $P_k$  [94].

Под порогом коагуляции в коллоидной химии понимают наименьшую концентрацию введенного в коллоидно дисперсную систему вещества (акстролита или неакстролита) вызывающую реакцию коагуляции системы. Теория этого вопроса подробно рассмотрена в соответствующих разделах курсов коллоидной химии. Порогом коагуляции жидкого стекла предложено называть минимальное количество соляной кислоты, приводящее к мгновенной его коагуляции (или эквивалентное соляной кислоте количество Na<sub>2</sub>O) [94].

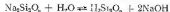
Таким образом, жидкое стекло представляет собой сложную коллоидную систему, состоящую из кислотной SiO<sub>2</sub> и щелочной Na<sub>2</sub>O составляющих. Щелочную составляющую условно можно разделить на две части: одна часть эквивалентно связана с SiO<sub>2</sub>, другая является условно свободной. Последняя стабилизирует, препятствует переходу системы в гель. Именно эта часть Na<sub>2</sub>O и характеризует порог коагуляции  $P_k$ . Порог коагуляции как процентное отношение свободной массы Na<sub>2</sub>O к общей массе жидкого стекла можно рассчитывать по формуле

$$P_k = 3,1ab/n,$$

где  $a$  — объем водного раствора кислоты, израсходованной на титрование жидкого стекла, мл,  $b$  — основность кислоты,  $m$  — молярность кислоты,  $n$  — масса жидкого стекла, г. Применив только к одномолярному (1Н) водному раствору формула имеет вид

$$P_k = 3,1a/n$$

Следует заметить, что определение  $P_k$  по данной методике носит приближенный характер. Дело в том, что, как известно, чем меньше концентрация вещества в водном растворе, тем выше степень его гидролиза. Это в полной мере относится и к жидкому стеклу, при гидролизе которого по реакции



идет накопление ионов OH<sup>—</sup>. Титрование безводной (концентрированной) HCl производят нельзя вследствие, во первых, ее сильной летучести (что снижает точность анализа) во вторых, благодаря локальному образованию золь кремневой кислоты в месте падения капли концентрированной HCl. Титровать можно только разбавленной кислотой. Однако вносимые вместе с HCl воду, усиливается гидролиз жидкого стекла повышается содержание в нем свободной щелочи (это свойство жидкого стекла можно использовать для увеличения живучести формовочной смеси путем разбавления его только водой, если такая операция не приведет к чрезмерно высокой влажности смеси).



Рис. 4.13. Зависимость скорости смеси  $K$  от порога коагуляции  $P_n$  [93]

и тем большей реакционной способностью обладает жидкое стекло, тем меньше живучесть смеси (рис. 4.13). С увеличением  $P_n$  возрастает расход отвердителя, так как вначале отвердитель расходуется именно на ту часть  $\text{Na}_2\text{O}$ , которая соответствует порогу коагуляции.

По мнению [95] для жидкого стекла, модифицированного различными добавками, исследование широкого интервала колебаний значений порога коагуляции более надежной характеристикой является не порог коагуляции, а модуль коагуляции  $M_c$ . Под модулем коагуляции предложено понимать массовое отношение шеей кремневой кислоты в жидком стекле к содержанию в нем нейтрализованной части  $\text{Na}_2\text{O}$  в момент начала коагуляции. Модуль коагуляции учитывает модифицирующие добавки, вводимые в жидкое стекло замедляющие или ускоряющие его коагуляцию и влияющие на расход электролита при нейтрализации стабилизирующей части  $\text{Na}_2\text{O}$  (а следовательно и на значение порога коагуляции). Интервал колебаний модуля коагуляции для различных партий жидкого стекла значительно уже порога коагуляции.

Различают два механизма твердения жидкостекляных смесей:

- 1) за счет выделения из жидкого стекла продуктов, способных связывать зерна песка;
- 2) благодаря удалению влаги жидкого стекла, т. е. вследствие обезвоживания.

При отверждении по первому механизму в смеси вводят специальные вещества — отвердители. В настоящее время отверждение осуществляется газообразными жидкими и твердыми отвердителями.

Механизм связывания зерен дисперсителя является чрезвычайно сложным и до конца не изученным. Предполагается, что сцепление пленки связующего с зернами происходит за счет их

нейтрализации свободной части щелочной составляющей жидкого стекла вызовом гелеобразования (жидкое стекло стабильно при значении  $\text{pH} > 10,9$ , снижение щелочности до определенного уровня  $\text{pH}$  приводит к гелеобразованию). Следовательно чем больше содержание стабилизирующей части  $\text{Na}_2\text{O}$  тем устойчивее система тем больше живучесть формовочной смеси.

И наоборот чем меньше содержание стабилизирующей части  $\text{Na}_2\text{O}$  (меньше  $P_n$ ) тем быстрее наступает процесс коагуляции тем большей реакционной способностью обладает жидкое стекло, тем меньше живучесть смеси (рис. 4.13). С увеличением  $P_n$  возрастает расход отвердителя, так как вначале отвердитель расходуется именно на ту часть  $\text{Na}_2\text{O}$ , которая соответствует порогу коагуляции.

По мнению [95] для жидкого стекла, модифицированного различными добавками, исследование широкого интервала колебаний значений порога коагуляции более надежной характеристикой является не порог коагуляции, а модуль коагуляции  $M_c$ . Под модулем коагуляции предложено понимать массовое отношение шеей кремневой кислоты в жидком стекле к содержанию в нем нейтрализованной части  $\text{Na}_2\text{O}$  в момент начала коагуляции. Модуль коагуляции учитывает модифицирующие добавки, вводимые в жидкое стекло замедляющие или ускоряющие его коагуляцию и влияющие на расход электролита при нейтрализации стабилизирующей части  $\text{Na}_2\text{O}$  (а следовательно и на значение порога коагуляции). Интервал колебаний модуля коагуляции для различных партий жидкого стекла значительно уже порога коагуляции.

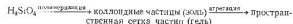
Различают два механизма твердения жидкостекляных смесей:

- 1) за счет выделения из жидкого стекла продуктов, способных связывать зерна песка;
- 2) благодаря удалению влаги жидкого стекла, т. е. вследствие обезвоживания.

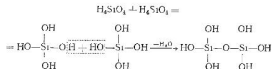
При отверждении по первому механизму в смеси вводят специальные вещества — отвердители. В настоящее время отверждение осуществляется газообразными жидкими и твердыми отвердителями.

Механизм связывания зерен дисперсителя является чрезвычайно сложным и до конца не изученным. Предполагается, что сцепление пленки связующего с зернами происходит за счет их

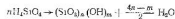
физико-химического взаимодействия, т. е. адгезии. В случае жидкого стекла и кремнезема по-видимому основным видом их взаимодействия является химическая адгезия. Это предположение обосновывается на следующих рассуждениях: во всех процессах химического отверждения смесей с жидким стеклом главную роль играет гель ортокремневой кислоты  $\text{H}_2\text{SiO}_4$ . Образование геля в соответствии с представлениями Кармана осуществляется по схеме\*



В данном случае термин «полимеризация» — образование полимера идущего за счет поликонденсации



и т. д. с образованием димеров, тримеров до исчезновения всех гидроксильных групп, способных взаимодействовать друг с другом. В общем виде



На внешних слоях агрегированных коллоидных частиц всегда остаются непрореагировавшие OH-группы.

Гель ортокремневой кислоты имеет скелетное трехмерное строение, состоящее из агрегированных сферических частиц. Пространство внутри этого скелета заполнено интермедиальной жидкостью — водой. Сцепление сферических частиц осуществляется по тем местам, где гидратная оболочка имеет наименьшую толщину, т. е. по местам наименьшей гидрофильности за счет

образования силоксаных связей  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ . Энергия связи

$\text{Si}-\text{O}$  равна 420–460 кДж/моль. Эта связь по своей природе является промежуточной между ионной и ковалентной.

Одновременно с конденсацией идут процессы взаимодействия моно-ди-, тримеров кремневой кислоты не только между собой, но и с поверхностными слоями зерновой основы смеси. В случае кварцевого песка поверхность частиц которого также покрыта гидроксильными функциональными группами, это взаимодействие

\* Многие марки зарубежных жидких стекол имеют в своем составе до 25% органических интервалов (слабиды, меллеу, крамал и др.)



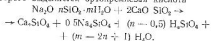
Максимальное значение прочности свойств жидкостекольной смеси наблюдается в момент максимального содержания карбоната натрия. Поэтому увеличение длительности продувки сверхоптимального времени понижает физико-механические свойства смеси pH смеси при этом ниже 10-5 практически не снижается.

Различные слои смеси достигают наибольшей прочности в разное время. Первыми максимальной прочностью приобретают слои наиболее близко расположенные к месту подвода углекислоты. По мере насыщения этих слоев углекислым газом максимум прочности смеси начинает перемещаться в глубь стержня и то время как в первых слоях идет процесс перемещения углекислоты с образованием  $\text{NaHCO}_3$ , что приводит к их разупрочнению. Прочность достигаемая при оптимальном времени продувки является обобщенной, значение которой ниже потенциальных возможностей, когда во всех слоях смеси одновременно могло бы быть достигнуто максимальное ее значение. Это в определенной степени реализуется при отверждении жидкостекольных смесей твердыми, и в особенности жидкими, отвердителями, использование которых приводит к одновременному отверждению смеси во всем объеме стержня или формы.

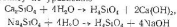
Других газообразных отвердителей жидкостекольных смесей сегодня не существует. Однако в дальнейшем могут быть разработаны иные газовые отвердители при взаимодействии с которыми жидкое стекло будет выделять ортокремневую кислоту.

Жидкостекольные смеси (пластичные и жидкие) отверждают также различными твердыми отвердителями вводимыми в смесь в поронкообразном виде. Такие смеси называют самотвердеющими. В качестве отвердителей используют саморасширяющийся шлак феррохромового производства (феррохромовый шлак), порландцемент, нефелиновый шлак, синтетический двухкальциевый силикат  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , кремнефторид натрия  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ , ферросилиций, карбид кальция, кремний, полуводный гипс  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  антипирен из нефелина, полифосфаты, алюминаты и др.

Механизм отверждения с феррохромовым шлаком, цементом, нефелиновым шлаком и другими материалами содержащими кальциевый силикат, основан на химическом взаимодействии последнего с силикатом натрия и водой жидкого стекла в результате которого выделяется ортокремневая кислота



В свою очередь силикаты кальция и натрия, очевидно, подвергаются гидролизу по уравнению



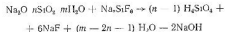
Выделяющаяся ортокремневая кислота конденсируется, образуя трехмерную структуру и связывая зрния наполнителя по ранее рассмотренной схеме.

В определенной степени упрочнение при использовании двухкальциевого силиката может быть объяснено также реакцией



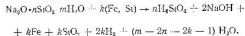
Выделение продукта  $\text{Na}_4\text{Ca} \text{Si}_6\text{O}_{13}$  имеющего высокую вязкость, приводит к усилению связей между зёрнами наполнителя [104].

Механизм отверждения жидкого стекла с кремнефторидом натрия может быть следующим:



Выделению ортокремневой кислоты, связывающей зёрна наполнителя, в данном случае способствует потребность в щелочи, которая удовлетворяется, видимо, за счет условно свободной части  $\text{NaOH}$  жидкого стекла Фторид натрия выделяясь на поверхности зёрен песка в виде тонкой плёнки, способствует уменьшению пригара, а следовательно, улучшению качества поверхности отливок (ион фтора — восстановитель). Кремнефториды — нетоксичные материалы.

Отверждение смесей с использованием ферросилиция носит название Шангяма-процесса в котором идет реакция, условно записанная следующим уравнением



Входящее в состав ферросилиция железо выделяется в свободном виде являясь катализатором пленки связующего водорода образуясь в результате реакции уходит в атмосферу (выделение свободного водорода делает этот процесс взрывоопасным). Реакция экзотермична, что способствует более быстрой дегидратации и отверждению смеси. Видно, подобная реакция идет и в случае использования в качестве отвердителя элементарного кремния.

Антипирен из нефелина (торговое название) представляется собой аммониевые металлофосфаты общего вида



где  $a = 1 \div 1,2$ ;  $b = 0,8 - 1,2$ ;  $c = 3,5 \div 4$ ;  $n = 5 - 7$ . В приведенном составе могут быть соединения типа алюмоаммониевых гидро-



горячим) или каким-то другим газом вакуумированном. При этом жидкое стекло сначала превращается в вязкую жидкость, затем в полутвердую, постепенно переходя в дегидратированное вещество, способное связывать между собой зерна наполнителя. Чем выше силикатный модуль жидкого стекла, тем быстрее протекают указанные превращения. По мере удаления влаги нарастают прочностные свойства смеси. Конечная прочность смеси, обработанной обезвоживанием, по крайней мере на порядок выше, чем при  $\text{CO}_2$ -процессе. Наибольшая прочность смесей имеет место при остаточной влажности, равной 0,3—0,5%. Однако продолжительность технологических операций обезвоживания всегда значительно больше, чем при обработке смеси углекислотой.

#### 4.4 СМЕСИ С СИНТЕТИЧЕСКИМИ СМОЛАМИ

В настоящее время все большее распространение в качестве связующих материалов формируются и строгичных смесей получают различные синтетические смолы. Синтетическими или искусственными смолами называют вещества, получаемые искусственным путем из простых молекул (в отличие от натуральных или природных смол, образующихся в смоловосных растениях или находящихся в ископаемых минералах и некоторых других веществах, извлекаемых из них различными методами).

В процессе синтеза смол реакции до конца не доводят, получая продукты сравнительно низкомолекулярной массы (не более нескольких тысяч). Смолы в таком состоянии называют олигомерами (или преполимерами). Перевод олигомеров в полимеры (конечные синтетические продукты макромолекулы которых имеют молекулярную массу, равную десяткам и сотням тысяч) в литейном производстве осуществляется непосредственно в технологических процессах получения литейных форм и стержней.

Основным процессом протекающим при отверждении смол, является полимеризация или поликонденсация. Необходимым (хотя и не единственным) условием этих реакций является наличие в молекулах исходных веществ активных частей молекул — групп атомов (или отдельных атомов), называемых функциональными. Органическая химия насчитывает около 100 различных функциональных групп. Из используемых в литейном производстве наиболее часто встречаются следующие функциональные

группы —H (водородная), —OH (гидроксильная), —C $\begin{smallmatrix} // & \text{O} \\ & | \\ & \text{OH} \end{smallmatrix}$

(карбоксильная), —C=O (карбонильная), —C $\begin{smallmatrix} // & \text{O} \\ & | \\ & \text{H} \end{smallmatrix}$

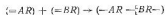
(альдегидная), —C $\begin{smallmatrix} // & \text{O} \\ & | \\ & \text{H} \end{smallmatrix}$ OH (метильная). Реакционная способность функциональных групп зависит только от реакционной способности остальной (как правило,

углеводородной) части молекулы мономера. Число функциональных групп реагирующих молекул определяет тип химического соединения продуктов реакции.

При взаимодействии монофункциональных веществ AR и BR (где A и B — функциональные группы, R — углеводородный радикал) между собой

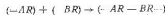


образуются простые химические соединения типа AR—BR. Вследствие насыщения функциональных групп и остановки благодаря этому реакции. Положение не меняется, когда один мономер является моно-, другой — бифункциональным. Если молекулы реагирующих веществ AR и BR бифункциональны то в результате реакции



образуются молекулы типа —AR—BR—, на концах которых остаются функциональные группы с одной ненасыщенной связью, способные к дальнейшему реакции. При этом, если не возникнут циклы (кольцевые группы молекул) и отсутствуют монофункциональные вещества блокирующие концевые группы, реакция на обоих концах может продолжаться до тех пор, пока не иссякнет один (или оба) из реагирующих мономеров. В результате реакции бифункциональных веществ образуются одномерные макромолекулы линейного строения.

При взаимодействии би- и трифункциональных веществ между собой



кроме концевых образуются боковые невязанные связи, которые могут насыщаться как благодаря функциональным группам исходных мономеров так и за счет взаимодействия с соседними подобными группами. Происходит как бы «сшивка» цепей между собой. В результате реакции такого типа образуются трехмерные (пространственные) твердые, нерастворимые и тугоплавкие полимеры. Следовательно, для образования твердой трехмерной структуры макромолекул необходимо, чтобы в реакции участвовал по крайней мере один трифункциональный мономер. При возникновении пространственного полимера возникают текучесть и растворимость получаемого продукта. Если продукт поликонденсации растворяется и течет, то он имеет линейное строение.

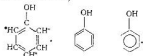
Следовательно, чем выше функциональность мономеров, тем больше скорость реакций (выше жесткость отверждения), тем, кажутся бы, прочнее должен быть образованный полимер. Однако последнее не всегда выполняется. Вследствие высоких скоростей реакции одновременно повышается внутреннее напряжение, часто достигающее предела прочности с образованием трещин и пленки связующего, что приводит к снижению потенциально возможной

прочности. Поэтому наилучшим является сочетание взаимодель ствия би и трифункциональных мономеров. Пленка смолы образованная при притоговлении формовочной смеси прйдид стацию полимеризации или поликонденсации, становится поли мером прочно соединяя между собой отдельные зерна смеси.

В настоящее время наиболее широко используются смолы следующих видов: фенольные, амисольдегидные, фурановые, поливиниловый спирт полууретановые.

К фенольным относят смолы которые получают в результате поликонденсации фенолов и альдегидов. С фенолом конденси руется формальдегид уксусный, масляный и другие альдегиды. Наиболее важное промышленное значение имеют продукты кон денсации фенола с формальдегидом — так называемые феноло-формальдегидные смолы и фенолоспирты.

Фенолами называют соединения, содержащие гидроксил, свя занный с атомом углерода бензольного ядра. Гидроксильное про изводное бензола называют фенолом или карболовой кислотой  $C_6H_5OH$ , имеющим следующую циклическую структурную фор мулу (в разных обозначениях)



Фенол — бесцветное кристаллическое вещество плотностью 1,08 г/см<sup>3</sup>, с температурой плавления 40,9 °С и температурой кипения 182 °С, плохо растворимое в воде обладающее сильным характерным запахом. Атомы водорода в феноле, отмеченные звездочкой, находящиеся в орто- и параположениях способны замещаться углеродной связью, что и предопределяет его высокую реакционную способность. Фенол — трифункциональное соедине ние ароматического ряда.

Альдегидами называют органические соединения, содержащие

альдегидную функциональную группу —  $\begin{matrix} O \\ \parallel \\ C \\ | \\ H \end{matrix}$  Наименование

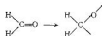
альдегидов происходит по названию кислот от которых они были образованы при окислении. Простейшим из альдегидов является

муравьиный  $H-C(=O)-H$  называемый формальдегидом (формулу —

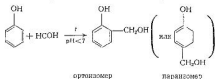
муравей по латыни).

Формальдегид  $HCOH$  — бесцветный токсичный газ имеющий резкий удушливый запах температуры плавления —118 °С кипения —19,2 °С; 37 %-ный водный раствор формальдегида называют формалином. За счет карбонильной группы  $-C=O$

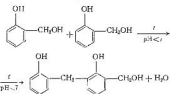
формальдегид, являясь бифункциональным веществом, обладает высокой реакционной способностью, обусловленной раскрытием двойной связи



Фенолоформальдегидные смолы по своим свойствам могут быть термопластичными поволачками и термореактивными резоль ными, что зависит, во-первых, от среды (кислой или основной), в которой протекает реакция и, во-вторых от молекулярного соотношения между фенолом и формальдегидом. Термопластичные поволачковые смолы образуются в результате реакции поликонден сации избытка фенола с формальдегидом в кислой среде при на гретании. При этом на 100 масс ч фенола берут 26—29 масс ч формальдегида (эквимолекулярное соотношение между фенолом и формальдегидом составляет 100 : 32 масс ч.). В качестве ката лизаторы синтеза применяют соляную, цинксерную и другие кис лоты (pH < 7). Последовательность процесса поликонденсации упрощенно можно представить следующим образом. Сначала взаимодействуют между собой фенол и формальдегид с образова нием *o* и *p* изомеров оксисбензильного спирта

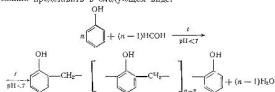


Далее метильные группы одних молекул *o*-оксисбензильного спирта реагируют с атомами водорода в орто-положении других молекул оксисбензильного спирта



Образовавшиеся макромолекулы полиметилфенола связы ваются друг с другом метиленовыми мостиками —  $-CH_2-$ —блага дари взаимодействию атомов водорода орто-положения одних

молекула с метиловыми группами других. Обобщенно эти реакции можно представить в следующем виде:



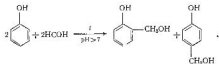
Результатом всех реакций является смола с линейной структурой.

Термореактивные резольные смолы получают при избытке формальдегида при нагревании поликонденсацией с фенолом в основной среде ( $\text{pH} > 7$ ). В этом случае на 100 масс. ч фенола берут 37—44 масс. ч формальдегида и 1,0—1,5 % NaOH в качестве катализатора синтеза (иногда используют другие основания).

В реакциях поликонденсации фенола и формальдегида, протекающих в данных условиях, различают три стадии: резольную (начальная стадия *A*), резольную (промежуточная стадия *B*) и резитную (окончательная стадия *C*).

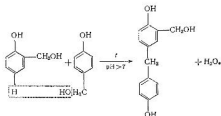
Резол является жидким растворимым полимером со средней молекулярной массой до 1000. Резитол не плавится, но немного размягчается при температуре 120—150 °C, частично растворяется или набухает под действием растворителей. Резит — хрупкий, твердый неэластичный и нерастворимый продукт поликонденсации. Следовательно, по мере перехода из одной стадии в другую, уменьшаются растворимость и плавкость смолы: она постепенно переходит из жидкого через эластичное в твердое состояние, становится прочной и водостойкой.

На стадии *A* полимер приобретает линейное строение, на стадии *B* — двухмерное, на стадии *C* — трехмерное пространственное. Описать ход реакций отдельных стадий с помощью химических формул довольно сложно. Между стадиями трудно провести определенную границу. Схематично весь процесс можно представить следующим образом: при взаимодействии фенола с формальдегидом сначала образуются *o* и *p* изомеры оксисбензилового спирта

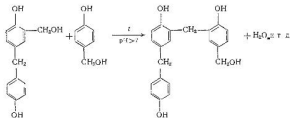


Стадия *A* протекает примерно так же, как и у новалаков

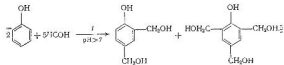
В стадии *B* орто- и пара изомеры взаимодействуют между собой



Далее

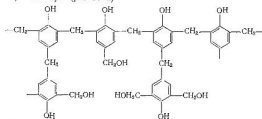


При избытке формальдегида в щелочной среде кроме *o* и *p* изомеров оксисбензилового спирта образуются также ди- и три-метильные производные фенола (часть молекул фенола оказывается непрореагировавшей)

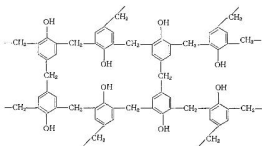


Эти реакции, видимо, следует отнести к стадии *B*. Поликонденсации оксисбензиловых спиртов с ди- и триметильными про-

изводный фенола приводит к образованию разветвленного (плоского) полимера (резитола)



На стадии С образуется конечный продукт — резит имеющий пространственную структуру.



В структуре резита значительно больше поперечных связей, чем в резитоле, причем в резитоле пространственная связь может осуществляться не только метиленовыми мостиками, но и атомами водорода (H-связь). Полимер стадии С сохраняет свою твердость до температуры 250—280 °С при более высокой температуре начинает разрушаться (распадается под действием теплоты при более высокой температуре).

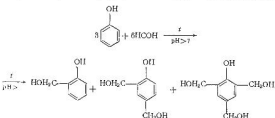
Срок хранения олигомеров термopластичных новолачных смол значительно выше чем термopреактивных резольных. Поэтому часто используют новолачные смолы, переводя их в резольные непосредственно в технологическом процессе изготовления формы или стержней. Одним из способов такого перевода является применение в качестве отвердителя гексаметиленотетрамина  $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$  (ГМТА или уротропина).

Точного механизма реакции между новолачком и уротропином пока не установлено. В соответствии с одной из гипотез уротропин при нагревании разлагается



Вода появляется за счет поликонденсации фенола и формальдегида, с которыми смешивается уротропин перед употреблением. В результате приведенной реакции, как видно, появляется избыточный формальдегид, а образующийся аммиак создает основную среду т. е. разложение уротропина при нагревании приводит к условиям, в которых термopластичная новолачная смола переходит в термopреактивную резольную.

Фенолоспирты называют смесь орто изомера оксбензольного спирта, ди- и триметильных производных фенола, образующую в щелочной среде при избытке формальдегида по реакции



Фенолоспирты являются первичными продуктами (олигомерами) поликонденсации фенола с формальдегидом резольного типа. При получении этих смол молярное отношение фенола к формальдегиду составляет 1,15 — 1,2,3. В качестве катализаторов используют едкий натр 1,5—3 масс ч на 100 масс ч фенола.

Фенолоспирты являются исходными продуктами для синтеза других смол и также используются непосредственно в качестве связующего материала при изготовлении стержней чугунолитейного и стального литья. При поликонденсации в фенолоспиртах также имеют место стадии А, В и С.

Аминоальдегидными смолами называют продукты поликонденсации формальдегида с карбамидами (карбамидоформальдегидные смолы) меламином (меламиноформальдегидные смолы) и с их смесями (карбамидомеламиноформальдегидные смолы).

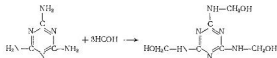
Карбамид (или техническая мочевина)  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  — кристаллическое вещество без цвета и запаха плотностью 1,335 г/см<sup>3</sup>.



Как видно, связь осуществляется метиленовыми группами  $-\text{CH}_2-$ .

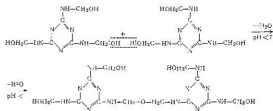
Приведенные формулы иллюстрируют обилие азота в структуре продуктов поликонденсации карбамада и формальдегида, который выделяется при термодеструкции, может вызывать образование сетчатой азотистой пористости.

Взаимодействие меламина с формальдегидом в нейтральной или слабощелочной среде (рН = 7—8) на первой стадии приводит к образованию метилломеламина, содержащего от одной до шести метиленовых групп  $-\text{CH}_2\text{OH}$ . При низких температурах (до 40 °С) обычно образуется триметилломеламин



Метилломеламины, содержащие большее число метиленовых групп образуются при более высоких температурах в условиях избытка формальдегида (для получения гексаметилломеламина необходим избыток формальдегида до 12 молей на 1 моль меламин).

Меламиноформальдегидный олигомер образуется в кислой среде при дальнейшем взаимодействии молекул метилломеламина между собой



Как видно, здесь имеет место эфирная связь  $-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2-$ . В приведенной реакции для простоты показано взаимодействие только одной метиленовой группы каждой молекулы метилломеламин. Две другие функциональные группы могут взаимодействовать с другими подобными молекулами, образуя сложную пространственно-циклическую структуру.

Меламиноформальдегидные олигомеры можно отверждать при нагревании и на холоду в присутствии катализаторов (целлюлоза

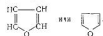
содяная, фосфорная кислота, хлорид аммония, цинка и др.) Меламин обладает большей функциональностью чем карбамид, поэтому в меламиноформальдегидных смолах больше поперечных связей (сшивок) их полимеры имеют более разветвленное строение, чем полимеры карбамидоформальдегидных смол. В связи с этим после отверждения меламиноформальдегидные смолы обладают более высокими прочностью, водо- и теплостойкостью по сравнению с карбамидоформальдегидными.

В промышленности находят применение меламинкарбамидоформальдегидные смолы, так как часть меламин заменяется карбамидом ввиду его меньшей стоимости по сравнению с меламином.

**Фурановыми** называют смолы, в которых содержатся фурановые кольца. Такими являются смолы, в основе которых лежат фурфурол или фурфуральный спирт. К фурановым иногда относят также фенолоформальдегидные, аминоформальдегидные и другие смолы, модифицированные фурфуроловым спиртом.

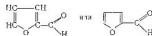
Фуран (иначе фурфуран)  $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}$  — бесцветная малорастворимая в воде жидкость, по запаху напоминающая хлороформ, плотностью 0,937 г/см<sup>3</sup>, температуры плавления 85,68 °С и кипения 31,33 °С.

Структурная формула фурана



Фуран — пятичленный гетероцикл (четыре атома углерода и один гетероциклический атом кислорода) является химически неактивным веществом, получаемым из фурфурола.

Фурфурол  $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_2$  — бесцветная жидкость плотностью 1,16 г/см<sup>3</sup> с температурами плавления 36,5 °С и кипения 162 °С с запахом свежеиспеченного хлеба. Фурфурол легко окисляется под действием воздуха и света и приобретает окраску от соломенно-желтой до темно-коричневой в зависимости от продолжительности хранения, растворяется в воде, спирте эфире; летуч с водяным паром горюч. Фурфурол является фурановым альдегидом, имеющим следующую структурную формулу:

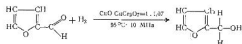


Эмпирическая формула фурфурола была установлена при получении его гидролизом из отрубей (Furfur — нем.), откуда и произошло его название.

В настоящее время фурфурол является наиболее доступным и дешевым материалом синтеза фурановых солов получаемых на пентозаносодержащего растительного сырья путем его термической обработки в водной или паровой кислой среде. Фурфурол можно получать из хлопковой шелухи, подсолнечной и овсяной лузги кукурузных початков, шелухи проса, риса, соломы ржаной, пшеничной, рисовой, овсяной, костры льна и конопли, камыша, лесосеочных отходов. Некоторое количество фурфурола получают как побочный продукт спиртового гидролизного производства из древесины а также при производстве кормовых дрожжей. По свидетельству Л. А. Пономарева, пентозаносодержащее сырье занимает пятое место вслед за нефтью каменным углем, природным газом и целлюлозой. Поэтому при соответствующем уровне производства фурфурола может явиться наиболее дешевым и легко доступным связующим материалом.

Для литейного производства большое значение имеет также производная фурфурола — фурфуриловый спирт  $C_5H_8OCH_2OH$  чаще называемый фурфурилом, получаемый каталитическим гидрированием фурфурола.

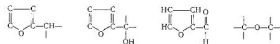
При гидрировании имеет место раскрытие двойных связей альдегидной группы по реакции



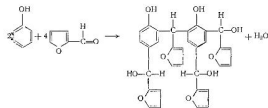
Двойные связи фуранового кольца (две связи) альдегидная функциональная группа в фурфуроле, гидроксильная группа в фурфуриловом спирте являются причиной исключительно высокой реакционной способности фурфурола и фурфурилового спирта при наличии катализаторов (кислоты хлориды и др.) или при повышенной температуре. Эти вещества легко взаимодействуют с фенолом, ацетоном формальдегидом, карбамидом и другими материалами. Вид этих реакций очень сложен до конца не изучен. Поэтому в химии полимеров реакции фуранового кольца с другими веществами, как правило, показывают только в начальной стадии.

Рассмотрим некоторые из них.

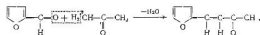
Фурфурол конденсируется при наличии катализаторов ( $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{BCK}$  и др.), превращаясь в неплавкий и нерастворимый полимер состоящий из группировок



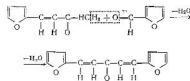
Реакция фурфурола с фенолом идет с участием альдегидной группы фурфурола и активных атомов водорода фенола



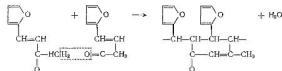
В реакциях поликонденсации фурфурола с ацетоном сначала идет образование монофурфурилденацетона



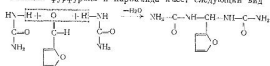
Затем к монофурфурилденацетону присоединяется молекула фурфурола, образуя дифурфурилденацетон, и т.д.



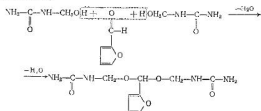
При наличии катализатора при нагревании до температуры  $50-70^\circ\text{C}$  монофурфурилденацетон переходит в плавкие олигомеры



Реакция фурфуrolа и карбамида имеет следующий вид

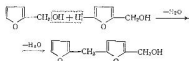


Покажем реакцию поликонденсации фурфуrolа, формальдегида и карбамида. Как уже отмечалось, формальдегид и карбамид вступая во взаимодействие между собой на первой стадии образуют метилсоломоочевину. Фурфуrol связывает гидроксильные группы —OH метильных остатков  $\text{CH}_2\text{OH}$  метилсоломоочевины, повышая тем самым водостойкость карбамидоформальдегидной смолы.

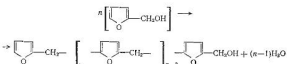


Такое совмещение карбамидоформальдегидных смол с фурфуrolом повышает их термостойкость, снижает содержание азота, улучшает физико-механические и технологические свойства формовочных смесей.

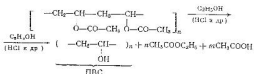
Реакция поликонденсации фурфуrolового спирта



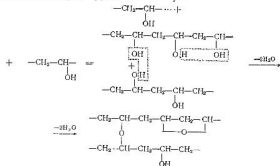
Данная реакция идет до конца. В общем виде



Поливиниловый спирт (ПВС) получают омылением поливинилацетата в спиртовом растворе с помощью кислот ( $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) или щелочей:



При омылении полимер понижает свою растворимость в спирте, осаждается вследствие этого в виде бесцветного (белого) порошка или гелеобразной массы (в зависимости от условий проведения реакции). При нагревании выше  $100^\circ\text{C}$  увеличивается молекулярная масса ПВС. Процесс поликонденсации ускоряется при введении диалевольной или фосфорной кислоты, карбамида, уротропина и некоторых других катализаторов.



Полимеры, в основных звеньях цепи которых наряду с атомом углерода содержится кислородные мостики —O— называют гетероцепными простыми полиэфирами. Если в основную цепь

входит группа  $\begin{array}{c} \text{O} \\ | \\ \text{C} \\ | \\ \text{O} \end{array}$ , то такие полимеры относят к гетероцепным сложным полиэфирам. К последней категории веществ относятся алкидные полимеры и полиуретаны, применяемые в лицевом производстве в качестве связующих, а также некоторые другие материалы.

Алкидные смолы являются продуктами взаимодействия глицерина с фталевыми кислотами или их ангидридами

Глицерин (трехатомный спирт) имеет брутто-формулу  $C_3H_8O_3$ , его структурная формула



Глицерин представляет также в виде  $\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}_2-\text{OH}$  или  $\text{HOCH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{OH}$

Фталевые кислоты представляют собой продукты окисления ксилолов (диметилбензолов) общей формулы  $C_6H_4(\text{CH}_3)_2$ . Ксилолы имеют три изомера (орто-, мета-, пара-)



О ксилол

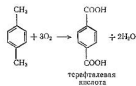
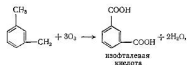
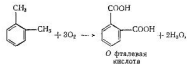


М ксилол

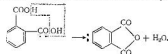


П ксилол

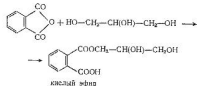
При окислении получают соответственно следующие бензоилдикарбоновые кислоты:



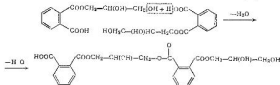
Реакции поликонденсации алкидных полимеров покажем на примере О фталевой кислоты. При нагревании этой кислоты получается фталевый ангидрид (идет процесс дегидратации)



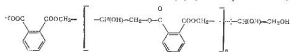
Поликонденсации глицерина и фталевого ангидрида приводит к образованию глифталеских или алкидных полимеров. Конденсация идет в две стадии. На первой стадии образуются кислые эфиры



На второй стадии идет реакция между кислыми эфирами



В соответствии с приведенными реакциями сначала образуется низкомолекулярная вязкая смола содержащая реакционные функциональные группы  $-\text{OH}$  и  $-\text{COOH}$ , переходящая затем в твердое неплавкое состояние, общая формула которой имеет вид



Чистый глицеринофталеский полимер является хрупким нестойким в воде материалом. Для устранения этого алкидные полимеры модифицируют высыхающими маслами типа льняного. С этой целью при синтезе алкидных олигомеров предварительно

проводят глициролиз модифицирующих масел при нагревании. Продукты глициролиза (моноглицериды) используют при поликонденсации с фталевым ангидридом, получая в результате так называемые алкидно-масляные олигомеры.

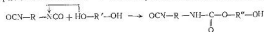
В настоящее время синтезируют алкидные полимеры различного химического строения. В некоторых случаях вместо глицирина при поликонденсации фталевого ангидрида используют пентаэритрит  $C(CH_2OH)_4$  — продукт конденсации уксусного альдегида и формальдегида в водном растворе в присутствии щелочи. Пентаэритрит реагирует с двухатомными кислотами более энергично, чем глицерин, вследствие чего быстро наступает гелеобразование. В целях предотвращения гелеобразования полипентаэритрифталаты модифицируют высшихатомными маслами. Благодаря более высокой функциональности пентаэритрита по сравнению с глицерином возможно использовать для модифицирования алкидных олигомеров значительно большие объемы масел и даже заменять высыхающие масла на не высыхающие в результате чего достигается большая эластичность получаемых полимеров.

Вместо фталевого ангидрида возможно также применение изофталевой или терефталевой кислоты. При этом получают полимеры, обладающие большей термостойкостью. Существуют и другие возможности синтеза алкидных смол.

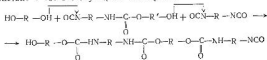
Полиуретанами называют гетерогенные высокомолекулярные соединения с повторяющимися уретановыми группами  $-COONH-$  в основной цепи макромолекулы. Полиуретановые соединения образуются сополимеризацией многоатомных спиртов (смол) и диизоцианатов (отвердителей).

Одним из видов многоатомных спиртов являются диолы (или гликоли)  $HO(CH_2)_nOH$ ,  $HO(CH_2)_nOH$  и т.д. общей формулы  $HO-R'-OH$  ( $R'$  — двухвалентный радикал). Диизоцианатами являются  $OCN-(CH_2)_n-NCO$ ,  $OCN-(CH_2)_n-NCO$  и т.д. общей формулы  $OCN-R-NCO$ .

Реакцию полимеризации диолов с диизоцианатами при молекулярном соотношении 1 : 1 можно представить следующей схемой:

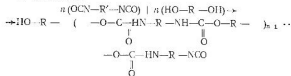


Далее концевые функциональные группы вступают во взаимное действие с соответствующими молекулами



И т.д.

В общем виде



Как видно сополимеризация идет по ступенчатому механизму с переходом ионов водорода гидроксильной группы диола к иону азота диизоцианата на каждой ступени. При этом постепенно нарастает вязкость смолы.

Различные соотношения между диизоцианатами и диолами и использование их с различными радикалами  $R$  и  $R'$  дают самые разнообразные продукты сополимеризации. При взаимодействии бифункциональных соединений образуются линейные полурезины, а трифункциональные соединения дают сополимеры пространственной структуры, образуя в конечном счете термореактивный полимер.

В настоящее время в той или иной степени используются или находятся в стадии исследования следующие виды полиэфирных смол: безводные фенолуретановые, алкидные масляно-уретановые; алкидно-уретановые на основе ароматических олигоэфиров; дианолатов и сополимеров стирала отверждаемые продувкой аминами, например триэтиламином и др.

В качестве катализаторов отверждения (иначе отвердителей) смесей, содержащих синтетические смолы, исходя из физико-химического механизма катализа могут использоваться вещества, обладающие следующими свойствами:

- 1) способностью растворяться в смолах в неограниченных объемах, следовательно катализаторы должны иметь структурное сходство со смолами;
- 2) наличием ионов водорода, которые, взаимодействуя с OH группами молекул смол, могут образовывать конденсационную воду например в реакции



метильные (монофункциональные) группы смол под воздействием протонов преобразуются в метильные (бифункциональные) сшивая остатки реагирующих молекул;

- 3) сравнительно большим кислотным числом.

Эти три условия необходимы, но недостаточны. В качестве катализаторов нельзя применять сильные минеральные кислоты вследствие очень большой скорости реакций отверждения. Увеличение каталитической скорости отверждения приводит к повышению конечной прочности смеси и большему ее разупрочнению после



Рис. 4.16. Структура БСК (а), ТСК (б) и XBSK (в)

процесс перемешивания тем больше прочность смеси) С другой стороны в качестве катализаторов не применяются и слабокислотные соединения вследствие очень низкой скорости реакций отверждения при нормальных температурах

Вид катализатора зависит от конкретных условий производства (серийность, род металла, масса отливок и т. д.) В настоящее время наиболее широко используются следующие катализаторы: бензосульфокислота (БСК), пара-толуолсульфокислота (п-ТСК), пара-хлорбензолсульфокислота (л-ХБСК), ортофосфорная кислота (ОК), хлориды железа, аммония, цинка и многие другие катализаторы. Структура некоторых катализаторов представлена на рис. 4.16

С точки зрения скорости отверждения лучшим растворителем катализатора будет такой, молекулы которого не присоединяют к себе протоны. Отсюда чрезвычайно важный вывод — растворителем катализатора не должна быть вода, образующая с ионом водорода гидроксильный



На практике во многих случаях поступают вопреки теории, привлекая воду в качестве растворителя катализаторов, и только в редких случаях для этих целей используют растворители с котормы протон не реагирует

Масса катализатора обычно составляет 25—33 % от массы смолы. Для повышения связующей способности смол и вследствие этого — уменьшения их расхода синтетические смолы подвергают *модифицированию*. В настоящее время для этих целей используют силаны, к которым относят гидриды кремния общей формулы  $\text{Si}_n\text{H}_{2n+2}$ , а также производные простейшего из кремневодородов — моносилана  $\text{SiH}_4$ , получаемые замещением атомов водорода другими атомами или группами атомов. Следовательно, силанами являются многочисленные кремнеорганические соединения

Из множества силанов для упрочнения смесей могут быть использованы такие, молекулы которых содержат две различные по химической природе группы атомов. Одна из этих групп должна взаимодействовать со смолой, содержащейся в смеси в качестве связующего материала, другая — обладать хорошей адгезией к зернистой основе (за счет взаимодействия с OH-группами)

достижения максимума прочностных свойств. К тому же еще в процессе перемешивания смеси образуются высоконапряженные хрупкие структуры, которые в этот период необратимо разрушаются. Данное обстоятельство вынуждает применять все более быстрые смеси для приготовления смесей (и вообще для связующих полимеризационного или поликонденсационного отверждения тем выше скорость и короче цикл перемешивания тем больше прочность смеси). С другой стороны в качестве катализаторов не применяются и слабокислотные соединения вследствие очень низкой скорости реакций отверждения при нормальных температурах

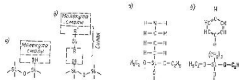
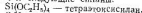


Рис. 4.17. Связь адгезии смолы к поверхности кремнезема без силана (а) и с силаном (б)

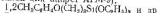
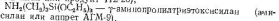
Рис. 4.18. Структурные формулы силана АГМ-9 (а) и продукта 112-23 (б)

В общем виде силаны применяются для модифицирования смол, записывают формулой  $\text{R}'\text{SiR}$ , где  $\text{R}'$  — функциональная группа, соединенная с атомом кремния через пропильный радикал  $-(\text{CH}_2)_3$ ,  $\text{R}$  — этокси-группа или этоксильный радикал  $-(\text{OC}_2\text{H}_5)$ , который иногда показывают в виде OR. Предпочтуют [35, 100], что силаны при модифицировании смол являются как бы промежуточным звеном между материалом зернистой основы и связующим, т. е. смолой (рис. 4.17). При этом в случае модифицирования значительно усиливается адгезионная составляющая прочности смесей

В литейном производстве в той или иной степени используют следующие силаны:



$\text{C}_6\text{H}_5\text{O}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$  —  $\gamma$ -фенилпропилтриэтоксисилан (фелосилан или продукт 112-23),



В качестве примера на рис. 4.18 показаны структурные формулы двух силанов

Силаны склонны к гидролизу. Модифицирование (или силанизация) смол, содержащих воду, задолго до употребления приводит к потере модифицирующего действия. Поэтому силанизацию необходимо выполнять перед употреблением, т. е. непосредственно в условиях литейного цеха

Добавка силана 0,05—0,3 % от массы смолы повышает прочность смесей в 1,5—3 раза. Это дает возможность при использовании обогащенного кварцевого песка снизить содержание смолы в смеси до 0,8—1,2 % от массы зернистой основы, что, в свою очередь, улучшает газотворность и связанные с ней другие свойства смеси. Не все смолы в одинаковой степени склонны воспринимать модифицирующее воздействие.

Основной задачей в области модифицирования смол на ближайшее будущее является отыскание недорогих модификаторов для всех используемых смол без потери модифицирующего действия в условиях длительного (несколько месяцев) хранения

## 5.1 ФОРМИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ

Исследования атмосферы литейной формы можно условно разделить на физико-механические и физико-химические. Первым направлением работ является изучение кинетики газовой выделенной и полей газового давления в форме, фильтрации газов и связанных с этой группой вопросов образования раковин в отливках. Исследователем данного направления больше интересуют вопросы количества выделяемых газов (независимо от состава) и кинетики их перераспределения по литейной форме. В работах второго направления решаются вопросы связанные с его качеством, химическим составом и химическим взаимодействием как с материалом формы так и отливки. Больше внимания уделяется химической стороне вопроса получения отливок без пригара плен и других дефектов отливок.

На рис. 5.1 представлена классификация процессов газообразования в литейной форме. Эти процессы протекая практически одновременно имеют различную природу. Как справедливо считает Я. И. Медведя они «сливаются друг с другом» что затрудняет исследование каждого процесса в отдельности. Поэтому при изучении газового режима литейной формы сталкиваются с обобщенным процессом образования газов, который является результатом одновременного протекания индивидуальных процессов».

Мощность отдельных процессов газообразования а следовательно и состав образующейся атмосферы литейной формы зависят от состава и массы формовочной смеси, времени от начала заливки металла температуры прогрева формы и некоторых других факторов. По данным Я. И. Медведя в табл. 5.1 приведена ориентировочная мощность различных процессов газообразования в зависимости от вида форм. На основе классификации (рис. 5.1) рассмотрим более подробно протекание отдельных процессов газообразования в литейной форме при производстве отливок на железной основе.

Химические реакции газообразования могут протекать в формовочной или стержневой смеси в металле и на границе раздела



Рис. 5.1 Классификация процессов газообразования в литейной форме

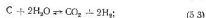
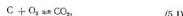
Таблица 5.1. Ориентировочная количественная оценка различных процессов газообразования в литейной форме (% от общего объема газов)

Процесс	Вид форм		
	Сырье	Сухие	Обложковые
Испарение влаги свободной	30—50	8—12	3—5
Испарение влаги связанной в состав минералов	0,5—8	15—25	0,5—2
Горение	2—3	5—8	2—10
Сублимация	30—40	45—65	80—90
Разложение минералов — кристаллов	1—5	1—5	1—2
Диссоциация газов	6—10	8—12	10—15
Расширение воздуха	До 0,5	До 1	До 0,5

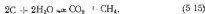
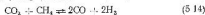
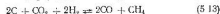
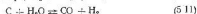
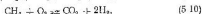
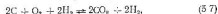
металл—форма. Характер реакций естественно различен в различных частях формы и в разные моменты времени т.е. можно говорить об определенном поле атмосферы формы (поле газовой фазы).

Разберем протекание химических реакций без участия металла, т.е. таких которые идут в глубинных частях формы. Анализировать будем обобщенную формовочную смесь состоящую из зерновой основы органических связующих технологических добавок и влаги. Любой дисперсный материал каковым является зерновая основа литейной формы в порах содержит кислород и азот в виде воздуха. Органические связующие материалы и технологические добавки при нагреве подвергаются термодеструкции, выделяя главным образом водород, оксид углерода, метан (иногда некоторые другие компоненты). Благодаря химическим реакциям, протекающим в форме образуются оксид и диоксид углерода, метан и другие составляющие, поэтому в большинстве случаев реагирующая смесь состоит из:  $C$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2$ .

Положим, что азот воздуха пор в выделяемый из органических материалов (если таковой в них имеется) в реакцию участия не принимает, являясь нейтральным элементом. Приведенная смесь газов может дать следующие базисные реакции



Базисные реакции — не единственно возможные в рассматриваемой системе. Различные сочетания их могут дать следующие реакции



На основе расчетов по второму приближению (см п 5.2) построены графические зависимости изобарных потенциалов от температуры базисных реакций и их сочетаний (рис 5.2). Следует заметить, что при отсутствии аллотропических и других превращений зависимости  $\Delta Z^0 = \varphi(T)$  носят линейный характер.

Проанализируем поведение отдельных компонентов газовой атмосферы и формовочной смеси. Предположим следующее:

1) в реакциях участвует только кислород воздуха пор смеси и выделяющийся из органических материалов смеси, иначе он не поступает;

2) все основные реакции начинаются при температуре выше 373 К;

3) система реагирующих компонентов находится в равновесном состоянии.

Как видно из рис 5.2, все химические реакции можно разделить на идущие с участием свободного кислорода и без него. Абсолютные значения изобарных потенциалов прямых реакций первой группы значительно выше чем для реакции второй группы. Это свидетельствует о том, что в первую очередь идут реакции в которых принимает участие свободный кислород. В самом начале процесса нагрева формовочной смеси кислород интенсивно реагирует с окружающими его молекулами углерода (базисная реакция (5.1)). Никакие другие реакции (не считая термодеструкции) в этот период не идут. Ввиду отсутствия CO и H<sub>2</sub> на начальной стадии нагрева реакций (5.6) (5.9) и подобных им хотя эти

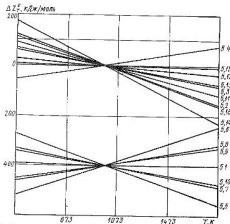


Рис. 5.2 Изменение изобарно изотермических потенциалов  $\Delta Z^0$  реакции атмосферы формы от температуры (цифры у кривых — номера реакций)

реакции в данный момент имеют более низкое значение  $\Delta Z^0$ , чем реакция (5.1). По-видимому весь кислород расходуется в соответствии с реакцией (5.1). Возможных других реакций свободного кислорода коснемся ниже при рассмотрении поведения прочих компонентов атмосферы. Следовательно содержание кислорода в атмосфере литейной формы будет непрерывно снижаться от 21 % практически до 0 в самый начальный момент взаимодействия.

Диоксид углерода в атмосфере формы начинает появляться тогда, когда начинается взаимодействие по реакции (5.1) т.е. в самый начальный момент прогресса формовочной смеси. После окончания этой реакции в связи с уменьшением свободного кислорода рост CO возможен главным образом за счет взаимодействия CO (который неустойчив до температуры примерно 980 К) с другими компонентами [см реакции (5.2), (5.12)—(5.14)]. Некоторое увеличение диоксида углерода может быть получено в результате реакций (5.3) и (5.16). Реакции (5.6) (5.7), (5.9) и (5.10) мало вероятны ввиду отсутствия CH<sub>4</sub>, CO и H<sub>2</sub> в присутствии свободного кислорода. Рост CO сначала должен опережать рост CO<sub>2</sub>, так как термодинамическая ситуация при низких температурах такова, что в соответствии с рядом реакций CO расхо-

дугается на образование  $\text{CO}_2$  (о чем отмечено выше). По мере роста температуры ситуация меняется — термодинамически становится возможным протекание реакций образования  $\text{CO}$  за счет  $\text{CO}_2$  и других компонентов. Поэтому содержание  $\text{CO}_2$ , достигнув максимума, с дальнейшим ростом температуры должно падать. Максимальное содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере литейной формы должно наблюдаться до температуры, равной 980 К. Подъем температуры выше указанной должен приводить к полному исчезновению  $\text{CO}_2$  в соответствии с реакциями (5.2) (5.12) и др.

Оксид углерода должен появляться в составе газов после практически полного удаления кислорода, когда начинает выделяться свободный водород. При низких температурах в присутствии кислорода в соответствии с реакцией (5.6), имеющей в данный момент минимальный изобарный потенциал, появление  $\text{CO}$  термодинамически невозможно. Оксид углерода вначале появляется в результате взаимодействия предельных углеводородов с парами воды, которые в этот момент практически всегда имеются в составе атмосферы формы, о чем пойдет речь в дальнейшем. Однако в этот период  $\text{CO}$  интенсивно расти не может, так как он легко вступает во взаимодействие с другими компонентами и разлагается [см. реакции (5.2), (5.12), (5.14)]. Интенсивный рост  $\text{CO}$  должен начинаться при достижении температуры 965 К [в соответствии с реакцией (5.14)] после чего интенсивность возрастает еще больше [см. реакции (5.2), (5.11) и др.]. Рост  $\text{CO}$  должен набрать đà до полного исчезновения  $\text{CO}_2$ , после чего содержание  $\text{CO}$  стабилизируется. Однако реакция (5.11) при наличии паров воды в атмосфере может несколько повысить содержание  $\text{CO}$ .

Водород в начальный момент процесса отсутствует. Сначала он появляется в результате термодеструкции связующего материала и других технологических добавок органического происхождения входящих в состав формовочной смеси (см. реакцию п. 5.1). Если к моменту начала термодеструкции в атмосфере еще имеется свободный кислород, то водород в свободном виде будет отсутствовать вследствие его горения по реакции (5.8), имеющей до температуры 980 К более низкое значение  $\Delta Z$ , чем реакция (5.1). В связи с этим можно отметить, что в составе атмосферы литейной формы теоретически невозможно сосуществование в сколь-нибудь значительных количествах кислорода и водорода. Свободный водород в атмосфере появляется тогда, когда кислород в ней практически полностью отсутствует.

По мере роста температуры, во-первых, ускоряется процесс термодеструкции, поставившей во все больших объемах водород во вторых, повышается термодинамическая возможность генерации водорода за счет других реакций. Температура 980 К должна быть началом прекращения интенсивного роста содержания водорода.

Рост содержания водорода должен прекращаться с полным выходом из сферы реакции метана.

Свободный метан появляется в составе атмосферы после удаления из нее кислорода, когда начинает выделяться в свободном виде водород. Метан возникает в результате реакции (5.4), идущей в прямом направлении до температуры 930 К, обратных реакций (5.14), (5.16) до температуры 960 и 965 К соответственно. Начиная с температуры 930 К вступает в силу обратная реакция (5.4) при еще более высоких температурах — другие реакции, в результате которых содержание метана в атмосфере должно понижаться. Поэтому максимальное содержание метана видимо, будет наблюдаться до температуры 930 К. При дальнейшем ее повышении метан полностью должен исчезнуть из атмосферы формы [см. реакции (5.14) и (5.16)].

Во многих реакциях атмосферы формы большое участие принимают пары воды. При температуре 373 К будет иметь место скачкообразное повышение содержания паров воды в атмосфере газов. С дальнейшим повышением температуры содержание паров воды сначала тоже может расти в связи с испарением капиллярной влаги и также вследствие удаления из минералов кристаллической воды (если таковая имеется в материалах зернистой основы); испаряется адсорбированная вода. По мере дальнейшего роста температуры испаряется также кристаллизационная и конституционная влага минералов, входящих в состав огнеупорного наполнителя. Рост паров воды будет иметь место также вследствие ряда химических реакций [см. реакции (5.3) (5.15), (5.16) и др., идущие в обратном направлении до температуры 960 980 и 1415 К соответственно]. Максимальное содержание влаги видимо можно наблюдать в интервале температуры 400—900 К после чего будет иметь место резкое его падение.

Азот воздуха является разбавителем других газов литейной формы. Азот образований в результате термодеструкции азотсодержащих материалов, растворяется в металле покая тем самым вероятность образования поверхностной газовой пористости. Содержание азота в составе атмосферы формы, если его нет в органической составляющей смеси с ростом температуры постепенно будет падать вследствие увеличения объема других газов и также благодаря выносу его за пределы литейной формы.

Кроме разбавленных газов в атмосфере формы в отдельных случаях могут также присутствовать  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$  и некоторые другие. При этом  $\text{NH}_3$ , попадая в газовую среду например в результате термодеструкции карбамида сам диссоциирует на азот и водород.

Сугубо окислительная атмосфера низких температур благодаря реакциям взаимодействия между компонентами атмосферы и формовочной смеси постепенно превращается в восстановительную при температурах выше 1200 К. Однако необходимо заметить, что такая ситуация возможна только при условии полного протекания всех химических процессов до равновесного состояния. На практике всегда могут иметь место отклонения от равновесия, что при-

водит к изменению соотношения между отдельными компонентами атмосферы. Наличие фильтрация газов в формовочной смеси, естественно, нарушает представляемую здесь картину атмосферы литейной формы.

В качестве связующих материалов в других технологических добавках в смесях могут присутствовать различные органические материалы: синтетические смолы, синтетические лицевые полимеры (полиэтилен, поливинилбутираль и др.), лигносульфонаты (СДБ и др.), полисахариды (меласса, декстрин и др.), а также льняное масло, олифа и др. По химической природе они состоят из углерода, водорода, кислорода, диоксида серы, сероводорода, аммиака и некоторых других веществ.

Д. М. Колотило [43] установил, что объем газа  $V$  (см<sup>3</sup>), образующегося при термодеструкции 1 г органического материала при температуре  $T$  (К), можно определить по формуле

$$V = m \cdot 10^3 (22,4 + 0,0827T), \quad (5.17)$$

где

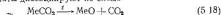
$$m = 0,01 \sum G_i/M_i,$$

Здесь  $G_i$  — массовое содержание элемента  $i$  в органическом веществе, %;  $M_i$  — атомная масса элемента  $i$ .

Формула (5.17) носит ориентировочный характер, но приближенно расчеты по ней выполнять можно. Расчеты [47] показали, что при температуре 1673 К 1 г органических материалов выделяет 5500—8800 см<sup>3</sup> продуктов деструкции. Эти данные свидетельствуют о том, что термодеструкция является модным процессом газообразования в литейных формах, особенно со связующими на синтетических смолах.

Кроме газообразных продуктов в процессе термодеструкции органических материалов выделяется конденсированный пироуглерод, осаждающийся на поверхности зерен огнеупорной основы.

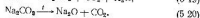
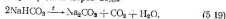
Другим физико-химическим процессом газообразования в литейной форме являются реакции термической диссоциации. В результате разложения молекул на несколько более простых молекул или атомов при нагревании, степень которой при этом возрастает. К материалам, диссоциирующим при повышении температуры с выделением газов, можно отнести карбонаты (кальцит, магнезит, сидерит, сода и т. п.), технологическую воду и воду, входящую в структуру формовочных глин, и др. В общем виде под действием теплоты карбонаты диссоциируют по схеме



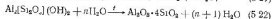
Температурный интервал диссоциации и количество выделяемого газа 1 г карбоната приведены ниже

Карбонат	Температура, К	Объем CO <sub>2</sub> , см <sup>3</sup>
Кальцит	1130—1283	294
Магнезит	933—983	266
Сидерит	886	193
Сода	823—1123	211

Диссоциация бикарбоната натрия, имеющегося в смесях с жидким стеклом, продуваемых углекислотой, сопровождается выделением диоксида углерода и паров воды



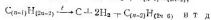
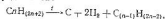
Значительную долю в атмосферу формы может вносить парообразная влага, входящая в состав формовочных глин в виде связанной воды при диссоциации алюмосиликатов. Потери при прокаливании каолиновых глин в виде влаги составляют 11,77—14,24 %, бентонитов 6,11—9,15 %. Диссоциация формовочных глин протекает следующим образом:



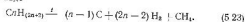
Расчеты показывают, что 1 % влаги в формовочную смесь приносит каждые 7 % воздушно-сухой каолиновой глины или 5—10 % бентонита, причем этот вид влаги не может быть определен по стандартной методике испытания смесей, при которой смесь нагревают до температуры 105—110 °С.

Степень термической диссоциации воды в условиях литейной формы настолько низка, что она практически не изменяет состава атмосферы литейной формы.

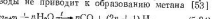
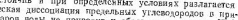
Особый интерес представляет термическая диссоциация предельных углеводородов, конечными продуктами которой являются углерод, водород и метан



В общем виде



Углеводороды при высокой температуре являются термодинамически неустойчивыми веществами. Как видно, в результате реакции диссоциации углеводородов в атмосфере формы увеличивается содержание восстановительного газа — водорода и метана, а также появляется пироуглерод, который благодаря транспортным реакциям откладывается на поверхности зерен кварца. Метан также неустойчив и при определенных условиях разлагается. Термическая диссоциация предельных углеводородов в присутствии паров воды не приводит к образованию метана [53].



Металл в газе формы появляется в основном благодаря реакциям (5 4), (5 14), (5 16) и др.

Одной из разновидностей парообразования является сублимация, когда твердое вещество, минуя жидкое состояние, волею неется в парообразное. Этот процесс эндотермический, поэтому он усиливается с повышением температуры.

В литейной форме могут сублимировать различные органические связующие материалы (синтетические смолы, пески, декстрины, меласса и т. д.), а также органические технологические добавки (каменноугольная пыль, древесные опилки или древесная мука, мазут и т. п.). Как видно из табл. 5 1, значительное место газообразные продукты сублимации занимают даже в сырых формах, в сухих же формах, и особенно в оболочковых, в формировании атмосферы литейной формы процессы сублимации занимают ведущее положение.

Десорбция есть процесс удаления адсорбированных газов с поверхности адсорбента. С повышением температуры скорость десорбции увеличивается. Обратный процесс, т. е. насыщение поверхности адсорбата газами, называют адсорбцией (при объемном насыщении — абсорбцией). Процесс поверхностного адсорбирования с последующим образованием химических связей между адсорбентом и адсорбатом является хемосорбцией. Все адсорбционные процессы, особенно хемосорбция, являются экзотермическими.

При подготовке формовочных материалов и выставлении форм перед заливкой различные составляющие формовочных и стержневых смесей адсорбируют пары воды, углекислый газ, оксид углерода, водород, азот, аммиак, сероводород и другие газы, находящиеся в атмосфере литейного цеха. Адсорбентами являются многие формовочные материалы: формовочные пески и глины, графит, древесный уголь, сухие остатки барды сульфитного шедока, жидкое стекло и др. О степени адсорбции можно судить по данным табл. 5 2 [62]. Один грамм смеси с 6 % бентонита десорбирует после заливки металла до 18 см<sup>3</sup> паров сорбированной воды.

По свидетельству Я. И. Медведева, в связи с неоднородной температурой в различных частях литейной формы в процессе заливки и охлаждения металла одновременно могут осуществляться как десорбция (в более нагретых слоях формы), так и адсорбция фильтрующихся газов (в холодных слоях, прилегающих к периферии формы).

Приведенные данные свидетельствуют о том, что для понижения отрицательного влияния сорбционных процессов на качество отливок необходимо уменьшать время подготовки форм перед заливкой.

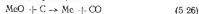
К физико-механическим процессам газообразования отнесем газообмен между отливкой и формой. Так, газ, попавший в металл благодаря кавитации при заливке, в большей своей части всплывает к зеркалу металла и удаляется в полость формы. В случае

Таблица 32 Адсорбция газов порошковыми материалами

Адсорбент	Адсорбат	
	Химическая формула	Массовое содержание, %
Грубодисперсная глина	H <sub>2</sub> O	20
Бентонит	H <sub>2</sub> O	20
Барда сульфитного шедока (сухой остаток)	H <sub>2</sub> O	70
Жидкое стекло	H <sub>2</sub> O	150
Плавленый натр (в жидком стекле)	CO <sub>2</sub>	92
Древесный уголь	CO <sub>2</sub>	0,100
	CO	0,012
	H <sub>2</sub>	0,150

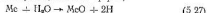
использования открытых приливов и выпоров этот газ беспрепятственно удаляется в атмосферу цеха. При использовании закрытых приливов и в отсутствие выпоров газ полости формы для выхода в атмосферу цеха должен пройти путь фильтрации через слой формовочной смеси, входящей в общий газовый поток литейной формы.

Отливка может также поставлять газ в поры смеси вследствие образования его непосредственно в металле. Например, в поверхностных слоях отливки практически всегда имеются оксиды металла. В случае протекания реакции



образующийся СО может частично переходить границу металл—форма, вливаясь в газовый поток формы. Если этот газ не удаляется в форму, то в поверхностном слое отливки образуются мелкие газовые раковины, чаще называемые стовидной пористостью.

Часть газов формы переходит в металл, причем, как правило, в металл из формы переходит больше газов, чем наоборот. Об этом свидетельствует тот факт, что содержание водорода в металле отливки практически всегда больше, чем его содержание в металле после выпуска из печи. Водород может попадать в металл различными путями. Одним из них является реакция паров воды с металлом, протекающая на границе металл—форма,



Образующийся атомарный водород диффундирует в поверхность име слои металла отливки, вызывая в ней образование подкорки этих газовых раковин — ситовидной пористости. Такие реакции могут идти с железом, алюминием, кремнием и другими химически активными элементами стальных и чугуновых сплавов.

Кроме приведенных на примере металла—форма протекают другие многочисленные реакции с участием газов, так и для изменяющиеся состав атмосферы литейной формы благодаря газообмену между формой и металлом отливки.

К чисто физическим процессам газообразования отнесены два вида: испарение воды и других жидкостей, а также температурные изменения объема газов. При разогреве формовочной и стержневой смесей до температуры 373 К и выше начинают испаряться влага, находящаяся в составе смеси, и некоторые другие жидкости (которые могут иметь отличную от воды температуру испарения). Вначале испаряется свободная влага, входящая в состав смеси и в качестве технологической добавки, затем цеолитная, кристаллизационная и конституционная, входящие в состав микрораво смеси (главным образом из глины), а также десорбируемая.

Следует иметь в виду, что в процессе газообразования вода играет чрезвычайно важную роль. Во-первых, сам факт испарения и образования большого объема паров воды существенно изменяет атмосферу формы, во-вторых, пары воды активно участвуют в различных химических реакциях газообразования, в-третьих, пары воды, обладая сильным каталитическим действием, ускоряют протекание многих физико-химических процессов.

По закону Авогадро 1 г моль любого газа при нормальных условиях занимает объем, равный 0,022416 м<sup>3</sup>. Следовательно, при испарении (T = 373 К) вода увеличивает свой объем примерно в 1700 раз. Слой формовочной и стержневой смесей, прилегающие непосредственно к металлу, нагреваются до температуры, значительно превышающей 373 К. Поэтому пары воды занимают объем более чем в 1700 раз больше, по сравнению с водой в жидком состоянии. В данном расчете не принимается во внимание некоторое повышение давления газов в форме в начальный момент после заливки металла, так как это изменение давления существенно не повлияет на уменьшение объема выделяющихся газов.

Мощность процесса испарения влаги можно характеризовать кратностью увеличения N объема образующегося пара V<sub>г</sub> по сравнению с объемом смеси V<sub>с</sub>, в которой находится влага, подвергающаяся парообразованию (для сокращения N — кратность парообразования).

В общем виде

$$N = V_g/V_c \quad (5.28)$$

При этом исходя из законов Авогадро и Гей-Люссака с достаточной точностью (так как указываются законы строго выпол-

няются применительно только к идеальным газам) можно записать

$$V_g = \frac{22416}{M} \frac{T}{273} m_w,$$

где m<sub>w</sub> = V<sub>с</sub>ρW/100 — масса влаги смеси объемом V<sub>с</sub>, плотностью ρ (г/см<sup>3</sup>) и с массовым содержанием влаги W (%), M — молекулярная масса. Откуда

$$N = \frac{V_g}{V_c} = \frac{22416}{M} \frac{\rho}{100} \frac{T}{273} W \quad \text{или} \quad N = \frac{0.8}{M} \rho WT \quad (5.29)$$

Для влаги (M = 18) эта зависимость примет вид

$$N = 0,0456 \rho WT \quad (5.30)$$

На рис. 5.3 приведена зависимость для различных значений ρW, из которой следует, что кратность парообразования для ρW до 7,5 (ρ = 1,5 г/см<sup>3</sup>, W = 5% — часто встречающиеся на практике параметры смеси) колеблется от 130 до 550 при 373 и 1573 К соответственно.

В работе [74] установлено, что в атмосфере залитой металлом сырой песчано-глинистой формы содержание паров воды может составлять 98%, высушенной в течение 6 ч при 423 К — до 70%. Холоднотвердеющие смеси, содержащие значительно меньшее количество влаги, также могут создавать атмосферу, в которой находится 20—57% паров воды [39]. Приведенные факты свидетельствуют о том, что в сырых песчано-глинистых формах испарение влаги является наиболее мощным источником газообразования. Необходимо учитывать и обратное явление — сокращение объема газов по мере их фильтрации от отливки и периферии формы. В самом деле после выхода газа из зоны максимальной температуры его объем начинает уменьшаться. Поэтому газы направляются туда, где идет сокращение объема т. е. в сторону меньших температур. В этом основная суть направления газового потока формы от отливки к периферии. Особо резкое сокращение объема газа наблюдается в зоне конденсации влаги.

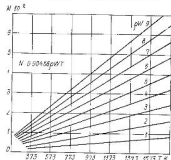


Рис. 5.3 Зависимость кратности парообразования влаги N от температуры при различных значениях ρW

Количество линейно независимых базисных химических реакций  $k$  равно числу веществ  $M$  системы участвующих в реакциях, за вычетом числа химических элементов  $m$ , из которых состоят вещества данной системы, т.е.

$$k = M - m. \quad (5.31)$$

Положим, что в литейной форме имеет место смесь реагирующих веществ  $C, H_2, CO_2, O_2, CO, H_2O, CH_4$  ( $M = 7$ ), молекулы которых состоят из  $C, H, O$  ( $m = 3$ ). Тогда число базисных реакций  $k = 7 - 3 = 4$ . Отыскание этих реакций будем выполнять в следующей последовательности [78].

Построим вектор-столбцы молекулярных ( $A$ ) и атомных ( $B$ ) составляющих

$$A = \begin{bmatrix} C \\ H_2 \\ CO_2 \\ O_2 \\ CO \\ H_2O \\ CH_4 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} C \\ H \\ O \end{bmatrix}.$$

Составим атомную матрицу

$$\beta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 1 \\ 1 & 4 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.32)$$

Найдем ранг  $r$  матрицы  $\beta$ , последовательно приводя ее к диагональному виду с помощью элементарных преобразований (этот расчет здесь опускаем). Ранг  $r$  матрицы  $\beta$  равен трем. Разделим матрицу  $\beta$  на  $\beta_1$  и  $\beta_2$  таким образом чтобы

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} \begin{matrix} r \\ M-r \end{matrix}.$$

Матрица  $\beta_1$  является квадратной размером  $r \times r$ , матрица  $\beta_2$  — квадратная —  $r \times (M-r)$ . Матрица  $\beta_1$  должна быть неособенной,

т.е. ее определитель  $\det \beta_1$  не должен равняться нулю. Проверим это условие, найдя  $\det \beta_1$  по правилу Саррюса

$$\det \beta_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \end{vmatrix} = 1 \cdot 0 \cdot 2 - 0 \cdot 2 \cdot 4 = -4$$

Следовательно,  $\det \beta_1 \neq 0$ , т.е. матрица  $\beta_1$  является неособенной. Если определитель матрицы  $\beta_1$  равнялся бы нулю, тогда изменением мест строк атомной матрицы  $\beta$  можно добиваться такого положения, при котором  $\det \beta_1 \neq 0$ .

Из матричной алгебры известно, что если

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}, \quad \text{то} \quad \begin{bmatrix} -\beta_2 \beta_1^{-1} & E \end{bmatrix} = \alpha,$$

где  $\alpha$  — стехиометрический коэффициент базисных реакций,  $E$  — единичная матрица,

$$\beta_1^{-1} = \frac{\Delta_{ij}^{\beta_1^T}}{\det \beta_1} \quad (5.33)$$

Здесь  $\Delta_{ij}^{\beta_1^T}$  — транспонированная матрица алгебраических дополнений элементов  $ij$  матрицы  $\beta_1$ .

Матрицы алгебраических дополнений матрицы  $\beta_1$

$$\Delta_{ij}^{\beta_1^T} = \begin{bmatrix} 4 & 0 & -2 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad \text{и} \quad \Lambda_{ij}^{\beta_1^T} = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ -2 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

Тогда

$$\beta_1^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ -1/2 & 0 & 1/2 \end{bmatrix}$$

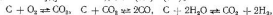
и

$$\beta_2 \beta_1^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 1 \\ 1 & 4 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ -1/2 & 0 & 1/2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1/2 & 0 & 1/2 \\ -1/2 & 1 & 1/2 \\ 1 & 2 & 0 \end{bmatrix}.$$

Откуда

$$\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & | & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1/2 & 0 & -1/2 & | & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1/2 & -1 & -1/2 & | & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & -2 & 0 & | & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.34)$$

Следовательно базисные реакции с целочисленными коэффициентами будут иметь вид [см (5.1)—(5.4)]



Изложенная методика позволяет определять систему базисных реакций для какого угодно набора реагирующих веществ. Эти реакции называются независимыми. Однако они не являются независимыми, так как в некоторых случаях содержат одинаковые газообразные вещества. По закону действия масс химически они связаны между собой.

Необходимо заметить, что при другом расположении реагирующих компонентов получим другую атомную матрицу, что при ведет к иным базисным реакциям. Однако их сочетание в конечном счете дает примерно те же самые реакции.

Для определения направления хода химических реакций следует знать изменения термодинамических потенциалов в стандартных условиях (в частности, изобарных потенциалов)  $\Delta Z_T^\circ$  или констант равновесия  $K_p$ . Рассмотрим некоторые методы расчета этих величин.

Существуют разнообразные методы расчетов изобарного по тентнала, которые подразделяются на три приближения: первое (самое грубое), второе (промежуточное), третье (наиболее точное). Разберем наиболее простое.

При расчете в первом приближении, когда не учитывается температурная зависимость термодинамических функций компонентов реакции, используют энтропийный метод, основанный на применении уравнения Гиббса—Гельмгольца, одной из форм которого является

$$\Delta Z_T^\circ = \Delta H_{298}^\circ - T \Delta S_{298}^\circ \quad (5.35)$$

где  $\Delta Z_T^\circ$  — изобарный потенциал реакции для стандартных условий ( $T = 298 \text{ K}$ ,  $p \approx 10^5 \text{ Па}$ );  $\Delta H_{298}^\circ$  — изменение теплового эффекта реакции (энтальпия) в стандартных условиях;  $T$  — абсолютная температура;  $\Delta S_{298}^\circ$  — изменение энтропии реакции в стандартных условиях. При этом если  $\Delta Z_T^\circ < 0$ , то реакция идет вправо; при  $\Delta Z_T^\circ > 0$  реакция идет влево. В общем виде



изменение энтальпии и энтропии при известных значениях  $\Delta H_{298}^\circ$  и  $S_{298}^\circ$  компонентов реакции, определяемых по справочникам, находят сложением, а именно:

$$\Delta H_{298}^\circ - m \Delta H_{298}^\circ(C) - n \Delta H_{298}^\circ(D) - k \Delta H_{298}^\circ(A) - l \Delta H_{298}^\circ(B) \quad (5.36)$$

$$\Delta S_{298}^\circ - m S_{298}^\circ(C) - n S_{298}^\circ(D) - k S_{298}^\circ(A) - l S_{298}^\circ(B) \quad (5.37)$$

В практике подсчета  $\Delta H_{298}^\circ$  и  $S_{298}^\circ$  можно пользоваться схемой в виде таблицы (в которой значения  $\Delta H_{298}^\circ$  и  $S_{298}^\circ$  — справочные данные)

Комп. номер	$\Delta H_{298}^\circ(i)$	$S_{298}^\circ(i)$
A	$\Delta H_{298}^\circ(A) (-h)$	$S_{298}^\circ(A) (k)$
B	$\Delta H_{298}^\circ(B) (-l)$	$S_{298}^\circ(B) (-n)$
C	$\Delta H_{298}^\circ(C) m$	$S_{298}^\circ(C) m$
D	$\Delta H_{298}^\circ(D) n$	$S_{298}^\circ(D) n$
$\Delta I$	$\Delta H_{298}^\circ$	$\Delta S_{298}^\circ$

Таблица 5.3. Значения  $\Delta H_{298}^\circ$  и  $S_{298}^\circ$  реакций  $2C + O_2 \rightleftharpoons 2CO$

Комп. номер	$\Delta H_{298}^\circ$ Дж/моль	$S_{298}^\circ$ Дж/моль град
C	0	5,74 (-2)
O <sub>2</sub>	0	205,03 (-1)
CO	-110 500 2	197 40 (+2)
$\Delta I$	-221 000	+178 29

Расчет  $\Delta Z_T^\circ$  по первому приближению (в зависимости от температуры) выполним на примере реакции



Справочные данные расчета  $\Delta H_{298}^\circ$  и  $\Delta S_{298}^\circ$  занесем в табл. 5.3.

Следовательно,  $\Delta Z_T^\circ = -221 000 - 178,297 \text{ Дж/моль } O_2$ .

При втором приближении учитывается теплоемкость компонентов реакций без учета ее температурной зависимости, т. е. имеется в виду, что  $\Delta C_p = \Delta C_{p,298} = \text{const}$ .

Расчет изобарного потенциала по второму приближению удобно выполнять методом Уилха, в соответствии с которым

$$\Delta Z_T^\circ = \Delta H_{298}^\circ - T \Delta S_{298}^\circ - \Delta C_{p,298}^\circ \left( \ln \frac{T}{298,15} + \frac{298,15}{T} - 1 \right) \quad (5.38)$$

Обозначив

$$T \left( \ln \frac{T}{298,15} + \frac{298,15}{T} - 1 \right) = V, \quad (5.39)$$

получим

$$\Delta Z_T^\circ = \Delta H_{298}^\circ - T \Delta S_{298}^\circ - \Delta C_{p,298}^\circ V \quad (5.40)$$

В целях ускорения расчетов значения  $V$  (функция Уилха) для различных температур табулированы (табл. 5.4).

Приведем пример расчета  $\Delta Z_T^\circ$  той же реакции методом приближения Уилха. Здесь необходимо найти изменение стандартной

Компонент	$\Delta_f H_{298}^0$ Дж/моль (град)
C	8,53 (-2)
O <sub>2</sub>	29,36 (-1)
CO	29,15 (+2)
$A_{r, 298} + 11,88$	

теплотности компонентов реакции (также с учетом правила знаков и стехиометрических коэффициентов)

Поскольку значения  $\Delta H_{298}^0$  и  $\Delta S_{298}^0$  нами определены ранее (см. табл. 5.3), можно записать

$$\Delta Z_T^0 = -221\,000 - 178\,29T - 11\,88U \quad (\text{Дж/моль O}_2)$$

Расчет по третьему наиболее точному приближению учитывает температурную зависимость энтальпии энтропии и теплоемкости

Основной первичной оценкой качества атмосферы литевой формы является состав ее компонентов выраженный, как правило, в процентах по объему. Зная состав необходимо произвести оценку вторичных свойств атмосферы, важнейшим из которых является окислительно-восстановительная способность определяющая качество поверхности отливок. Существует несколько подходов к оценке этих свойств.

Одними из важнейших реакций газовой фазы являются



Алгебраическое сложение реакций (5.41) и (5.42) дает реакцию водяного газа



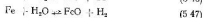
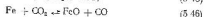
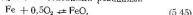
константа равновесия которой выражается соотношением

$$K_{p(5.43)} = \frac{p_{\text{CO}} p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{O}_2} p_{\text{H}_2}}, \quad (5.44)$$

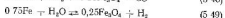
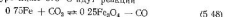
Таблица 54 Функция Уанка  $U = T \left( \ln \frac{T}{298,15} + \frac{298,15}{T} - 1 \right)$

T, K	U	T, K	U	T, K	U	T, K	U	T, K	U
300	0,000	673	173,072	1023	536,405	1400	1063,433	1773	1698,611
323	1,008	700	195,589	1073	599,252	1423	1099,194	1800	1734,451
373	8,695	723	215,392	1100	634,166	1473	1178,208	1823	1775,950
400	15,697	773	251,573	1123	664,430	1500	1221,566	1873	1867,162
423	23,105	800	267,792	1173	731,835	1523	1258,920	1900	1916,974
473	43,439	823	310,791	1200	769,126	1573	1341,274	1923	1959,709
500	56,636	873	363,048	1223	801,372	1600	1386,410	1973	2083,655
523	69,068	900	392,468	1273	872,934	1623	1425,219	2000	2104,761
573	99,485	923	418,170	1300	912,430	1673	1510,702	2023	2148,670
600	117,750	973	476,002	1323	946,500	1700	1557,488	2073	2245,019
623	134,270	1000	508,309	1373	1021,936	1723	1597,681	-	-

Окисление железа при температуре выше 570 °C осуществляется в соответствии со следующими основными реакциями



При температуре ниже 570 °C идут реакции



Подсчитав значения констант равновесия реакций (5.46)–(5.49) по формулам используемым С. И. Филипповым, для искомым температур

$$\lg K_{p(5.46)} = -688T^{-1} + 0,9, \quad (5.50)$$

$$\lg K_{p(5.47)} = 1225T^{-1} - 0,845 \quad (5.51)$$

$$\lg K_{p(5.48)} = -53,5T^{-1} + 0,15 \quad (5.52)$$

$$\lg K_{p(5.49)} = 1858,75T^{-1} - 1,596 \quad (5.53)$$

можно сопоставить их с отношениями экспериментально найденных содержаний газов

$$n_{(5.46)} = \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2}, \quad n_{(5.47)} = \frac{\text{H}_2}{\text{H}_2\text{O}}, \quad n_{(5.48)} = \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2}, \quad n_{(5.49)} = \frac{\text{H}_2}{\text{H}_2\text{O}},$$

полученных при тех же температурах. При этом, если константы равновесия  $K_p$  окажутся больше соответствующих им отнесенный  $n$  будет иметь место окисление железа, в обратном соотношении — металл будет защищен от окисления газами формы.

Другим методом оценки качества газовой фазы реакционной зоны является расчет так называемого кислородного потенциала, предложенный Ф. Ричардсоном и Д. Джефисом

$$P_0 = RT \left( 2 \ln \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2}} - \ln K_{p(5.41)} \right) - RT \left( 2 \ln \frac{p_{\text{CO}_2}}{p_{\text{CO}}} - \ln K_{p(5.42)} \right).$$

Значение кислородного потенциала реакционной зоны можно также определять экспериментально в том числе на границе раздела металл—литевая форма [63]

Ю. П. Васин предложил расчет окислительного потенциала (ОП) газовой фазы литевой формы

$$\text{ОП} = \text{O}_2 - \text{CO}_2 \frac{\Delta Z_{\text{CO}_2}^0}{\Delta Z_{\text{CO}}^0} + \text{H}_2\text{O} \frac{\Delta Z_{\text{H}_2}^0}{\Delta Z_{\text{H}_2\text{O}}^0},$$

где O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O — объемное содержание кислорода, углекислого газа и паров воды %;  $\Delta Z_{\text{CO}_2}^0$ ,  $\Delta Z_{\text{CO}}^0$  и  $\Delta Z_{\text{H}_2}^0$  — значения и

ней свободной энергии реакций окисления железа (5.45)–(5.47) соответственно кислородом, углекислым газом и парами воды при температуре  $T$ , Дж/моль  $O_2$ .

Существенным недостатком рассмотренных методов, на наш взгляд является отсутствие учета кислорода (кроме метода Ю. П. Васина) и других окислительных газов, а также учета возможных восстановителей которые могут быть в составе атмосферы литейной формы. Этого недостатка лишен метод определения окислительно-восстановительного потенциала (ОВП), разработанный в МВТУ им. Н. Э. Баумана [21]. В соответствии с данной работой ОВП атмосферы литейной формы есть максимальное количество грамм-атомов химического элемента окисленного (или восстановленного из соответствующего оксида) одним молем компонентов газовой фазы в условиях термодинамического равновесия при температуре  $T$  и общем давлении  $p_0$ . ОВП относительно железа (обозначаемый  $E_0^{Fe}$ ) будет равен

$$E_0^{Fe} = \sum N_i E_i^{*e},$$

где  $N_i$  — мольная доля  $i$ -го компонента газа,  $E_i^{*e}$  — масса железа, окисленная до FeO (или восстановленная из FeO)  $i$ -го компонента газа при температуре  $T$  и давлении  $p_0$ .

Достоинством метода является компактность получаемых результатов легко сравнимых между собой, недостатком — некоторая громоздкость вычислений.

Предлагается еще два метода оценки атмосферы литейной формы. Суть первого в том, что из суммы окислительных газов (О) вычитается сумма восстановительных газов (В). При этом если  $(O-B) > 0$  — атмосфера окислительная,  $(O-B) < 0$  — восстановительная. Суть второго метода следующая для реакций (5.46)–(5.49) строится графическая зависимость  $\lg K_p - \varphi(T)$ , где

$$\lg K_p(5.46) = \lg \frac{p_{CO}}{p_{CO_2}} \quad \text{и} \quad \lg K_p(5.47) = \lg \frac{p_{H_2O}}{p_{H_2O_2}}.$$

Такая зависимость, построенная по формулам (5.50)–(5.53) для железа представлена на рис. 5.4.

На рисунке можно выделить четыре области: 1 — восстановительная лежащая выше равновесных кривых реакций (5.46), (5.47) и (5.49); 2 — окислительная, эта область лежит ниже равновесных кривых реакций (5.48) и (5.46); 3 — восстановительная для реакций (5.46) и (5.48), окислительная для (5.47) и (5.49); 4 — восстановительная для реакции (5.47), окислительная для реакции (5.46). Можно отметить, что с повышением температуры окислительная способность водяных паров уменьшается, движимая углерода — повышается, что хорошо видно из рис. 5.4.

Константа равновесия реакции (5.43), определенная как разность логарифмов констант реакций (5.46) и (5.47), равна

$$\lg K_p(5.43) - \lg K_p(5.46) = \lg K_p(5.47) = -19137^{-1} + 1,745 \quad (5.54)$$

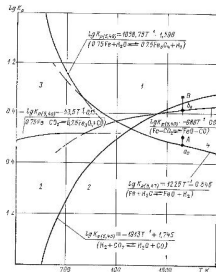


Рис. 5.4 Температурная зависимость логарифмов констант равновесия реакций. Температурную зависимость  $\lg K_p(5.43)$  нанесен на рис. 5.4. Она потребуется для последующих расчетов.

Окислительно-восстановительную способность будем определять для газа, который находится в равновесном состоянии с железом и его оксидами в соответствии со значением  $K_p(5.43)$  при данной температуре. В составе газа могут быть кроме водяного газа кислород, метан и другие окислительные или восстановительные компоненты. Эти газы эквивалентно не нарушая материального баланса, в условиях замкнутой системы переводим в компоненты реакции водяного газа. При определении характера реакцией перехода необходимо иметь значения их изобразных потенциалов  $\Delta Z_i^0$  при заданной температуре. Этот переход должен осуществляться по реакциям, имеющим минимальную величину  $\Delta Z_i^0$  в соответствии с рис. 5.2. Далее в соответствии с кривой  $\lg K_p(5.43) = \varphi(T)$  или из уравнения (5.54) определим  $\lg K_p(5.43)$  для температуры  $T$ , затем найдем  $K_p(5.43)$ . Это — равновесное значение  $K_p(5.43)$ . С другой стороны состав газа в котором после

эквивалентного перевода окислительных и восстановительных составляющих остались только компоненты водяного газа и нейтральные компоненты, также эквивалентно переселем в равновесный состав, не нарушая материального баланса. При этом опять должны учитываться реакции, имеющие при данной температуре минимальное значение  $\Delta Z_T^0$ . После определения равновесного состава находим значения логарифмов отношений  $\text{CO}/\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ . Для этой температуры  $T$  (точки  $A$  и  $B$  соответственно на рис. 5.4). Для этой температуры по кривым найдем значения логарифмов равновесных отношений  $\text{CO}/\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$  (точки  $a_0$  и  $b_0$  на рис. 5.4). За окислительно-восстановительную способность примем условную величину выраженную через изобарный потенциал алгебраической суммы разности логарифмов отношений  $\text{CO}/\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$  газа (точки  $A$  и  $B$ ) и логарифмов констант равновесия (точки  $a_0$  и  $b_0$ ) соответственно. В виде формулы это выражение запишем следующим образом:

$$\Delta Z_T = -RT \ln(A - a_0) + (B - b_0) \quad (5.55)$$

или проще

$$\Delta Z_{T_0} = -RT(A + B - a_0 - b_0) \quad (5.56)$$

В отличие от стандартного условный изобарный потенциал будем обозначать без верхнего индекса «градуса» над  $\Delta Z_T$ . При этом если  $\Delta Z_T < 0$ , то газ восстановительный,  $\Delta Z_T > 0$  — газ окислительный. Чем больше абсолютное значение условного изобарного потенциала, тем выше ОВС газа, тем больше его активность. Разберем пример.

При давлении  $1,01 \cdot 10^5$  Па и температуре 900 К имеем следующее объемное содержание газа, %

CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>
58	10	16	5	11

Молекулярный азот в реакциях окисления-восстановления участия не принимает. Приведем газ в равновесное состояние выполнив по схеме:

CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	Σ	$K_{p,T}$
58	10	16	5	11	100	1,8125
-2	+2	+2	-2	—	—	—
56	12	18	3	11	—	0,7778
-1	+1	+1	-1	—	—	—
55	13	19	2	11	—	0,4453
-0,1	+0,1	+0,1	-0,1	—	—	—
54,9	13,1	19,1	1,9	11	100	0,4169

В соответствии с рис. 5.4  $\lg K_{p(5.43)} = -0,3806$ , следовательно,  $K_{p(5.43)} = 0,416$ . Рассматриваемый состав газа будет равновесным, если отношение содержания его компонентов  $\text{CO}/\text{H}_2\text{O}:\text{CO}_2/\text{H}_2$  будет равно или близко к  $K_{p(5.43)} = 0,416$ . В соответствии с реакцией водяного газа, изменяя соотношение между компонентами по приведенной схеме, будем постепенно приближаться по значению  $K_{p,T}$  к 0,416. В окончательном виде  $K_{p(5.43)} \approx K_{p,T}$ . Материальный баланс не нарушен. По сравнению с исходным составом содержание CO и H<sub>2</sub>O уменьшено на 3 л частей по объему каждого, в свою очередь, содержание CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub> увеличено на столько же, содержание азота не изменилось. Баланс по содержанию химических элементов при этом также, естественно сохраняется.

После эквивалентного (в соответствии с реакцией водяного газа) перевода исходного газа в равновесное состояние можно рассчитать ОВС.

$$\Delta Z_T = -19\,144\,900 \left( \lg \frac{54,9}{13,1} - 0,1356 + \lg \frac{19,1}{1,9} - 0,4693 \right) = -17\,573 \text{ Дж/моль}$$

Как видно газ рассматриваемого состава при 900 К является восстановительным по отношению к FeO.

В случае приведения газа в равновесное состояние для определения численного значения, на которое изменяется компонент газа, можно использовать формулу

$$\Delta = \frac{\text{CO} + \text{H}_2\text{O} + K_{p(5.43)}(\text{CO}_2 + \text{H}_2)}{(1 - K_{p(5.43)})^2} \pm \sqrt{\left( \frac{\text{CO} + \text{H}_2\text{O} + K_{p(5.43)}(\text{CO}_2 + \text{H}_2)}{(1 - K_{p(5.43)})^2} \right)^2 - \frac{\text{CO} \cdot \text{H}_2\text{O} - K_{p(5.43)} \text{CO}_2 \cdot \text{H}_2}{1 - K_{p(5.43)}}}$$

где CO, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> — объемные доли соответствующих газов,  $K_{p(5.43)}$  — константа равновесия реакции водяного газа.

Приведем еще один пример. При давлении  $1,01 \cdot 10^5$  Па и температуре 1000 К имеем следующее объемное содержание газа, %

CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>
10,8	28,7	17,5	36,9	0,5	2,5	8,1

Как видно, наряду с компонентами водяного газа присутствуют (кроме азота) еще кислород и метан. Переведем их в компоненты водяного газа. Из рис. 5.2 следует, что при температуре 1000 К кислород должен реагировать с метаном по реакции (5.10), однако после такого взаимодействия еще останется 2 ч по объему

метана. Метан будет реагировать с диоксидом углерода в соответствии с реакцией (5.14). Составим схему материального баланса эквивалентного перелоа газа приведенного состава в равновесный ионен в виду, что  $\lg K_p(5.23) = -0.168$ ,  $K_p(5.23) = 0.6792$ .

CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	Σ	K <sub>p</sub> r
10.8 -4.0	28.7 -0.5 -2.0	12.5 +1 +4	36.9 —	0.5 -0.5	2.5 -2.0	8.1	100	
14.8 2	27.2 +2	17.5 +2	36.9 -2	—	—	8.1	—	1.1473
12.8 -1	29.2 +1	19.5 +1	34.9 -1	—	—	8.1	—	0.7846
11.8 +0.2	30.2 -0.2	20.5 -0.2	33.9 -0.2	—	—	8.1	—	0.6461
12.0 11.5	30.0 28.7	20.3 19.4	34.1 32.5	—	—	8.1 7.8	104.5 100	0.6719 0.6733

Пересчет, выполненный в последней строке схемы, делать не обязательно, так как объемные соотношения между газами не изменились. Этим

$$\Delta Z_T = -19,144 \cdot 1000 \left( \lg \frac{11.5}{28.7} - 0.212 + \lg \frac{19.4}{32.5} - 0.38 \right) = -23\,252 \text{ Дж/моль.}$$

Газ данного состава при температуре 1000 К по отношению к железу является окислительным.

Предложенная методика расчета позволяет определить ОВС большинства газов.

Следует привести классификацию компонентов газовой фазы литейной формы. Она аналогична классификации компонентов контролируемой атмосферы [82] (табл. 5.5).

Весьма разнообразны методы исследования атмосферы литейной формы, применяемые различными авторами. В. А. Васильев синтезировал необходимый состав газовой атмосферы. С этой целью он применял аппарат Киппа и газгольдер К достоинствам такой методики получения проб газа можно отнести универсальность исследуемой атмосферы — ее независимость от состава смеси формы. Заранее задавая атмосферу, можно более уверенно анализировать

Таблица 5.5 Классификация компонентов атмосферы литейной формы по действию на сплавы с железной основой

Действие на сплав	Газ
Окисляющее	O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub>
Восстанавливающее	H <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub>
Обезуглероживающее	H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub>
Науглероживающее	CH <sub>4</sub> , CO
Нейтральное	N <sub>2</sub> , Ar, He

получаемые результаты, используя синтезированную смесь газов в качестве эталонной.

Одним из направлений изучения свойств формовочных смесей является исследование состава газов, образующихся при нагреве смеси. В таких случаях небольшую навеску исследуемой смеси нагревают до различных температур, подобно тому, как это делается при изучении газопористости, отбирая при этом пробы на анализ. Такая методика позволяет проводить сравнение химического состава газов, выделяемых смесями с различными связующими материалами и технологическими добавками.

Для подобных исследований применена установка (рис. 5.5). Испытуемую смесь массой 25 г помещали в реакционный сосуд, нагреваемый электрической печью сопротивления. Температуру контролировали термопарой, смонтированной в сосуд таким образом, что горячий спай находился в центре смеси. В целях предотвращения подсоса воздуха реакционный сосуд плотно закрывали во время нагрева смеси в сосуде поддерживали избыточное давление, равное  $(7-13) \cdot 10^2$  Па, которое контролировали U-образным

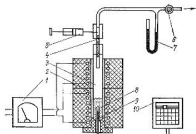
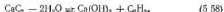


Рис. 5.5. Установка для нагрева формовочных смесей и отбора газовых проб: 1 — автотрансформатор; 2 — электрическая печь сопротивления; 3 — реакционный сосуд; 4 — пирометр с кварцевым вальцем; 5 — зорекс; 6 — двухходовый вентиль; 7 — ртутный манометр; 8 — исследуемая смесь; 9 — термопара; 10 — ротационный насос.

ртутным манометром. Избыток газа стравливали через двухходовой кран. При достижении требуемой температуры производили отбор пробы газа медицинским шприцем с иглой через резиновую муфту.

В процессе отбора пробы газа и переноса ее в прибор для анализа испарившаяся в смеси влага частично конденсируется. При таком подходе невозможно установить точное ее содержание в составе газов. Влага замещалась ацетиленом, объем которого без ограничений определяли при анализе. Замещение паров влаги ацетиленом осуществляли взаимодействием влаги с карбидом кальция помещаемым в специальный патрон. Для повышения реакционной способности карбид кальция использовали в виде гранул со средним диаметром 0,2—0,4 мм. Одним патроном производили отбор от одной до пяти проб в зависимости от содержания влаги в смеси. При взаимодействии карбида кальция с водой в принципе возможны две реакции



В соответствии с реакцией (5.57) 1 г-моль воды замещается 1 г-молем ацетилена, т. е. имеет место равенство объемов. По реакции (5.58) 2 г-моля воды дадут 1 г-моль ацетилена (два объема паров влаги дадут один объем ацетилена). Термодинамический расчет этих реакций показал, что в условиях проведения экспериментов (нагрев смеси производился от 373 до 1273 К) идет реакция (5.57). Следовательно, при исследовании состава газовой атмосферы в указанных условиях определение ацетилена равнозначно определению объема паров воды.

В ряде исследований [19] изучаемый газ получали при использовании специальных экспериментальных форм. Такая методика получения газа позволяет не только проводить исследования моделируя реальные условия.

В нашей работе с этой целью использовали несколько вариантов экспериментальных форм, один из которых приведен на рис. 5.6. В этой форме газоотборная трубка предварительно заформовывалась в стержень из исследуемой смеси таким образом, чтобы можно было отобрать пробы газа из области, непосредственно контактирующей с металлом отливки.

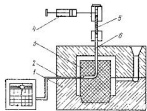


Рис. 5.6 Форма для исследования изотерм контактной зоны: 1 — форма; 2 — термостат; 3 — стержень; 4 — шприц; 5 — патрон с карбидом кальция; 6 — газоотборная трубка

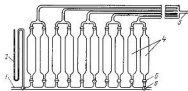


Рис. 5.7 Прибор для отбора газовых проб из формы: 1 — приборной и вакуумной насос; 2 — манометр; 3 — трубка, ведущая в форму; 4 — колбы; 5 — двухходовой кран; 6 — трехходовой кран

Пробы газа можно отбирать из производственных форм, т. е. в реальных условиях. К достоинству таких работ следует отнести сам факт получения газа реальной формы, замкнутой в производственных условиях. Основными недостатками являются организационные трудности проведения таких экспериментов и невозможность широкого регулирования технологических факторов.

Отбор проб газа при проведении экспериментов на реальных цеховых формах производился с помощью специального прибора отборника (рис. 5.7). Пробоотборник состоит из 10 стеклянных колб, соединенных между собой попарно. Каждая пара колб подведена к магистрали, идущей к месту отбора проб газа. При отборе проб из различных точек пространства литейной формы каждая пара колб может иметь самостоятельную магистраль. В случае отбора проб из одной точки форма все колбы подсоединены к одной магистрали. Парная схема соединения колб позволяет осуществлять «прыжок» магистрали, если пробы отбираются с интервалом по времени и исключать смешивание контрольной газовой пробы с оставшимся в системе газом от заполнения предыдущей колбы. Перед отбором проб газа колбы вакуумировали до  $(1 \div 2) \cdot 10^{-2}$  Па остаточного давления. В некоторых случаях перед вакуумированием колбы промывали гелем для удаления воздуха.

Еще одна группа методов отбора проб газа заключается в использовании медицинских шприцев. Такая методика стала возможна при применении хроматографов в качестве инструмента для анализа газов, где требуется небольшой (от 1 до 4 мл) объем испытуемого газа. Впервые данный способ отбора проб газа был применен в Московском институте стали и сплавов [41].

Для проведения количественного анализа химического состава проб газа атмосферы литейной формы в настоящее время используются химические, физические и комбинированные методы. Сущность первых состоит в применении химических газоанализаторов. Из физических методов анализа химического состава газов в литейном производстве применяются главным образом хроматографические. Для этой цели используют хроматографы моделей ХЛ-4, ЛХМ 7А, ЛХМ-8МД. Следующим более совершенным методом

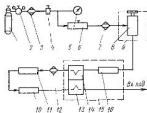


Рис. 5.8. Модернизированный хроматограф ЛХМ-8МД

1 — баллон с газом-носителем; 2 — регулятор; 3 — измеритель расхода газа; 4 — регулятор танной регуляровки; 5 — манометр; 6 — блок регулировки расхода газа на входе; 7 — датчик выхода газовой смеси; 8 — термоэлектрический элемент; 9 — раздвоенный колонок с сорбентом CaX и CaA; 10 — колонок сорбента; 11 — регулятор расхода газа; 12 — регулятор расхода газа; 13 — измерительная ячейка детектора; 14 — преобразователь сигнала детектора; 15 — раздвоенный колонок с адсорбентом

анализа газов литевой формы может быть использование масс-спектрометра. В наших исследованиях были применены два первых метода — химический (с использованием приборов ВТИ 2 и ГХИ 3М) и физический, где анализ осуществляли на хроматографе ЛХМ-8МД, работающем по принципу газодсорбционной хроматографии с изменением итатной газовой схемы хроматографа (рис. 5.8). Принципиально изменение схемы состоит в замене на параллельное соединение хроматографических колонок на последовательное, что позволило использовать одновременно два различных адсорбента, в первом из которых выделяются  $CO_2$  и  $C_2H_2$  (адсорбент КСК 2), во втором —  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$  (адсорбент — смесь цеолитов CaX и CaA). В целях предотвращения возможного наложения на хроматограмме пиков  $C_2H_2$  и  $H_2$  между колонками с адсорбентами установлено сопротивление, дающее возможность разделить во времени выход этих газов. Технические данные и режим работы модернизированного хроматографа ЛХМ-8МД приведены в табл. 56.

Таблица 56. Характеристика хроматографических колонок и режим работы модернизированного хроматографа ЛХМ-8МД

Характеристика	Раздвоенная колонка (см. рис. 5.8)	
	10	16
Адсорбент зернистостью 0,2—0,4 мм	10% CaA, 90% CaX	КСК 2
Длина, мм	3000	1000
Диаметр, мм	4	4
Температура °C		
колонок детектора	25	105
испаритель	130	
Газ-носитель	Гелий	
Объемный расход газа носителя в минуту	150	
Тур. мл		
Сила тока детектора, мА	110	
Объем пробы газа, мл	1	
Длительность анализа мин	5,5	

Качество работы хроматографа во многом определяется характеристиками эффективности и селективности колонок. Эти характеристики интегрально оцениваются критерием разделения [179].

На качество атмосферы литевой формы основные влияние оказывают вид связующих материалов формовочных и стержневых смесей, температура заливочного металла, время после заливки, место газообразования металла формы. Некоторые во весьма несущественное влияние могут оказывать также минералогический состав наполнителя смесей, состав металла отливки, скорость заполнения формы и некоторые другие факторы. Начи изучались некоторые из перечисленных основных факторов.

По методике приведенной на с. 187 (см рис. 5.5), изучали влияние вида и количества сантехнической смолы, используемой в качестве связующего, и температуры на состав газовой среды. На рис. 5.9 показано влияние температуры на состав газов, получаемых при нагреве смеси кварцевого песка и 1,5% смолы ОП-1. Такое влияние на состав газа является типичным. Аналогичная картина получена при нагревании смесей со смолами ФФ-1Ф и УКС-ФЛ 1,5 и 3%. В табл. 57 представлены значения ОВС и

Таблица 57. Изменение ОВС (адс./моль) и ОП (%) смесей с разным содержанием смол (%) от температуры

T, K	ОП-1				ФФ-1Ф	
	з		з		1,5	
	ОВС	ОП	ОВС	ОП	ОВС	ОП
373	—	13,09	—	19,26	—	—
473	—	5,72	—	5,50	—	—
573	—	3,08	7,44,5	3,81	-38,2	13,15
673	+16,9	1,55	-21,2	0,12	+6,8	2,58
773	-5,6	0,53	-19,0	0,12	-11,0	0,39
873	-6,0	0,48	-16,3	0,12	-11,7	0,44
973	-10,3	0,28	-19,0	0,26	-9,7	0,38
1073	-23,7	0,24	-28,2	0,28	-24,7	0,25
1173	-42,0	0,17	-34,9	0,33	-36,2	0,17
1273	-80,4	0,05	-57,2	0,16	-56,2	0,05

Т К	ФФ-1Ф		УКС-ФЛ			
	з		1 з		з	
	ОВС	ОП	ОВС	ОП	ОВС	ОП
373	—	17,8а	—	21,92	—	16,62
473	—	6,76	—	5,04	+15,2	0,81
573	+23,7	2,15	+37,2	1,69	+0,9	3,50
673	+0,6	3,63	+8,0	2,82	-10,8	3,27
773	-19,9	0,49	+5,6	0,65	-6,1	0,41
873	-28,4	0,46	-7,0	0,12	-15,4	0,39
973	-22,9	0,39	-9,2	0,36	—	—
1073	-34,4	0,16	-19,8	0,33	-31,1	0,14
1173	-57,5	0,06	-29,6	0,29	-31,8	0,24
1273	-89,4	0,06	-37,8	0,36	-41,7	0,16

ОП исследованных смесей. Данные таблицы позволяют заключить следующее: окислительная способность газов непрерывно падает с повышением температуры генерации газа. Если до температуры 350—550 °С атмосфера является окислительной, то при более высокой температуре она становится восстановительной. Содержание смолы не сильно изменяет состав атмосферы, хотя некоторая тенденция к усилению восстановительной способности с увеличением

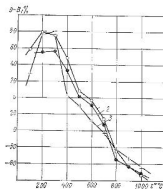


Рис. 5.10. Зависимость O—B (объемное содержание газов) от температуры смесей с смолками ФФ-1 (1), ФФ-1Ф (2) и УКС-ФЛ (3)

содержания смолы. При этом нет принципиальной разницы в окислительно-восстановительной способности рассматриваемых смол. Особенно это видно из рис. 5.10, на котором окислительная способность этих смол в зависимости от температуры представлена в виде разности суммы окислительных O и восстановительных B газов. Вначале O—B несколько растет, что объясняется главным образом резким увеличением паров воды в составе газовой фазы за тем начинает падать по мере ее конденсации. При расходе примерно при тех же температурах что и при рассмотрении зависимости ОВС как функции темпера

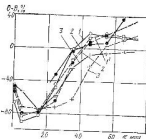


Рис. 5.11. Зависимость O—B (объемное содержание газов) от времени после заливки металла: 1, 2, 3 — стержни, содержащие соответственно 1,5 % смолы ФФ-1, ФФ-1Ф и УКС-ФЛ; 1', 2', 3' — со 2 % этих же смол

туры. Это падение вызвано в основном все уменьшающимся с содержанием паров воды и увеличивающимся содержанием водорода и оксида углерода с повышением температуры нагрева смеси.

Газ, образованный этими же смолами, отбирали из контактной зоны металла — стержень (см рис. 5.6). Результаты представлены на рис. 5.11. При термическом ударе O—B, равная первоначально 21 % (объемное содержание кислорода воздуха, находящегося в парах смеси) резко понижается, доходя в некоторых случаях до 90 % так как в этот момент идет интенсивная термодеструкция органических соединений, выделяющих водород и метан. Взаимодействие идет со все увеличивающимся дефицитом кислорода, приводящим к образованию оксида углерода. Однако с течением времени термодеструкция затухает, в результате чего в атмосфере стержня все больше появляется окислительных газов.

Параллельный замер температуры в месте отбора газа из стержня выявил следующие ее усредненные значения:

Время после заливки, мин	5	15	25	35	45	55	65
Температура °С	1050	900	800	735	700	670	630

Если сравнить O—B (рис. 5.10) с такими приведенными

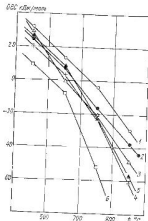


Рис. 5.12. Зависимость ОВС атмосферы смесей с ГСВ от температуры и различных добавок:

1 — смесь с 2 % (по массе) ГСВ (базовая смесь); 2 — 0 + 2 % серпячного графика; 3 — 0 + 5 % серпячного графика; 4 — 0 + 5 % саморастяжного графика; 5 — 0 + 5 % саморастяжного графика и 3 % NiFePO<sub>3</sub>; 6 — 0 + 5 % токсигенова



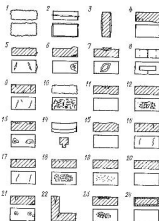


Рис 6.2. Поверхностные дефекты отливок:

1 — присар; 2 — залив; 3 — подутость; 4 — пористость; 5 — прошивки; 6 — обвал; 7 — углубки; 8 — ступи; 9 — плены; 10 — морщинистость; 11 — вылет; 12 — артефакты; 13 — коррозия; 14 — коррозия; 15 — коррозия; 16 — коррозия; 17 — коррозия; 18 — коррозия; 19 — коррозия; 20 — коррозия; 21 — коррозия; 22 — коррозия; 23 — коррозия; 24 — обвал; 25 — обвал; 26 — обвал.

см рис 6.1) К **залывам** относятся приливы отливок, образованные по плоскости разлома формы. Причиной появления подобных дефектов является наличие пустот в форме, возникающих в большинстве случаев за счет истончения модельной технологии и нарушении

процесса. Основным мероприятием по борьбе с залывами является повышение точности изготовления основы сборки форм и культуры производства. **Подутость** появляется в результате повышенного статического давления жидкого металла на стенку неуплотненной формы (такой дефект называют также распором). Основными мерами борьбы с таким дефектом являются достижение необходимой степени уплотнения формы и максимальное снижение влаги в смеси. **Наростами** являются места в отливке образованные в результате разрушающего действия струи жидкого металла на поверхностные участки формы или стержня. На месте размытого участка на отливке появляется утолщение. Меры борьбы с наростами — это организация правильного подвода металла и повышение поверхностной прочности формовочных и стержневых смесей. **Прожогами** (или трещинами заусенцами) называют приливы на поверхности отливки образованные вследствие затекания металла в трещины формы или стержня. Трещины образуются главным образом как результат теплового расширения форм и стержней в особенности из само твердеющих смесей с синтетическими смолами, исследуемыми в качестве связующих. Основным средством борьбы с прожогами в этом случае является ввод в смесь пылевидной фракции железных оксидов (а еще лучше — гематита  $Fe_2O_3$ , полученного химическим путем), увеличивающих теплопроводность смеси и ускоряющих тем самым затвердевание поверхностного слоя металла. Поверх-

ностный дефект **обвал** образуется на отливке благодаря разрушению части формы (или стержня) вследствие недостаточной прочности смеси.

Другими дефектами относящимися к приливам являются так называемые **задиры**, обжигом и подбоям пороки. **Задиры** возникают вследствие соприкосновения между собой (с частичным разрушением) отдельных частей верхней и нижней полуформ при сборке формы. Обжигом есть результат чрезмерного обжигания (с местными разрушениями) стержней и некоторых частей полуформ, наблюдающегося при сборке форм. Основной причиной образования задиры и обжигов является неудовлетворительное состояние модельной опочной оснастки.

Дефекты, связанные с частичным разрушением форм и стержней часто сопровождаются песчаными засорами (или раковинами), которые могут быть как на поверхности отливки так и внутри нее. Большинство дефектов данной подгруппы в той или иной степени ухудшает целостность и шероховатость поверхности отливок снижая их качество.

**Ужжины** являются дефекты, образующиеся вследствие разрыва слоя формовочной смеси в зоне конденсации влаги и затекания в полость разрыва жидкого металла. Основными мерами борьбы с ужжином являются применение смесей с минимальной влажностью, заливка в сухие формы, приливание мест формы, предрасположенных к образованию ужжинов. **Спаи** (иногда называют неслитинами) образуются при соприкосновении двух потоков в большой степени охлажденного металла. Поверхности этих потоков вследствие низкой температуры не в состоянии слиться между собой. К тому же указанные поверхности как правило покрыты слоем оксидов, также мешающих слиянию потоков. Мерами борьбы с ними являются повышение температуры заливаемого металла и применение материалов формы имеющих более низкое значение коэффициента теплоемкости и создающих в полости формы восстановительную атмосферу.

**Пленами** называют дефекты отливок возникающие благодаря окислению легко окисляющихся элементов сплава (алюминия, хрома, титана и др.). Окислившийся металл в виде пленок попадет как внутрь тела отливки так и на ее поверхность нарушая в обоих случаях сплошность стенок. Мероприятиями по борьбе с пленами являются плавка и заливка металла в вакууме (или в среде нейтральных газов) повышение температуры заливаемого металла создание в полости формы восстановительной атмосферы.

**Морщинистость** (складчатость) — поверхность отливки содертящая множество беспорядочно расположенных морщин или складок. По мнению А. В. Лактемовского и других морщинистость образуется из за скопления на поверхности формы (или стержня) большого количества так называемого блестящего углерода, выделяемого в процессе высокотемпературного разложения углеводородов. Профилактика предотвращения морщинистости —

уменьшение органических составляющих смеси и улучшение вентиляции формы и стержней. К уменьшению этого дефекта ведет и повышение температуры заливаемого металла.

**Выпот** — дефект отливки из серого чугуна образующийся в процессе его затвердевания, — это скопления включений шаровидной формы на поверхности отливки. Металл отливки и включения имеют один и тот же химический состав. Дефект образуется за счет выдавливания на поверхность жидкого металла из внутреннего пространства отливки, когда затвердевание сопровождается выделением графита, идет с увеличением объема. Поэтому внутри жидкого металла, заключенного в затвердевающую по поверхности отливки корочку, возникает повышенное давление, которое встраивается прорывом корочки с образованием шарообразных поверхностных включений. Форма включений определяется силами поверхностного натяжения. Иногда давление с образованием такого же дефекта возникает за счет возвышенного содержания газов в жидком металле, интенсивно выделяющихся из сплава с понижением температуры при затвердевании. Механизмы борьбы являются зависящие химического состава чугуна в сторону уменьшения углеродного эквивалента а также понижение содержания растворенных в металле газов.

**Алессинова корка** — так называют поверхность отливки, которая по внешнему виду профиля и опрессованной стеной оправдывает свое название. Образование дефекта связывают [83] с отделением стенок формы от отливки во время затвердевания и вторичным расплавлением первоначально затвердевшей корки металла. Механизмы борьбы являются мероприятия, направленные на увеличение теплопроводности и теплоемкости материала формы. В частности качество поверхности отливки повышается с введением в формовочную смесь оболочкового литая порошкообразной железной окалины.

**Коррозиями** называют дефекты отливок образующиеся калязмибризгатами жидкого металла при заливке в форму сопровождаемой его разбрызгиванием. Причины разбрызгивания металла при заливке может быть несколько: неправильно рассчитанная или сконструированная литейковая система, чрезмерно увлажненная смесь неправильное (небрежное) заполнение формы и т. д. Образовавшийся из брызг шарик металла затвердевает одновременно покрываясь оксидной пленкой, и попадает на еще не затвердевшую поверхность формы. Углерод заливаемого металла реагирует с оксидной пленкой с образованием оксида углерода вокруг шарика. При этом металл шарика может не слиться с металлом отливки.

**Коробление** отливки т. е. искажение ее конфигурации в том числе и геометрии поверхности — дефект obligatory своим возникновением напряжения превысивший предел упругости что приводит к необратимым деформационным изменениям конфигурации отливки. Мероприятия по предупреждению коробления от

ливок неоднозначны. Основным мероприятием является создание условий равномерного охлаждения до полного остывания металла.

В соответствии с классификацией дефектов поверхности отливок (см рис 6.1) дефекты поверхностного слоя разделены на четыре подгруппы: трещины, газовые дефекты, несоответствие структуры металла и несоответствие химического состава.

**Горячие трещины** возникают в отливках в процессе затвердевания при температурах, близких к температурам солидуса, вследствие достижения усадочными напряжениями предела прочности металла. Линейная усадка металла начинает проявлять себя с момента образования сплошного каркаса из сросшихся дендритов поверхностной корки отливки. В этот момент металл характеризуется очень низкими прочностными и пластическими свойствами, поэтому возникающие вследствие торможения линейной усадки напряжения быстро достигают предела прочности, что и приводит к образованию трещин. Эти трещины носят междендритный характер поэтому имеют неровный рваный профиль. Поверхность горячих трещин является сильно окисленной. Основными мероприятиями по борьбе с ними являются создание максимально податливой формы применение сплавов, имеющих более высокий предел прочности при температурах образования горячих трещин. Улучшение конструкции отливки в направлении уменьшения торможения линейной усадки.

**Холодные трещины** образуются при температурах, лежащих ниже температуры перехода металла из области эластических деформаций в область упругих (для стали это ниже 620—650 °С, чугуна — ниже 400—650 °С). В отличие от горячих холодные трещины обладают прямолинейным профилем, разрушая при разрыве как граничные зерна так и сами зерна металла. В зависимости от температуры образования поверхность холодных трещин может иметь цвета побежалости или быть совсем неокисленной. Образование холодных трещин связано внутренним напряжением (главным образом термическим или фазовым, когда структурные превращения протекают с изменением объема). Основными мерами борьбы с холодными трещинами являются конструктивные (или технологические) упрочнение отливки в местах возможного возникновения трещин и создание условий равномерного охлаждения всех узлов отливки.

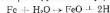
**Межкристаллические** (межзеренные или сеточные) трещины образуются на отливках из некоторых легированных сталей как следствие действия внутренних усадочных напряжений на границах зеренных аустенита по которым произошло выделение неметаллических включений (избыточных фаз), достигших предельной концентрации по растворимости в аустените. Чаше всего такими неметаллическими включениями являются сульфиды и нитриды алюминия выходящие по границам зерен аустенита в виде цепочек или непрерывных плечоных выделений. Межкристаллические трещины, как правило, образуются во внутренних

зонах отливок (внутренние трещины) однако иногда они могут выходить и на поверхность шлюпчинная сетка ризара образую щуюся на внутренней стороне изложниц при длительной их экс плуатации. Для предупреждения данного дефекта в стали умень шают содержание серы и азота выдерживая на определенном уровне содержание алюминия. Кроме того в форме при заливке жидкого металла создается восстановительная атмосфера

**Ситовидная пористость** — дефект, причина которого в том что отливка содержит большое количество мелких газовых вклю чений которые могут выходить на поверхность (открытая сито видная пористость) и быть в подповерхностных слоях (закрытая или подкорковая ситовидная пористость) обнаруживаемая в про цессе механической обработки детали. Существует несколько ме ханизмов образования ситовидной пористости. Так этот дефект может возникать за счет взаимодействия оксидов железа всегда имеющихся на поверхности заливаемого сплава, с углеродом по реакции



Выделяющийся оксид углерода является источником мелких га зовых пор. Такая газовая пористость может быть только открытой. Другой механизм образования ситовидной пористости состоит в том что с железом реагирует влага формовочных материалов



Выделяющийся при этом атомарный водород частично растворяется в поверхностном слое жидкого металла. В начале затвердевания растворенный водород (в соответствии с законами кристаллизации) «отжимается» от поверхности в глубь металла. Однако его концен трация может достичь при этом предела растворимости который уменьшается с понижением температуры. Тогда водород начинает выделяться из раствора в виде мелких пузырьков в подповерх ностном слое металла отливки. Если в самом начале такого водо рода оказалось столько что он стал выделяться с момента затвер девания то пористость будет открытой.

Кроме того, ситовидная пористость может наблюдаться в от ливках заливаемых в формы с азотсодержащими связующими (например с карбамидной смесью). При термодеструкции атомар ный азот будет образовывать азотистую пористость. Меропри ятия по борьбе с ситовидной пористостью является применение сухих форм со связующими не содержащими азот. Создание в форме восстановительной атмосферы также будет способство вать получению отливок без разбрызгиваемых дефектов.

**Газовые раковины** — полости в металле отливки образованные пузырьками газа. Последние возникают как из-за выделения газа из металла так и благодаря поступлению его из материала формы. При образовании газовых раковин вследствие поступления газа из формы они являются как правило открытыми т. е. вы

ходят на поверхность отливки. Образование газовых раковин по этой причине связано с высокой газотворной способностью мате риала формы и плохой вентиляцией (низкая газопропускная способность). Недостаточное число или полное отсутствие вентиляционных каналов. Мерой по борьбе с газовыми раковинами является устранение перечисленных выше причин их возникновения. **Вскип** — местное поражение отливки газовыми раковинами, когда жидкий металл соприкасается с участками формы (или стержня) имеющими повышенную газотворность. В этом случае в металл проникает большое количество газов, которые формируют скопле ние газовых раковин, одновременно резко ухудшая качество поверхности в месте их перехода из формы в отливку так как га зовыделение формы продолжается и в момент перехода корки отливки из жидкого состояния в твердое. Мероприятиями по борьбе являются устранение причин появления местного увели чения газотворной способности материала формы и улучшение ее вентиляции.

На ряде отливок наблюдаются дефекты связанные со струк турой металла. В частности при заливке серого чугуна поверх ностный слой иногда может иметь структуру белого чугуна — *отбел*. Причиной образования такого дефекта являются повышен ные скорости охлаждения отливки при затвердевании одновре менно с повышенным содержанием углерода в кристлях в чугуне. Образование отбела в таких отливках предупреждают модифици рованием чугуна ферросилицием, силикокальцием и некоторыми другими материалами. В отливках из белого чугуна наоборот, иногда можно встретить поверхностный слой металла, имеющий структуру серого чугуна — *половинчатость*. Это явление связа но с повышенным содержанием углерода и кремния в чугуне предупреждая его правильной дозировкой указанных элементов в соответствии с толщинами стенок отливок а также некоторыми специальными составами модификаторов.

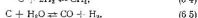
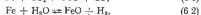
В структуре тонких поверхностных слоев отливок из высоко прочного чугуна иногда наблюдаются выделения пластичного графита вместо шаровидного. Эту аномалию связывают с взаимо действием металла с материалом формы, выражающемся в намы шении поверхностной пленки металла кислородом и водородом с образованием оксида магния что приводит к прекращению дей ствия магния как модификатора в поверхностном слое отливки. Предупреждают образование такого дефекта увеличением количе ства магния при модифицировании и заливкой в сухие формы име сто сырых.

## 6.2 ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

В процессе формирования отливки в поверхностном слое идут процессы, результатом которых является изменение структуры и некоторых свойств этого слоя. Это — окисление, обезуглерожива

ние и науглероживание, обезлегиrowание (уменьшение содержания легирующих элементов поверхностного слоя). В зависимости от состава атмосферы формы может иметь место насыщение поверхностных слоев металла серой и фосфором либо наоборот обезсеривание и обезфосфоривание. Для ряда отливок эти изменения поверхностного слоя являются весьма существенными. Примером могут служить отливки из низкоуглеродистых коррозионно-стойких сталей заливаемые в формы, где идет процесс науглероживания вызывающий межкристаллитную коррозию. Другим примером являются лопатки газовых турбин, устанавливаемые на изделия без механической обработки профиля. Если не применять специальных мер по поверхностному слою металла этих отливок будет иметь повышенное содержание ряда легирующих элементов что отразится на эксплуатационных свойствах изделия. Многие изменения химического состава металла поверхностного слоя отливок связаны с диффузионными процессами.

Науглероживание поверхностного слоя протекает главным образом через газовую фазу, сформировавшуюся на границе раздела металл-форма. Основными реакциями взаимодействия газов с металлом и углеродом являются:



Наличие в газовой фазе 25 % (по объему) водяного пара полностью предотвращает углеродообразование. Поэтому решающими реакциями науглероживания будут такие в которых пары воды не участвуют, т.е. обратные реакции (6.3) и (6.4).

Если атмосфера формы будет окислительной (за счет диоксида углерода и воды, кислород во внимание не принимаям ввиду малого содержания), то одновременно она будет и обезуглероживающей. Восстановительная атмосфера создаваемая оксидом углерода и метаном, будет науглероживающей (железо при этом играет роль катализатора). Водород, являясь восстановительным газом [реакция (6.2)], будет обезуглероживать сталь [реакция (6.4)]. Как свидетельствует практика термической обработки, активность водорода резко усиливается в присутствии паров воды. Так как паров воды в атмосфере литейной формы в некоторые моменты достаточно много в обезуглероживании большую роль играют реакция (6.5). Обезуглероживание наблюдается главным образом при высоких температурах (выше 1000 К), однако оно может иметь место и при более низких температурах но вследствие слишком малых значений коэффициента диффузии не будет играть существенной роли.

Термодинамические расчеты свидетельствуют о том что с понижением температуры способность метана выделять атомарный углерод по обратной реакции (6.4) уменьшается. Расчет по уравнению [53]

$$\lg K_p = 29417/T - 0.1131 \lg^2 T - 4.363 \cdot 10^{-3} T + \\ + 1.29 \cdot 10^{-7} T^2 - 0.5438$$

реакции (6.4) показывает, что при охлаждении отливки реакция метана с выделяемым атомарным углеродом должно закончиться при температуре 820 К. Выделение углерода в соответствии с обратной реакцией (6.3) наоборот с понижением температуры усиливается. Теоретически по рассматриваемой реакции углерод должен выделяться начиная с температуры 960 К и ниже. Науглероживающую способность атмосферы оценивают по массе сажаемого углерода выделяемого единицей объема газа при протекании реакции в данных условиях до состояния равновесия. Рассматриваемые реакции характеризуются следующими расчетными значениями сажистого деления [53]

t °C	1100	1000	900	800
$2\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$ т/м <sup>3</sup> CO	1.3	4.3	13.9	64.2
$\text{CO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{C} + \text{H}_2\text{O}$ т/м <sup>3</sup> CO	1.1	3.4	10.7	137.5
$\text{C} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$ т/м <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	532.7	530.6	525.6	513.0

Основным «виновником» науглероживания отливок является метан или атомарный углерод образующийся при температуре менее 700 °C в поверхностном слое металла отливки растворяться не в состоянии ввиду малого значения коэффициента диффузии. В этих условиях углерод выделяется в виде сажи (сажистый углерод), покрывая поверхность отливки и зерен огнеупорной основы формы черным налетом.

Атмосфера формы, образованная термодеструкцией синтетических смол, используемых в качестве связующих материалов глубоко науглероживающая в отличие от газовой фазы, возникающей при заливке металла в жидкостепольные формы где она является окислительной, а следовательно обезуглероживающей.

Науглероживание при литье в формы с синтетическими смолами зависит от толщины и расположения стенки отливки (рис 6.3). Чем толще стенка отливки, тем выше науглероживание и больше науглероживанный слой металла так как с увеличением толщины стенки увеличивается время пребывания отливки при температуре, когда возможны диффузионные процессы углерода.

Увеличение глубины науглероживанного слоя X от продолжительности процесса t при прочих равных условиях подчиняется параболическому закону т.е.

$$X = k\sqrt{t}$$

Так, глубина проникновения углерода из атмосферы формы возрастает от 1 до 2,1 мм с увеличением толщины стенки отливки от 10

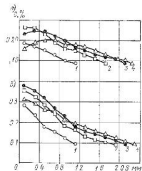


Рис. 6.3. Влияние толщины, расстояния между стенками отливки и расстояния от поверхности  $S$  на соотношение содержания  $C$  стали марки 08ГДНФЛ (а — поверхность со стороны формы; б — поверхность со стороны внутреннего стержня) при толщине стенки, мм [1]  
1 — 10; 2 — 20; 3 — 50; 4 — 70

до 70 мм. Если в процессе охлаждения возможен отход отливки от стенки формы вследствие усадочных процессов, то ввиду с науглероживанием поверхности в первые моменты после затвердевания отливки будет иметь место некоторое обезуглероживание за счет кислорода воздуха, попадающего

в зазор между формой и отливкой с момента ее отхода от стенки формы. При условии, что такой зазор не возникнет, науглероживание будет продолжаться значительно дольше.

По мере уменьшения науглероживающей способности газов выделяющихся из смеси при заливке форм стальной, входящие в состав формовочной смеси синтетические смолы располагаются в следующей последовательности: ФФ-1Ф, ФХ-1, ФХ-2; смесь со смолой УКС-1 и жидким стеклом не создает науглероживающей атмосферы [89].

В работе [74] дано сравнение ударной вязкости и микротвердости образцов, отлитых в формах из ХТС (со смолой ФФ-1), с образцами полученными при заливке в жидкостеклянные (ЖС) формы (табл. 6.1 и 6.2). Приведенные данные показывают влияние изменения содержания углерода в поверхностном слое на механические свойства материала отливок. Ударная вязкость образцов из стали марки 12ДНГФЛ, залитых в формы из ХТС, падает по сравнению с образцами, залитыми в жидкостеклянные формы, на 7—19 % стали марки 08ГДНФЛ — на 6—48 % и стали 12Х25Н5ТМФЛ — на 18—27 % соответственно. Судя по изменению микротвердости и содержания перлита в металле поверхностных слоев, при заливке в жидкостеклянные формы имеет место некоторое обезуглероживание поверхности слоя, что также свидетельствует об окислительном характере атмосферы этого вида литых форм.

Термическая обработка отливок на воздухе приводит к некоторому перераспределению углерода в поверхностном слое однако до конца содержание углерода не выравнивается (рис. 6.4).

Образцы из рассматриваемых сталей дают повышенную склонность к межкристаллитной коррозии. Количество карбидов, рас-

Таблица 6.1. Значения ударной вязкости образцов полученных заливкой в формы из ХТС и ЖС (средние из пяти испытаний)

Марка стали	Материал формы	Ударная вязкость «Дж.м <sup>2</sup> »				
		в литых состоянии при 20 °С	после термической обработки при температуре испытаний, °С			
			+20	0	-20	-50
12ДНГФЛ	ХТС	0,48	0,64	0,42	0,43	0,39
	ЖС	0,57	0,73	0,52	0,48	0,42
08ГДНФЛ	ХТС	0,38	0,68	0,62	0,49	0,41
	ЖС	0,73	0,89	0,66	0,63	0,46
12Х25Н5ТМФЛ	ХТС	0,21	0,11	—	—	—
	ЖС	0,25	0,15	—	—	—

попадающих по границе зерен, в металле поверхностного слоя увеличено по сравнению с металлом сердцевинным.

Для предварительного определения возможной степени науглероживания отливок из низкоуглеродистых малолегированных сталей заливаемых в формы со связующим ФФ-1, предложена программа [2] позволяющая учесть ряд технологических факторов (рис. 6.5)

Таблица 6.2. Микротвердость и количество перлита образцов залитых в формы ХТС и ЖС после термической обработки

Марка стали	Материал формы	Микротвердость (металлургия), 10 <sup>-2</sup> Па, и величина слоя перлита (вазвината), %, по расстоянию от поверхности образца, мм						
		300	400	500	1200	1500	1800	2100
		12ДНГФЛ	ХТС	29	29,6	27,6	26,6	26,2
26	27,5			27	25	22,5	20,5	19
ЖС	22,6		23,4	24,6	24,6	23,3	25,4	25,4
	10		12	13	14	15,3	16	16,5
08ГДНФЛ	ХТС	23,8	26,2	25,6	22,2	22,6	21,4	21,4
		23	25	24	22	19	18	15,5
	ЖС	20	22,2	21,6	23	21	22,6	22,2
		6	7,5	9,5	10	11	10,5	12

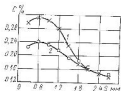


Рис. 6.4. Влияние расстояния от поверхности  $S$  и вида термической обработки ( $1$  — до обработки;  $2$  — после нее) на содержание углерода  $C$  отливок из стали марки 12ДНГФЛ, полученной с помощью легирующей ХТС

добавок, влияющую состав атмосферной формы и затрунивающих ее контакт с металлом отливок. Мероприятия, указанные выше, могут значительно снизить и даже полностью предотвратить науглероживание поверхности отливок.

Глубина обезлегированного слоя при литье по выплавляемым моделям зависит главным образом от материала формы, толщины стенок отливок и температуры заливочного сплава. Влияние содержания кремния в пересчете на оксид кремния в гидролизе силиката и толщины стенок отливок на глубину обез-

легирования показано на рис. 6.6 (где огнеупорным наполнителем суспензия была электрокорунд). Сравнение аналитической микроаллотического состава огнеупорной основы суспензии для получения форм на толщину обезлегированного слоя показывает (табл. 6.3), что минимальное обезлегирование наблюдается при заливке в формы из электрокорунда. Дистенсиллиманит и шпироксин в своем составе оксиды кремния, не снижают проблему обезлегирования. Ускорение процесса охлаждения отливок (заливка в формы без наполнителя) резко снижает (в большинстве случаев уменьшая до нуля) глубину обезлегирования. Эксперименты с изменением температуры заливочного сплава ЖОБ-К также показывают, что понижение температуры от 1590 до 1490 °C уменьшает толщину обезлегирования в 1,5–2 раза. Особенно заметно снижение обезлегирования при понижении температуры заливки с использованием электрокорундовых форм [24].

В табл. 6.4 представлено содержание легирующих элементов сплава ЖОБ-К на поверхности металла и оксидов пригарного слоя отливок, залитых в формы из различных материалов.

Из табл. 6.4 видно, что, во-первых, только электрокорундовые формы обеспечивают требуемый состав сплава, во-вторых, обезлегирование хромом, алюминием и титаном повышается с увеличением диоксида кремния в составе огнеупорной основы формы, в-третьих, чем больше кремнезема в материале формы, тем больше

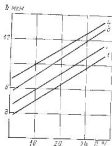


Рис. 6.6. Зависимость толщины  $\delta$  обезлегированного слоя отливок из сплава ЖОБ-К от содержания кремния  $C$  (в расчете на  $SiO_2$ ) в гидролизе силиката при толщине стенок отливок, мм:  $1$  — 8;  $2$  — 10;  $3$  — 12;  $4$  — 14

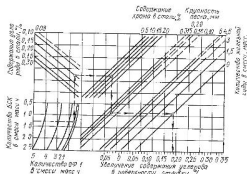


Рис. 6.5. Новографик для определения науглероживания поверхностного слоя отливок

Толщина отливок, мм	Толщина обезлегированного слоя (мм) при заливке в формы из материалов					
	$Al_2O_3$		$Al_2O_3, SiO_2$		$ZrO_2, SiO_2$	
	без наполнителя	с наполнителем	без наполнителя	с наполнителем	без наполнителя	с наполнителем
8	0	3	0	5	0	6
10	<2	6	<2	6	<2	6
12	0	6	0	4	0	10
14	0	8	0	12	0	13

Таблица 6.4 Состав контактной зоны сплава ЖС8 К — форма

Материал формы	Анализ содержания, %							
	элементы на поверхности отливки			элементы в прилегающем слое				
	Cr	Al	Ti	SiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	4rO <sub>2</sub>
Пылевидный кварц	8,5	2,6	1,61	88,1	3,4	6	2,1	—
Диоксидслюдаманит	9,6	5,1	2,1	31,4	1,7	65,1	1,4	—
Циркон	9	2,9	1,8	24	2,4	5,4	1,6	66,2
Электрокорунд	10,5	5,8	2,6	2,2	0,5	96,3	0,6	—
По ТУ	9,5—12	5—6	2,5—3,2	—	—	—	—	—

пригарный слой содержит оксиды элементов, которыми обедняется сплав. Следовательно, обезлегиживание хромом, алюминием и титаном осуществляется за счет взаимодействия указанных химических элементов (или их оксидов) с оксидами кремния материала формы. Взаимодействие усиливается с повышением температуры и усугубляется с увеличением длительности процесса. Аналогичным образом, т.е. благодаря взаимодействию хрома с оксидами кремния формы, образуются точечные поверхностные дефекты при литье по выплавляемым моделям лопаток из стали марки 313Л1. Замена пылевидного кварца в этилсиликатной суспензии электрокорундом (удаление из сферы реакции одного из компонентов) позволяла добиться ликвидации точечных поверхностных дефектов.

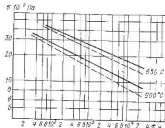


Рис. 6.7. Влияние температуры литья и обезлегиживания на глубину прочистки сплава ЖС8-К (сплошные линии — механически обработанные образцы; пунктирные линии — образцы с обезлегиживающим слоем глубиной около 100 мкм)

Естественно, уменьшение содержания хрома, алюминия и титана в поверхностном слое металла отливок ухудшает механические характеристики сплава (рис. 6.7). В меньшей степени, как это следует из табл. 6.5, обезлегиживание на глубину до 100 мкм сказывается на свойствах сплава получаемых при кратковременных испытаниях (кроме пластических свойств).

Обезлегиживание можно в значительной степени

Таблица 6.5. Сопоставление свойств сплава ЖС8 К при кратковременных испытаниях литейных (числитель) и механически обработанных (знаменатель) образцов

t, °C	Механические свойства				
	σ <sub>0,2</sub> · 10 <sup>-3</sup> Па	σ <sub>к</sub> · 10 <sup>-3</sup> Па	δ, %	ψ, %	α · 10 <sup>-3</sup> Дж/м <sup>2</sup>
	20	102,3 86	116 104,2	3,5 5,5	7,2 6,2
800	97,4 90,2	103,6 100,1	2,0 4,4	3,4 8,5	0,1 0,08
850	94,5 85,7	98,5 92,8	1,2 2,7	2,9 9	0,12 0,1
900	73,2 79,1	76,6 86	2,2 3,1	4,6 8,2	0,11 0,1

подавить снижением содержания силикатного связующего и оболочке, использованием в качестве огнеупорной основы суспензий материалов, не содержащих диоксида кремния, назначением рациональных режимов литья с ускоренным охлаждением в период взаимодействия отливки с формой, понижением температуры формы и заливаемого металла, а также поверхностным легированием путем ввода в огнеупорную суспензию солей соответствующих элементов.

## Глава 7. АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ФОРМ И ОТЛИВОК

### 7.1. КРИТЕРИИ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА

При системном подходе качество формы рассматривается на трех уровнях — материалы, смеси, форма. Качественными являются смеси, состав которых обеспечивает выполнение заданных ограничений по уровню свойств, оптимальной является смесь с экстремумом одного из основных свойств (текучесть, прочность, выбиваемость и т.д.) при минимальной стоимости. Очевидно, что рационализация и оптимизация технологических процессов на первых двух уровнях является обязательным условием получения качественной формы. Качество литейной формы (тремья уровня) определяется многомерными критериями: зависящими от ее аэродинамических, механических и физико-химических свойств. Текучесть, усадочность, формоземость, определяемые на технологических пробах, следует считать свойствами смеси, а не литейной формы в целом.

Ранее продемонстрировано в основном влияние фланко химических процессов взаимодействия формы и отливки на формиро-

визие поверхностей отливок. В данной главе основное внимание уделено процессам уплотнения смеси определяющим в первую очередь формирование механических и аэродинамических свойств формы: плотности, точности, газопроницаемости. От этих характеристик зависят размеры и распределение масс отливок, качество поверхности, размеров отдельных дефектов и т. д.

В литературе накоплен обширный материал по влиянию процессов формовки на качество отливок. Начиная с 60-х годов были развернуты исследования по оценке параметров качества отливок с помощью методов математической статистики. Результаты исследований представлялись в виде матриц и уравнений корреляции.

Для современного этапа развития теории формовки важнейшее значение имеет многомерная оценка технологических возможностей процессов формовки — по точности размеров, распределению массы, качеству поверхности отливок. Только такая постановка исследований при условии объективного охвата прогрессивных процессов формовки дает возможность получить надежные решения по выбору рациональных и оптимальных процессов. Использование принципов кибернетики позволило разработать методы диагностики качества отливок [50].

## 7.2. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФОРМ

Плотность смеси следует определять по трем характеристикам: средней плотности, плотности в наиболее трудноуплотняемом месте по контуру модели, равномерности распределения.

Для форм с моделями третьей группы сложности (ребристые цилиндры, отливки-представитель станины электродвигателя) при оценке процессов уплотнения важнейшее значение имеет изучение закономерностей процессов перетекания смеси. Ниже приведены показатели для оценки характера деформации смеси в различных точках пространства между ребрами модели.

1 Твердость  $T$  смеси на вытупом элементе формы.

2 Коэффициент перетекания смеси в межреберное пространство модели

$$k_{\text{пр}} = \Delta\delta_{\text{пр}}/\Delta\delta_1, \quad (7.1)$$

где  $\Delta\delta_{\text{пр}}$  — увеличение плотности смеси, которое имело бы место в  $i$  и  $j$  точке межреберного пространства, если бы уплотнение происходило только за счет перетекания смеси;  $\Delta\delta_1$  — общее увеличение плотности смеси в той же точке межреберного пространства.

Величина  $\Delta\delta_{\text{пр}}$  представляется собой удельное (на  $1 \text{ см}^3$ ) приращение смеси в зазоре за счет ее перетекания. Общее приращение плотности  $\Delta\delta_1$ , обусловленное собственно вертикальной деформацией и перетеканием смеси, определялось по следующим соотношениям

$$\Delta\delta_1 = \delta_1 - \delta_{10}, \quad \Delta\delta_2 = \Delta\delta_{\text{пр}} - \Delta\delta_{\text{м}}, \quad (7.2)$$

где  $\delta_1$  и  $\delta_{10}$  — конечная и начальная плотности смеси в  $i$  и  $j$  точке,  $\Delta\delta_{\text{м}}$  — увеличение плотности смеси из-за имеющего место в данной точке сжатия в вертикальном направлении.

3. Относительная вертикальная деформация  $\epsilon$  го участка смеси в межреберном пространстве

$$\epsilon = (l_0 - l_1)/100 \cdot l_0, \quad (7.3)$$

где  $l_1$  и  $l_0$  — конечная и начальная длины  $l$  го участка межреберного пространства.

Величина  $k_{\text{пр}}$  характеризует долю уплотнения за счет перетекания смеси, а величина  $\epsilon$  — в основном долю уплотнения за счет вертикальной деформации смеси в межреберном пространстве модели.

При сжатии столба смеси постоянного сечения и постоянной массы (при отсутствии перетекания) конечная плотность смеси  $\delta_1$  и величина  $\Delta\delta_{\text{м}}$  могут быть получены из следующих соотношений

$$\delta_{\text{м}} l_0 = \delta_1 l_1, \quad \Delta\delta_{\text{м}} = \delta_1 - \delta_0 - \delta_{10} \left( \frac{l_1}{l_0} - 1 \right) \quad (7.4)$$

Выражая  $l_0$  через величину относительной вертикальной деформации  $\epsilon$ , по формуле (7.3) и подставляя ее в формулу (7.4), получим соотношение для определения

$$\Delta\delta_{\text{м}} = \delta_1 \epsilon_1 / (100 - \epsilon_1) \quad (7.5)$$

Учитывая вышеприведенные соотношения, окончательно получим

$$k_{\text{пр}} - 1 = \frac{\delta_{10}}{\delta_1 - \delta_{10}} \frac{\epsilon_1}{100 - \epsilon_1} \quad (7.6)$$

Таким образом, для оценки характера деформации смеси в межреберном пространстве модели необходимо для различных участков смеси по высоте определить величины  $\delta_1$ ,  $\delta_0$ ,  $\delta_{10}$ ,  $l_1$ .

Для имитации процесса уплотнения смеси при изготовлении форм с моделями типа ребристого цилиндра применялась технологическая оснастка, изображенная на рис. 7.1. После засылки смеси передняя стенка 3 откреплялась от стенок опоки 2 и ребер 4, ребра таким образом, оставались в застывшей смеси. На открытую поверхность формы по специальному шаблону наносилась сетка из порошка контрастного цвета. Столбы смеси, находящиеся между ребрами оказывались разделенными на ряд участков по высоте, для каждого из которых измерялась величина  $l_0$ . Затем смесь устанавливали стенку 3 и производили уплотнение смеси после чего стенка 3 вновь снималась. Ребра 4 при этом по-прежнему оставались в смеси. Для каждого из участков измеряли величину  $\delta_1$ , в середине высоты каждого участка определяли также значения твердости  $T_1$ . Значения  $T_1$  и  $\epsilon_1$  усредняли по четырем замерам.

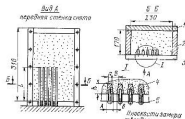


Рис 7.1. Осадки для уплотнения форм с модами ребристых цилиндров  
1 — смесь; 2 — опора; 3 — шпиль

При определении  $\delta_0$  учитывалось что межреберное пространство при засылке смеси заполняется хуже чем остальной объем формы. Поэтому  $\delta_0$  определялась непосредственно в межреберном пространстве для того после засыпки смеси в опору тонкой пластиной отделялась смесь попавшая между ребрами, от остального объема смеси. Величина  $\delta_0$  принималась постоянной по высоте зазора. Величина  $\delta_0$  определяли по значениям твердости  $T_i$  с помощью тарировочных кривых  $T_i = f(\delta)$  для каждой смеси. Для повышения точности зависимости  $T_i = f(\delta)$  образцы брали таким же сечением как и межреберное пространство и описанной выше осадке при аналогичных условиях замера твердости.

Указанные выше характеристики были определены при уплотнении песчано-бетонных смесей с широким диапазоном текучести по Г. М. Орлову — 40—80 %. Смесь с текучестью 40% (№ 1) имела прочность на сжатие 0,04 МПа и насыпную плотность 0,6 г/см<sup>3</sup>; смесь с текучестью 80% (№ 2) имела прочность на сжатие 0,06 МПа и насыпную плотность 0,7 г/см<sup>3</sup>.

Характер изменения показателей для различных процессов показан на рис. 7.2 и 7.3. Наиболее чувствительным к свойствам смеси процессом уплотнения является пресование. Чистое встряхивание и пресование под высоким давлением при использовании смеси обычной текучести не обеспечивают достаточно высоких значений плотности смеси по всей высоте межреберного пространства. С повышением текучести смеси максимум плотности смещается в средние и нижние участки межреберного пространства.

Для каждого из методов уплотнения характер деформации смесей различен, однако могут быть отмечены и общие закономерности уплотнения смеси в межреберных пространствах моделей. Только при встряхивании и для смесей с низкой текучестью развиваются значительные вертикальные деформации для осталь-

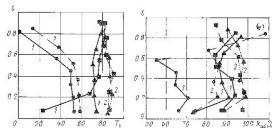
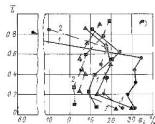


Рис. 7.2. Распределение показателей уплотнения по высоте модели (1 — относительная высота модели) при различных процессах уплотнения смесей различной текучести смеси (%)  
1 — 40; 2 — 80  
● — встряхивание, ■ — пресование, ▲ — вибрация с обесприветным пресованием



ных методов процесс протекания смеси имеет преобладающее значение. Для смесей с низкой текучестью в верхних частях межреберного пространства наблюдается падение значений  $\epsilon_1$ . При встряхивании значение  $\epsilon_1$  становится отрицательным; происходит

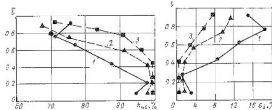


Рис. 7.3. Распределение показателей уплотнения по высоте при различных процессах для различных начальных плотностей смеси (г/см<sup>3</sup>):  
1 — 0,6; 2 — 1,1; 3 — 1,8

разрыв сплошности смеси, образуется арка препятствующая перетеканию смеси в межреберное пространство. Встряхивание с одно-временным прессованием обеспечивает наилучшее сочетание обоих видов деформации смеси. В нижней части межреберного пространства и отличие от прессования плотность даже низкотекучих смесей остается достаточно высокой вследствие высоких значений  $\epsilon_r$ . В верхней части, где при встряхивании имеют место выхлосты, плотность остается высокой вследствие эффекта перетекания. При пескодувно-прессовном процессе независимо от значения начальной плотности относительная вертикальная деформация сжатия смеси уменьшается по высоте к низу модели, что объясняется сильными влияниями внешнего трения. При этом увеличение начальной плотности смеси, обуславливающее увеличение модулей деформации  $\epsilon$  и увеличение сопротивления смеси сжатию, приводит к уменьшению коэффициента вертикальной деформации по высоте.

Уменьшение значений вертикальной деформации в нижних частях и увеличение начальной плотности смеси приводит к увеличению значений коэффициента перетекания  $K_{\text{п}}$ , характеризирующего долю перетекания в общем приросте плотности при уплотнении. При увеличении начальной плотности смеси перед прессованием обеспечивается благоприятное сочетание обоих видов деформации смеси.

Таким образом, процессы уплотнения встряхиванием с одно-временным прессованием и пескодувно-прессовым при изготовлении форм со сложными моделями типа ребристых цилиндров обеспечивают перетекание смеси в межреберные пространства моделей, что обуславливает получение технологически необходимой степени уплотнения при высоких значениях коэффициента неравномерности уплотнения. На рис. 7.4 приведена диаграмма характера изменения твердости смеси в межреберном пространстве и коэффициента неравномерности уплотнения. Данные для встряхивания с допрессовкой встряхивания с одновре-менным прессованием и прессования получены при уплотнении песчано-бенитонитовой смеси с текучестью 60%. Данные по песко-дувно-прессовому процессу — при уплотнении смеси состава рекомендуемого для данного процесса (см. выше). Преимущества данных процессов при условии оптимизации их режимов очевидны.

Диаграмма изменения твердости смеси в межреберном пространстве при уплотнении форм с моделями ребристых цилиндров приведена на рис. 7.5. При встряхивании с одновре-менным прессованием и прессованием с движением модели и пескодувно-прессовом процессе достигается высокий уровень твердости по всей высоте межреберного пространства.

Для изготовления форм с моделями второй группы, не имеющими «карманов» с болтиком (5–10) отношением высоты к наименьшему поперечному размеру (представить можно гусеницу) анализ формирования распределения плотностей по вели-

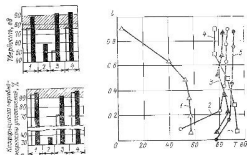


Рис. 7.4. Изменение твердости смеси и коэффициента неравномерности уплотнения в межреберном пространстве модели: 1 — встряхивание с одновре-менным прессованием; 2 — встряхивание с допрессовкой; 3 — прессование под высоким давлением; 4 — пескодувно-прессовый процесс;

□, ▨ — соответственно верху и низу смеси; ▨ — область равномерных значений

Рис. 7.5. Распределение твердости по диаметру смеси в межреберном пространстве при различных процессах уплотнения:

1 — встряхивание с допрессовкой (высота удара встряхивания 40, давление допрессовки 0,20 МПа); 2 — встряхивание с одновре-менным прессованием; 3 — прессование под давлением 2 МПа с движением модели (исходная текучесть песчаной смеси 60%); 4 — пескодувно-прессовый процесс (давление воздуха 0,6 МПа, давление прессования 2 МПа)

чинам  $K_{\text{п}}$  и  $\epsilon_r$  не имеет смысла. Качество формы в этом случае анализируется только по диаграммам изменения твердости смеси и коэффициентам неравномерности (рис. 7.6). Неконкурентно

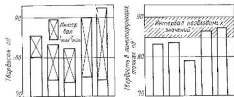


Рис. 7.6. Диаграмма изменения твердости смеси при различных процессах уплотнения:

1 — встряхивание с одновре-менным прессованием; 2 — встряхивание с пескодувно-прессовым процессом; 3 — прессование под высоким давлением; 4 — дифференциальное прессование с закрытием колец колпачка; 5 — дифференциальное прессование при развороте маятников

способным с остальными процессами уплотнения (особенно по твердости смеси в лимитирующих точках) является прессование под высоким давлением. Остальные методы обеспечивают получение влоде удельно-объемных результатов — среднюю твердость смеси по площади разреза свыше 80, твердость в лимитирующих точках близка к необходимой. Наилучшие результаты обеспечивает дифференциальное прессование; повышенное значение параметра  $T_{max} - T_{min}$  в интервале высоких значений твердости 70—90 лишь подчеркивает возможности данного процесса в части управления перетеканием смеси и целенаправленного получения высоких значений твердости в лимитирующих точках за счет всестороннего снижения твердости в точках, не оказывающих существенного значения на качество форм и отливок. Приведенные данные были получены при использовании смесей примерно одинаковых составов и уровня свойств. Таким образом оценка качества форм по критериям плотности смеси является необходимым этапом исследований при выборе процессов уплотнения для изготовления сложных и ответственных отливок.

### 7.3 ОЦЕНКА КАЧЕСТВА; ОТЛИВОК

Основным аппаратом оценки качества отливок был многомерный статистический анализ. Влияние свойств формовочных смесей и других факторов на точность отливок исследовали путем вычисления линейных коэффициентов корреляции. Так как на дежная интерпретация коэффициентов корреляции как достоверного показателя тесноты связи возможна в случае совместного нормального распределения исследуемых случайных величин, определяли статистические характеристики и проверяли нормальность распределения по известным критериям.

Многомерный статистический анализ может быть использован для решения различных задач при оценке качества отливок. Типичными классами задач могут служить следующие: а) анализ формирования размерной точности отливок в условиях кохкретного технологического процесса; б) анализ технологических возможностей процессов по критериям качества отливок; в) многопараметровый анализ качества отливок с разработкой элементов системы управления качеством.

Ниже приведены примеры решений данных классов задач. Реализация класса «в» выполнена в отдельной п. 7.4.

Проведен анализ [43] формирования точности размеров отливок, изготовленных на автоматических линиях безопочной формовки и литейных конвейерах. В качестве отливка-представителя была выбрана отливка «щит». Общая характеристика отливки: материал — чугун марки СЧ 15 (ГОСТ 1412—79); масса 1 кг; габаритные размеры 165 × 54 × 165 мм, преобладающая толщина стенок 6 мм; размеры, по отклонениям которых оценивают точность диаметр 139 мм, высота 54 мм, допусковые отклонения на размеры отливки по II классу точности

(ГОСТ 1855—55 \*) В одной форме находились четыре отливки. Была выбрана ярусная поддошда и питающая литниковая система со свободным уровнем в стояке. На литейных конвейерах применяли обычные астрахивающие машины с допрессовкой с традиционными режимами уплотнения. На автоматической линии фирмы «Диса» (Disa, Дания) с циклоной производительностью 240 форм в час для изготовления данных отливок давление наддува формовочной смеси задают значениями 0,45—0,5 МПа а давление прессования 0,6—0,7 МПа. Смесью притрафованная на смешивающих бегунах фирмы «Штоц» (Stoz, ФРГ). Использовали единую формовочную смесь с добавками гранулированного угля в действии. Плавка чугуна осуществлялась в индукционной тигельной печи типа ИЧТ 10. Температура заливки 1300—1350° С, время заливки 7 с. Продолжительность остывания отливок в форме 15 мин, после чего при температуре 400° С производилась высокотемпературная выбковка. Очистка отливок осуществлялась в газ-топочном и дробестном барабанах; окончательная зачистка — на точильно-шлифовальном станке.

При каждой заливке фиксировали значения исследуемых технологических факторов. Произведены 43 опытные заливки форм. Исследовали размеры образованных одной полуформой, и высот образованных двумя полуформами. Для нижнего и верхнего ярусов моделей металлоагностический напор состав лял соответственно 350 и 160 мм. При формовке на конвейере модели располагались в один ярус. Диапазон изменения некоторых параметров изготовления отливок на автоматической линии представлен ниже.

Вязкость смеси, %	2,9—4,5
Прочность смеси на сжатие, МПа	0,12—0,22
Давление, МПа	
наддува	0,26—0,52
прессования	0,5—0,92
Температура заливки, °С	1250—1340
Углеродистый эквивалент	3,87—4,1

В табл. 7.1 приведены результаты определения точности размеров отливок изготовляемых на автоматических линиях и на конвейерах. Полученные данные свидетельствуют о более высокой размерной точности отливок, полученных на автоматических линиях по сравнению с конвейерным производством.

Следует отметить значительное влияние на точность отливок металлоагностического напора. Точность размеров образованных одной полуформой, на один класс точности выше по сравнению с размерами, образованными двумя полуформами. При этом способ сборки безопочных форм в горизонтальную стойку обеспечивает значительно меньшее поле рассеивания размеров, образованных двумя полуформами, по сравнению со сборкой опочных форм на конвейере.

Таблица 71 Результаты определения точности размеров отливок

Параметр	Отливки, изготовленные на автоматических линиях				Отливки, изготовленные на конвейерах	
	Высота		Диаметр		Высота	Диаметр
	Напор, мм					
	160	320	160	320		
Среднее значение размера	54,22	54,80	139,68	139,60	54,08	139,54
Среднеквадратическое отклонение, мм	0,26	0,29	0,11	0,18	0,53	0,67
План рассеивания, мм	0,78	0,87	0,33	0,54	1,59	2,01
Класс точности (ГОСТ 1855-55)	2	3	1	1	3	3

При изготовлении отливок на автоматических линиях рассчитывали коэффициенты парной корреляции между отклоняемыми размерами отливок и 16 технологическими параметрами: массовым содержанием углерода, хрением; температурой заливки; временем заливки (параметры, влияющие на усадку); прочностью смеси на сжатие, влажностью смеси, температурой смеси; давлением наддува и прессования и др. При изготовлении отливок на конвейерах рассчитывали коэффициенты парной корреляции между отклоняемыми размерами отливок и шестью технологическими параметрами: газопроницаемостью, прочностью на сжатие; влажностью; ослабленностью, текучестью, твердостью нижней платформы по размеру. Значения коэффициентов корреляции приведены в табл. 72.

Анализ полученных результатов позволяет констатировать следующее со стороны формы и точности размеров отливок:

Таблица 72 Значения коэффициентов корреляции

Параметр	Отклонение	
	высоты	диаметра
<i>При изготовлении отливок на автоматических линиях</i>		
Влажность смеси	-0,61	+0,47
Углеродный эквивалент	+0,56	-0,51
Давление прессования	-0,54	-0,39
Температура заливки	+0,305	+0,26
<i>При изготовлении отливок на литейных конвейерах</i>		
Газопроницаемость	-0,31	+0,43
Влажность	+0,32	-0,31
Ослабленность	+0,24	+0,35
Твердость нижней платформы по размеру	-0,55	-0,25

прежде всего влияет деформация смеси, которая определяется ее плотностью (твердостью). Факторы, способствующие повышению плотности, увеличивают размерную точность отливок. Плотность, получаемая при наддуве, в значительной степени зависит от влажности смеси. Углеродный эквивалент и температура заливки определяют усадку — главный фактор, влияющий на точность размеров отливок со стороны металла. Для отливок, изготовленных на конвейерах, влияние плотности смеси, кроме твердости, выражено также через газопроницаемость и влажность.

В соответствии со спецификой производства и эксплуатацией электродвигателей а также для удовлетворения требований в отношении их электрических параметров при одновременном снижении материалоемкости отливки станин должны иметь минимальные отклонения по размерам и массе — соответствию по 2-му и 1-му классам точности (ГОСТ 1855-55\*), шероховатость литой поверхности по 2-му классу (ГОСТ 2789-73\*). Объем выборки отливок составлял 40—100 шт для каждого из процессов формовки. Проверку гильотсы о нормальности распределения проводили с помощью критерия Пирсона. Расчет статистических показателей и построение гистограмм распределения критериев качества отливок станин электродвигателей произведены на ЭВМ «Минск-32» по библиотечной программе. Полученные значения полей рассеивания погрешностей сопоставляли с допустимыми отклонениями по размерам и массе отливок, предусмотренными ГОСТ 1855-55\*. Статистические характеристики критериев точности отливок станин электродвигателей приведены в табл. 7.3. Приведены в таблице средние значения  $\bar{X}$  среднеарифметические отклонения  $\sigma$  для отливок диаметром  $D$ , длиной  $L$  и массой  $G$ .

Предлагаемые для изготовления форм отливок станин электродвигателей рациональные способы — применение процессов улотнения встряхиванием с одновременным прессованием и пескодувно-прессовым методом — обеспечивают высокую стабильность размеров и массы отливок. Показатели этих процессов сопоставимы с такими методами формовки, как литье в оболочковые формы и облицованный кокиль.

Так как для отливок станин электродвигателей важнейшее значение имеет шероховатость поверхностей, тщательность оценки процессов формовки была повышена введением критерия шероховатости поверхностей отливок. Необходимым является получение шероховатости литой поверхности по 2-му классу (ГОСТ 2789-73\*). При этом исключается необходимость последующей шпательки ухудшающей условия поверхностного теплообмена и товарный вид электродвигателя. В связи с этим был проведен комплекс исследований [167] по анализу влияния технологических факторов на шероховатость поверхностей отливок. К постоянным факторам были отнесены марка и химический состав чугуна (СЧ 15), температура заливки (1320—1340°С); основной формовочный материал (наполнитель) — кварцевый песок марок К016А, К016Б

Таблица 73 Статистические характеристики распределения размера и масс отливок станин электродвигателей

Параметр отливок		Способ формования				
		Встряхивание с давлением	Встряхивание с односторонней прессовкой	Литье в форму прессовкой	Объемные формы	Объемные коробки
D мм	$\bar{X}$	126,1	138,8	171,6	127,0	188,2
	$\frac{\Delta\sigma}{\bar{X}}$	0,96	0,68	0,62	0,72	0,60
	Класс точности	2	2	2	2	2
L мм	$\bar{X}$	183,4	189,8	130,9	146,2	237,9
	$\frac{\Delta\sigma}{\bar{X}}$	1,15	0,99	0,76	0,74	0,87
	Класс точности	3	2	2	2	2
G кг	$\bar{X}$	7,51	8,68	5,66	5,38	19,73
	$\frac{\Delta\sigma}{\bar{X}}$	0,30	0,13	0,15	0,16	0,37
	Класс точности	1	1	1	1	1

(ГОСТ 2138—84), размер и форма зерен песка. Переменными факторами являлись: тип смеси (песчано-бетонитовая и плакированная) толщина стенки отливки (8, 12, 16 мм), металлостатистический напор (285, 410, 590 мм); уплотнение смеси в межреберном простом плунже модели (1,25—1,6 г/см<sup>3</sup>). Была разработана методика оценки степени уплотнения поверхностного слоя формы без разрушения его структуры.

Исследования по анализу влияния технологических факторов на шероховатость поверхностей отливок были проведены в два этапа.

Первый этап исследований по оценке влияния типа смеси и ее плотности, металлостатистического напора и толщины стенки был проведен при измерениях на микроскопе УИМ-21. Исследуемые поверхности отливок формировались стержнями-ветками в виде брусков, имеющих в сечении равностороннюю трапецию. Размеры образцов 15 × 10 × 20 — 78 мм. Эксперименты как по параметрам изготовления формы так и по параметрам плавки и заливки

полностью имитировали условия изготовления отливок станин электродвигателей. Базовая длина при измерении 8 мм, шаг измерения 0,1 мм. На каждом из 50 изготовленных образцов было произведено от 200 до 480 замеров по взаимно перпендикулярным трассам. Вероятностную оценку производили при анализе вариационных рядов распределения. Соответствие законов распределения нормальному определяли по критерию Парсона. Были сформулированы следующие предварительные выводы:

1) применение плакированной смеси обеспечивает меньший разброс микрошероховатостей по сравнению с бетонитовой;

2) увеличение металлостатистического напора и толщины стенки увеличивает величину  $R_z$ ;

3) увеличение степени уплотнения уменьшает величину  $R_z$ . Особое внимание было уделено влиянию на величину и закон распределения  $R_z$  плотности смеси, соответствующей определенным режимам уплотнения. Так, для плотности песчано-бетонитовой смеси, соответствующей давлению прессования 0,6, 1,2, 2 МПа, применяемых после предварительного наддува при давлениях 0,55—0,6 МПа, значения  $R_z$  составили соответственно 236, 204 и 186 мкм при среднеквадратических отклонениях 40, 34, 25 мкм. Вывод о необходимости применения давлений прессования 1,8—2 МПа, полученный по критерию технологически необходимой степени уплотнения, был подтвержден, таким образом, и по критерию качества поверхностей — обеспечению  $R_z$  не более 180 мкм.

Второй этап исследований по оценке влияния технологических факторов на шероховатость поверхностей был проведен с помощью специально сконструированного прибора. Существующие в СССР профилографы не могут быть использованы для контроля шероховатости поверхностей отливок, так как согласно ГОСТ 19300—73 предел их измерения по  $R_z$  не превышает 250 мкм. В связи с этим был разработан высокочувствительный контактный прибор — профилограф для измерения шероховатости литых поверхностей с высотой неровностей 20—630 мкм. Действие прибора основано на индуктивном принципе. Ощупывание исследуемой поверхности осуществлялось алмазной иглой с малым радиусом закругления. При этом колебания иглы преобразовывались в изменения напряжения индуктивным методом.

Исследования, проведенные с помощью данного прибора, полностью подтвердили предварительно сформулированные выводы. Однако их основное значение состоит в более объективной количественной оценке влияния технологических факторов на шероховатость. Результаты экспериментальных данных были представлены в виде номограммы (рис. 7.7). Номограмма составлена из трех сопряженных квадратов для следующих пределов изменения переменных: плотность формы в межреберном простом плунже 1,25—1,62 г/см<sup>3</sup>; тип смеси — плакированная песчано-бетонитовая, металлостатистический напор от 285 до 590 мм; толщина отливки

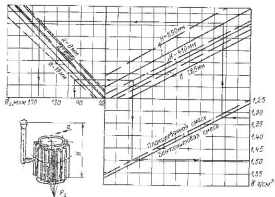


Рис. 7.7. Номограмма для оценки влияния технологических факторов на шероховатость поверхностей отливок станин электродвигателей

8—16 мм,  $R_z = 50 - 210$  мкм. Номограмма обратима: ее можно использовать при разработке технологии изготовления отливки станин при назначении технологических режимов применяемого способа формовки для прогнозной оценки качества поверхности сложных чугунных отливок при освоении новой номенклатуры отливок и т. п. Она позволяет определить (последовательность решения показана стрелками на рис. 7.7) требуемую плотность смеси по шероховатости или прогнозировать шероховатость по заданной плотности смеси.



Рис. 7.8. Диаграмма для выбора технологических факторов необходимой плотности смеси для I, II и III групп отливок станин электродвигателей:

□ — станция уплотнения образцов  
 необходимую плотность отливок  
 по размерам к смеси □ — станция  
 уплотнения образцов; обеспечивающая необходимую  
 шероховатость поверхности;  
 ○ — станция уплотнения образцов  
 оптимальный выбор рационального технологического режима

Объединение результатов данной номограммы с номограммой представленной на рис. 3.15 позволяет строить диаграммы для выбора процессов формовки из условия достижения требуемого уплотнения в межреберном пространстве при котором достигается получение отливки требуемого качества при его многопараметровой оценке. На рис. 7.8 показаны значения плотности форм из песчано-бентонитовой смеси обеспечивающие необходимые точность и шероховатость отливок станин электродвигателей трех классификационных групп с различными высотами приливания.

Представленные исследования формирования параметров качества могут быть реализованы для отливок любой номенклатуры.

#### 7.4 ДВАПЛОСТИКА КАЧЕСТВА ОТЛИВОК

Технической диагностикой называют науку о распознавании состояния технической системы. В диагностике рассматривают систему состояний и связанную с ней систему признаков. Для решения задач диагностики используют методы классификации и группировки, теории распознавания образов, теории информации и т. д. [12, 34, 46]. Классификация — установление правил отнесения объекта к одной или нескольким группам на основании измерения некоторых его характеристик и построения описания классов. Само отнесение объекта к тому или иному классу с известным описанием называют идентификацией.

Методы автоматической классификации (методы кластерного анализа, численной таксономии и т. д.) относят к группе процедур искусственных совокупности методов распознавания. Кластерный анализ отличается от других методов отсутствием обучающей выборки (распознавание без учителя). Ниже приведены положения общей математической постановки задач классификации.

1. Классификация поделяет множество объектов  $U = \{U_i\}$  выборки  $n$ . Каждый объект  $U_i \in U$  обладает числом степеней свободы  $m$  равным числу признаков. Каждый объект может быть описан с помощью многомерной случайной дискретной величины (многомерного признака)

$$x_i = (x_i^{(1)} \quad x_i^{(2)} \quad \dots \quad x_i^{(m)}), \quad (7.7)$$

Плюс  $x_i^{(k)}$  понимают результат измерения  $k$ -го признака на  $i$ -м объекте. Каждый признак  $x_i^{(k)}$  может иметь  $I_k$  градаций. Совокупность признаков с указанным множеством градаций, принимаемых каждым из них называют признаковым пространством.

Создание систем признаков является важнейшим этапом классификаций. Существует два класса задач связанных с оценкой информативности признаков — оценкой достаточности и необходимности некоторой совокупности признаков. Проверка набора

признаков на необходимость имеет смысл для сокращения числа признаков. т. е., по существу, задача выбора из совокупности наиболее информативных признаков есть задача выделения необходимых признаков. Задача проверки набора признаков на достаточность формулируется следующим образом: при заданной системе таксонов и заданной решающей функции определить минимальный набор признаков, позволяющий отделить таксоны друг от друга с заданной точностью. В ряде случаев понятие таксон (кластер) в его образ можно считать аддитивным.

2 Таксоном (кластером, типом) называют подмножество объектов выделяемое на основании некоторого правила. Это правило (алгоритм) называется решающим. Качество классификации (раздробление группировки) характеризуется значениями критерияльной функции. Формирование этой функции связано с введением ограничений и получением экстремумов.

3 Заданы множество объектов  $U$  и эквивалентное ему множество  $X$ . Пусть  $P(X)$  — функция распределения вероятностей, определенная на  $X$ . Пусть  $S$  — множество элементов которого являются кластеры — результаты группировки. Функция  $q: X \rightarrow S$  — группировочная. Если она удовлетворяет условиям ( $R$  — символ действительной оси) существованию для каждого  $k \in K$  двух функций:

$$T_k: X \times x \rightarrow R \quad U_k: S \times c \rightarrow R \quad (7.8)$$

Для функций (7.8) должно выполняться следующее условие:

$$T_k(x, y) = U_k(q(x), q(y)). \quad (7.9)$$

Функция  $q$  является функцией устанавливающей соответствие между элементами подлежащего классификации множества  $X$  и  $S$ , элементами множества  $S$  — результата классификации. При этом  $\{T_k, U_k\}$  — ограничения, которые требуются, чтобы не потерялись свойства элементов множества сохранялись при преобразовании.

Для получения оптимальной в некотором смысле группировки необходимо, чтобы группировочная функция не только удовлетворяла ограничениям, но и составляла экстремум, например минимум некоторому функционалу целевой функции:

$$I: S \rightarrow R \quad I(q) = \min \quad (7.10)$$

В случае, если ограничения являются столь жесткими что нельзя указать группировочной функции, их необходимо ослабить так, чтобы некоторые из них выполнялись лишь приближенно.

Представленные понятия широко используются в квалиметрии — новой научной области объединяющей методы, используемые для обоснования решений при управлении качеством продукции. Техническую диагностику, структура которой показана на рис 7.9, можно рассматривать как составную часть квалиметрии.

Учитывая положение работы [84] указанную структуру можно рассматривать как систему контроля и управления технологи

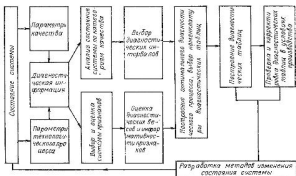


Рис 7.9 Структура технической диагностики

ческим процессом изготовления отливок. При ее анализе приняты решения, определяющие принципы и направления исследований.

1 Технологический процесс изготовления отливки является сложной вероятностной системой. Управляющие воздействия — это параметры металла, смесей, форм, режимы работы оборудования и т. д. Выходные величины процесса — параметры качества отливки. По отношению к системе имеются внешние и внутренние возмущающие воздействия, связанные главным образом с нестабильностью свойств материалов и параметров технологии.

2 Диагностическая информация представляет собой массив экспериментальных данных по связи параметров качества отливок с параметрами технологического процесса. Диагностические измерения дефектов отливок разделяются на категории качества. Диагностическую информацию таким образом, можно рассматривать как описание категорий качества в многомерном пространстве признаков представляющих собой параметры технологического процесса. Сокращение числа признаков т. е. выбор наиболее информативных наиболее влияющих на формирование категорий качества, обуславливает получение эффективной диагностической информации.

3 Главной задачей диагностики является распознавание категорий качества при заданном наборе признаков. Формализация и оптимизация решений определяющих перевод системы в состояние или обуславливающие получение заданных категорий качества отливок, в рамках поставленных задач не рассматриваются. Обратная связь в схеме управления качеством отливок реализуется на уровне технологических рекомендаций.

4 В основе диагностики лежат байесовская теория принятия решений, обеспечивающая получение оптимального классификатора т. е. наименьшую вероятность ошибки (минимальный риск) при принятии решения. Общая идеология применения данной теории к плохо организованым диффузным системам изложена в работе В. В. Налимова по теории эксперимента.

Особенностью рассматриваемых систем является невозможность установления «непривидимых» переломочных, разграничивающих действия переменных различной физической природы. Как иеобайесовский подход к работе трактовало стремление исключить интуитивную вероятность в обоснованном математической статистики. Исключительно важен опыт применения байесовского метода для медицинских систем [27]. Например, доведение расчетов до диагностических таблиц используемых в повседневной медицинской практике.

Байесовская теория настроена в предположении, что задача выбора решения сформирована в терминах теории вероятностей и известна полная вероятностная структура, т. е. все представляющие интерес вероятностные величины. К сожалению, на практике при распознавании образов полная вероятностная структура задачи неизвестна.

Оценки априорных вероятностей состояний (классов) не вызывает затруднений. Иначе обстоит дело с вопросом оценки условий по классу плотностей. Имеющееся число выборок может оказаться малым для их оценки, и, если размерность вектора признаков  $x$  велика, то задача сильно усложняется. Трудность значительно уменьшится, если возможна параметризация условных плотностей исходя из общего представления о задаче. Допустим, что есть некоторые основания предположить, что  $p(x/\omega_i)$  соответствует нормальному распределению со средним значением  $\mu_i$  и ковариационной матрицей  $\Sigma_i$ , хотя точные значения указанных величин неизвестны. Это упрощает задачу, сводя ее к оценке параметров  $\mu_i$  и  $\Sigma_i$  вместо определения вида функции  $p(x/\omega_i)$ . В этом случае используют один из двух широко применяемых способов — оценку по максимуму правдоподобия и байесовскую оценку.

Когда нет оснований допустить, что вид основных плотностей распределения  $p(x/\omega_i)$  известен, применяют непараметрические методы преобразующие пространство признаков таким образом, чтобы в преобразованном пространстве можно было использовать параметрические методы. Одним из непараметрических методов является метод линейного дискриминанта Фишера.

Следует констатировать, что байесовский подход в применении к задачам с не полностью известной вероятностной структурой позволяет построить классификатор, при работе которого будет иметь место уровень ошибки отличный от байесовского уровня ошибки, т. е. вероятность ошибки может превышать минимально возможную вероятность. Не следует воспринимать этот вывод

с пессимизмом, так как он означает лишь необходимость оценки уровня ошибки полученного классификатора. Если уровень ошибки классификатора будет обеспечивать требования практики применительно к контексту решаемой задачи, то следует признать его (классификатор) удовлетворительным. Так как точное аналитическое вычисление уровня ошибки очень сложно (даже если полностью известна вероятностная структура задачи), ошибку определяют обычно при экспериментальных испытаниях классификатора, которые выполняются в годиче на классификаторе системы контрольных выборок с оценкой уровня ошибки по части выборок, классификация которых оказалась неустойчивой. Контрольные выборки должны быть отличными от конструктивных, иначе оцениваемый уровень ошибки окажется излишне оптимистичным.

Если истинный но неизвестный уровень ошибки классификатора равен  $p$  и если классификация  $k$  из  $n$  независимых, случайно взятых контрольных выборок неверна по оценке  $p$  будет  $r = k/n$ . Свойства этой оценки хорошо известны. По таблицам можно определить для полученного  $r$  и заданной вероятности доверительные интервалы для  $p$ . Так если не было ошибок на 10 контрольных выборках, то 95%-ный доверительный интервал для истинного уровня ошибки находится в пределах от 0 до 32%; если не было ошибок на 20 и 50 контрольных выборках, то 95%-ный доверительный интервал будет соответственно от 0 до 17% и от 0 до 8%.

Изложенные принципы построения классификаций были применены [50] при разработке методов диагностики качества стали (связь заданная материал — сталь марки 20Л7 габаритные размеры 1200 × 800 × 200 мм) изготовляемых на автоматической формовочной линии дифференциального прессования. Методика сбора информации обеспечивала тщательное исследование за каждой отливкой от выплавки металла до финишных операций и контроля. Всего было обследовано 74 отливки. Рассмотрены следующие параметры качества отливок: ритгар засоры, газовая пористость, горячие трещины. Установлена связь этих параметров с химическим составом металла, со свойствами формовочной смеси и формы, параметрами технологического процесса. Число признаков 18. Общая выборка экспериментальных данных (полная диагностическая информация) примерно 7000. Главными результатами обработки экспериментальных данных на первом этапе анализа диагностической информации являются диаграммы стабильности параметров металла, смеси, формы и корреляционные матрицы.

Разработку методов диагностики продемонстрируем для оценки состояния по ритгару. Площадь ритгара на отливках представлена 150—5950 см<sup>2</sup>. Данный диапазон делится либо на две категории качества (по экспертным данным), либо на девять категорий на основе теории многомерных группировок.

Применение теории группировок позволяет формализовать формирование категорий качества Безусловно, такая формализация не отражает технологической природы параметров качества, т. е. их влияние на эксплуатационные характеристики изделий. Однако на первом этапе разработки методов диагностики объективная по статистической природе разбивка диапазона изменения дефектов на категории представляется необходимой. В теории группировок обычно подчеркивают диалектическое единство категорий «качество» и «количество» при объяснении существа однородности в статистическом анализе.

В основу распознавания состояний положена байесовская теория. Полная формула Байеса или теорема гипотез, записывается в виде

$$P(D_j/K^*) = P(D_j) \frac{P(K^*/D_j)}{P(K^*)}, \quad (7.11)$$

где  $P(D_j/K^*)$  — вероятность диагноза  $D_j$  после того, как стали известны результаты обследования по комплексу признаков  $K^*$ ;  $P(D_j)$  — предварительная вероятность диагноза  $D_j$  (по статистическим данным);  $P(K^*/D_j)$  — вероятность появления комплекса  $K^*$  у объекта с диагнозом  $D_j$ ;  $P(K^*)$  — вероятность появления комплекса признаков. Итак, приведенная формула позволяет определить принадлежность объекта к той или иной категории качества на основе знания комплекса признаков.

Вероятности  $P(K^*/D_j)$  и  $P(K^*)$  вычисляются по следующим зависимостям

$$\left. \begin{aligned} P(K^*/D_j) &= P(k_1/D_j) P(k_2/D_j) \dots P(k_n/D_j) \\ P(K^*) &= \sum_j P(D_j) P(K^*/D_j), \end{aligned} \right\} \quad (7.12)$$

где  $P(k_1/D_j)$ ,  $P(k_2/D_j)$ , ...,  $P(k_n/D_j)$  — вероятности отдельных признаков при диагнозе  $D_j$ . Интервалы и разряды признаков, используемых для распознавания категорий качества (диагнозов), представлены в табл. 7.4. Массив отливок при распознавании по двум категориям качества несколько отличался от массива отливок при распознавании при числе категорий качества более двух. Этим объясняется незначительность расхождения в крайних значениях разрядов признаков для двух приведенных методов. При анализе формирования двух категорий качества признаки выбирались по меркам информативности: при анализе формирования десяти категорий — на основе матриц корреляции.

Итогом расчетов по формулам (7.11) и (7.12) является построение и завершение «обучения» распознающей модели. «Обучение» заключается в определении на основе статистического материала необходимых для распознавания исходных значений вероятностей  $P(D_j)$  и значений  $P(k_{jm}/D_j)$ , где  $j$  — номер признака, а  $m$  — номер интервала. Эти значения могут быть сведены в определен-

Таблица 7.4 Интервалы и размеры признаков

Признак	Область изменения признака	Интервал значений признака	Разряды признаков (логическая интерпретация)	
			Группировка на девять категорий качества	Группировка на две категории качества
Температура аз. ливки, °C	$K_1$	1545—1665	$K_{11}$ = 1545—1585 $K_{12}$ = 1585—1585; $K_{13}$ = 1585—1605; $K_{14}$ = 1605—1625; $K_{15}$ = 1625—1645; $K_{16}$ = 1645—1665	$K_{21}$ = 1560—1595; $K_{22}$ = 1595—1620; $K_{23}$ = более 1620
Скорость затиски кг/с	$K_2$	7—19	$K_{21}$ = 7—9; $K_{22}$ = 9—11; $K_{23}$ = 11—13; $K_{24}$ = 13—15; $K_{25}$ = 15—17; $K_{26}$ = 17—19	$K_{21}$ = 7—11; $K_{22}$ = 11—15; $K_{23}$ = более 15
Прочность смеси на сжатие $\sigma \times 10^6$ , Па	$K_3$	0,68—0,98	$K_{31}$ = 0,68—0,73; $K_{32}$ = 0,73—0,78; $K_{33}$ = 0,78—0,83; $K_{34}$ = 0,83—0,88; $K_{35}$ = 0,88—0,93; $K_{36}$ = 0,93—0,98	$K_{31}$ = 0,7—0,8 $K_{32}$ = 0,8—0,9 $K_{33}$ = более 0,9
Содержание аз. ливной глины %	$K_4$	5,6—8,0	$K_{41}$ = 5,6—6,0; $K_{42}$ = 6,0—6,4; $K_{43}$ = 6,4—6,8; $K_{44}$ = 6,8—7,2; $K_{45}$ = 7,2—7,6; $K_{46}$ = 7,6—8,0	$K_{41}$ = 5,6—6,5 $K_{42}$ = более 6,5
Интервал времени между задвигной и выливной, мин	$K_5$	40—112	$K_{51}$ = 40—52; $K_{52}$ = 52—64; $K_{53}$ = 64—76; $K_{54}$ = 76—88; $K_{55}$ = 88—100; $K_{56}$ = 100—112	$K_{51}$ = 40—60; $K_{52}$ = 60—90 $K_{53}$ = более 90
Влажность смеси, %	$K_6$	2,2—4,0	$K_{61}$ = 2,2—2,5 $K_{62}$ = 2,5—2,8 $K_{63}$ = 2,8—3,1; $K_{64}$ = 3,1—3,4; $K_{65}$ = 3,4—3,7 $K_{66}$ = 3,7—4,0	$K_{61}$ = менее 3,5; $K_{62}$ = более 3,5
Содержание серы в металле $S \times 10^{-4}$ , %	$K_7$	0,32—0,56	$K_{71}$ = 0,32—0,36 $K_{72}$ = 0,36—0,4; $K_{73}$ = 0,4—0,44; $K_{74}$ = 0,44—0,48; $K_{75}$ = 0,48—0,52; $K_{76}$ = 0,52—0,56	$K_{71}$ = 0,24—0,40 $K_{72}$ = 0,4—0,5; $K_{73}$ = более 0,5
Содержание глины %	$K_8$	9—12	$K_{81}$ = 9,0—9,5; $K_{82}$ = 9,5—10; $K_{83}$ = 10—10,5; $K_{84}$ = 10,5—11; $K_{85}$ = 11—11,5; $K_{86}$ = 11,5—12	$K_{81}$ = 9; 10,5 $K_{82}$ = 10,5—11,5 $K_{83}$ = более 11,5

Признак	Обозначение признака	Интервалы значений признака	Группы признаков (диагностические интервалы)	
			Группировка по длине интервала качества	Группировка по длине категории признака
Твердость по Бринеллю в пласуформе	$k_3$	81—93	$k_{31} = 81-83;$	$k_{32} = 83-85$ $k_{33}$ более 85
			$k_{32} = 83-85;$	
			$k_{33} = 85-87;$	
			$k_{34} = 87-89;$	
			$k_{35} = 89-91;$	
			$k_{36} = 91-93$	
Температура выливания, °C	$k_{10}$	360—540	$k_{101} = 360-390;$	$k_{102} = 360-440$ $k_{103} = 440-460$ $k_{104}$ более 460
			$k_{102} = 390-420;$	
			$k_{103} = 420-450;$	
			$k_{104} = 450-480;$	
			$k_{105} = 480-510;$	
			$k_{106} = 510-540$	
Потери при прокатывании, %	$k_{11}$	3,96—6,32	Признак не учитывался	
			То же	
Газопроницаемость смеси	$k_{12}$	178—313	$k_{121} = 3,96-5,50$ $k_{122}$ более 5,50 $k_{123}$ менее 250; $k_{124}$ более 250	

ного вида таблицу, называемую диагностической матрицей. Она и является основой для определения  $P(D_j/K^*)$  для любого заданного комплекса признаков  $K^*$ .

Вероятности диагнозов

$$P(D_j) = N_j/N, \quad (7.13)$$

где  $N_j$  — число элементов в  $j$ -м диагнозе (категория качества);  $N$  — число элементов в анализируемой исходной совокупности. Вероятности для каждого диагноза

$$P(k_{im} | D_j) = n_{im}/N_j \quad (7.14)$$

Здесь  $n_{im}$  — число значений  $i$ -го признака, попавших в интервал с номером  $m$ ,  $N_j$  — число элементов признака в диагнозе  $j$ .

Диагностическая матрица для распознавания диагнозов по пригару при учете шести наиболее значимых признаков представлена в табл. 7.5. Значения  $P(k_{im}/D_j)$  по формуле (7.14) для каждого  $k_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ), расположенного по мере уменьшения коэффициентов корреляции при анализе связей параметр качества — признак, представлены в виде дробей с числителем  $n_{im}$  и знаменателем  $N_j$ ; причем  $N_j$  равно числу отливок, попавших в соответствующий диагноз  $D_j$ .

Имея диагностическую матрицу, можно проверить эффективность работы метода распознавания. Попробим это на примере. Известно, что при изготовлении отливки с площадью пригара по диагнозу  $D_4$  были зафиксированы значения технологических параметров температура заливки  $1600^\circ\text{C}$  ( $k_{11}$ ), скорость заливки

Таблица 7.5. Диагностическая матрица для распознавания диагнозов по пригару при шести признаках

$D_j (K_j)$	Номер отливок признака	3 признака $P(k_{im}/D_j)$ для					
		$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$
1	7	3	4	5	6	7	8
$D_1$ 0,0675	1	0	1/5	0	0	0	2/5
	2	0	0	1/5	0	1/5	1/5
	3	1/5	0	4/5	1/5	2/5	2/5
	4	3/5	2/5	0	2/5	2/5	0
	5	1/5	2/5	0	1/5	0	0
	6	0	0	0	1/5	0	0
$D_2$ 0,1081	1	0	0	0	0	0	0
	2	0	1/8	2/8	0	4/8	4/8
	3	5/8	4/8	3/8	1/8	2/8	2/8
	4	3/8	2/8	0	1/8	2/8	0
	5	0	0	1/8	2/8	0	2/8
	6	0	1/8	0	0	0	1/8
$D_3$ 0,1216	1	0	0	1/9	1/9	1/9	5/9
	2	0	3/9	2/9	1/9	5/9	2/9
	3	4/9	2/9	2/9	2/9	2/9	2/9
	4	3/9	1/9	1/9	2/9	1/9	0
	5	1/9	2/9	2/9	2/9	0	0
	6	1/9	1/9	1/9	1/9	0	0
$D_4$ 0,1081	1	0	0	1/8	0	0	4/8
	2	3/8	2/8	0	0	5/8	1/8
	3	3/8	2/8	4/8	2/8	3/8	1/8
	4	3/8	4/8	3/8	3/8	0	0
	5	2/8	0	0	1/8	0	1/8
	6	0	0	0	2/8	0	1/8
$D_5$ 0,3108	1	2/23	3/23	0	3/23	1/23	3/23
	2	2/23	3/23	1/23	4/23	11/23	4/23
	3	9/23	11/23	20/23	5/23	8/23	11/23
	4	5/23	2/23	0	8/23	3/23	4/23
	5	5/23	3/23	1/23	2/23	0	1/23
	6	0	0	1/23	1/23	0	1/23
$D_6$ 0,0946	1	0	0	1/7	0	0	2/7
	2	0	3/7	0	1/7	3/7	3/7
	3	3/7	3/7	6/7	2/7	4/7	1/7
	4	2/7	0	0	2/7	0	1/7
	5	2/7	1/7	0	2/7	0	0
	6	0	0	0	0	0	0

$P(D_j)$	Номер категории признака	Значение $P(b_i   D_j)$ для					
		$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$
1	2	3	4	5	6	7	8
$D_1$ 0,0676	1	0	0	0	0	0	1/5
	2	0	1/5	1/5	1/5	0	1/5
	3	1/5	3/5	4/5	1/5	2/5	0
	4	4/5	0	0	2/5	0	1/5
	5	0	1/5	0	1/5	1/5	2/5
	6	0	0	0	0	0	0
$D_2$ 0,0310	1	0	1/6	0	1/3	0	0
	2	0	1/6	1/6	0	5/6	1/6
	3	2/6	1/6	1/6	1/6	1/6	3/6
	4	2/6	2/6	0	4/6	0	0
	5	1/6	0	0	0	0	0
	6	1/6	1/6	1/6	0	0	0
$D_3$ 0,0405	1	0	0	1/3	1/3	1/3	2/3
	2	0	1	1/3	0	1/3	1/3
	3	1/3	0	1/3	0	0	0
	4	1/3	0	0	1/3	0	0
	5	1/3	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	1/3	1/3	0

9,9 кг с ( $b_{21}$ ) и влажность смеси 3% ( $b_{31}$ ). Можно ли подтвердить диагноз, используя диагностическую матрицу? Проведя вычисления для заданного комплекса параметров получим значения апостериорных вероятностей диагнозов от 1 до 9: 0; 0,1; 0,076; 0,096; 0,261; 0,283; 0,041; 0,057; 0,096. При анализе результатов констатируем следующее. Комплекс параметров был выбран из категории  $D_2$ , а наибольшая вероятность принадлежит диагнозу  $D_3$  и равна 0,283. Эту ошибку можно объяснить рядом причин. В первую очередь отметим, что любую категорию  $D_j$  формирует множество параметров, варьирующих в некоторой области. Отсюда следует, во-первых, что в условиях сильного разброса параметров в группах между собой наложения диагнозов, во-вторых, на образе конкретной категории признака действует много факторов, а нами рассмотрены только три. И все же ошибку в определении диагноза при проверке нельзя отнести к неэффективности метода распознавания. То что комплекс параметров был взят для третьего диагноза, а попали мы в шестой означает лишь то, что данный комплекс более характерен для шестой категории признака.

Следует отметить также, что полученное распределение апостериорной вероятности по диагнозам является «размытым» по  $D_2$ . По распределению трудно определить указать диагноз для дис-

темы. Ведь наибольшая апостериорная вероятность равна 0,28, т.е. с диагнозом  $D_3$  окажется менее 1/3 образцов. Распределение с наибольшей вероятностью для ожидаемого диагноза и наименьшей — для остальных получится при увеличении числа диагностических признаков. С точки зрения теории вероятностей этот факт объясняется тем, что комплекс, состоящий из трех значимых признаков, есть событие гораздо более вероятное для диагнозов  $D_j$ , чем событие, состоящее в принадлежности комплекса из шести признаков к этим диагнозам. Каждый такой комплекс будет уникален наряду с другими. Поэтому шестимерный комплекс параметров для диагноза  $D_j$  редко или вовсе не встретится в других диагнозах. И апостериорная вероятность диагноза  $D_j$  в этом случае будет максимальной, а вероятность других — минимальной либо равной нулю.

Покажем это на примере, введя в признаковое пространство еще три признака — прочность смеси на сжатие  $k_7$ , содержание активной глины  $k_8$  интервал времени между заливкой и выливкой  $k_9$ . Выбранный комплекс представлял собой следующий набор признаков:  $k_1 = 1600^\circ\text{C}$ ;  $k_2 = 9,9$  кг/с;  $k_3 = 3\%$ ;  $k_4 = 0,8 \cdot 10^3$  Па;  $k_5 = 5,8\%$ ;  $k_6 = 49$  мин. В принятых градациях диагностических интервалов выбранный комплекс  $k_{12}, k_{22}, k_{32}, k_{42}, k_{52}, k_{62}$ . Вычисления дали следующие результаты:  $P(D_2/K^*) = 0,76$ ;  $P(D_3/K^*) = 0,24$ ; вероятности остальных диагнозов равнялись нулю.

Таким образом с увеличением числа признаков вероятность правильного определения диагноза возрастает — отчетливо виден диагноз с наибольшей вероятностью.

Расчеты по приведенным диагностическим матрицам достаточно просты, однако решения, используемым байесовскую теорию можно представлять и в более наглядной форме — диагностическая таблица второго рода. В основе построения этих диагностических таблиц лежит решающее правило — правило, в соответствии с которым принимается решение о диагнозе. В методе Байеса объект с комплексом признаков  $K^*$  относится к диагнозу с наибольшей вероятностью  $K^* \in D_j$ , если  $P(D_j/K^*) > P(D_i/K^*)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $i \neq j$ ). Это правило обычно уточняется введением порогового значения для вероятности диагноза

$$P(D_j/K^*) \geq P_{nj} \quad (7.15)$$

где  $P_{nj}$  — заранее выбранный уровень распознавания для диагноза  $D_j$ . При условии  $P(D_j/K^*) < P_{nj}$  решение о диагнозе не принимается и требуется поступление дополнительной информации. Диагностические таблицы строили для распознавания состояния по двум категориям качества  $A_1$  (допустимый уровень дефектов) и  $A_2$  (недопустимый уровень дефектов). Категории  $A_1$  и  $A_2$  определяли экспертными оценками.

Для реализации решающего правила (7.15) и оценки диагностических порогов применялся последовательный анализ Вальда

Наличие сведений о любом из признаков изменяет соотношение вероятностей диагнозов. Неоднородная последовательная статистическая процедура распознавания состоит в последовательном учете признаков. Последовательное умножение отношений вероятностей признаков  $k_{ij}$  при категориях  $A_1$  и  $A_2$  прерывается по достижении одного из двух диагностических порогов, намечаемых исходя из заранее выбранного допустимого уровня диагностических ошибок. Информативность признаков рассчитывали с помощью меры Кульбака

$$J(k_{ij}) = - \sum_j J(k_{ij}) = - \sum_j 100 \lg \frac{P(k_{ij}/A_1)}{P(k_{ij}/A_2)} 0,5 [P(k_{ij}/A_1) - P(k_{ij}/A_2)] \quad (7.16)$$

Величина  $J(k_{ij})$  отражает абсолютное значение (модуль) вклада данного признака в приближении к правильному диагностическому порогу. Отношения условных вероятностей признаков при категориях качества заменяют логарифмом, вводя понятие диагностического коэффициента

$$DK = 100 \lg \frac{P(k_{ij}/A_1)}{P(k_{ij}/A_2)} \quad (7.17)$$

При  $DK = \pm \infty$  их заменяют значениями от 3 до 12 (знак остается неизменным). Правила замены приведены в пособиях по статистическому анализу.

Величины диагностических порогов вычисляются по следующим формулам

$$DK_{пор}(A_2) = 100 \lg \frac{\alpha}{1-\beta}, \quad DK_{пор}(A_1) = 100 \lg \frac{1-\alpha}{\beta} \quad (7.18)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — величины, характеризующие ошибки диагностики. Формула принята решения представляется в виде

$$DK_{пор}(A_2) < \sum_j DK(k_{ij}) < DK_{пор}(A_1) \quad (7.19)$$

На основании вышеприведенных положений были построены диагностические таблицы распознавания категорий качества по различным дефектам. Признаки технологического процесса расположены в таблице по убывающей информативности. Для использования диагностических таблиц необходимо учитывать значения ошибок диагностики  $\alpha = 0,25$  (ошибка, характеризующая положение, что категория  $A_1$  приближается за категорию  $A_2$ ) и  $\beta = 0,15$  (ошибка, характеризующая положение, что состояние  $A_2$  принимается за  $A_1$ ). При вычислениях по формулам (7.18) получаем  $DK_{пор}(A_2) = -53,148$  и  $DK_{пор}(A_1) = 69,897$ . Понесим использование пороговых значений на примере. Пусть имеется следующая информация о технологических факторах: прочность смеси на сжатие  $k_5 = 0,9 \cdot 10^3$  Па, температура заливки  $k_2 = 1570^\circ\text{C}$  скорость заливки  $k_3 = 13$  кг/с. Возможно ли по этим

Таблица 7.6 Распознавание категорий качества отливок по пригону

Признак	Диагностические пороги	Частоты $N(k_{ij})$		Частоты $P(k_{ij})$		Отношение вероятностей $\frac{P(k_{ij}/A_1)}{P(k_{ij}/A_2)}$	Информативность $J(k_{ij})$	Диагностическое отношение $DK$ по формуле (7.17)
		$A_1$	$A_2$	$A_1$	$A_2$			
Скорость заливки $k_3$ кг/с	$k_{31} = 7-11$	15	12	0,30	0,50	0,60	2,22	-22,18
	$k_{32} = 11-15$	26	8	0,52	0,33	1,58	1,88	-12,96
	$k_{33} > 15$	9	4	0,18	0,17	1,06	0,01	+2,53
Прочность смеси на сжатие $k_5 \cdot 10^3$ Па	$k_{51} = 0,7-0,8$	18	9	0,36	0,38	0,95	0,02	-2,23
	$k_{52} = 0,8+0,9$	25	14	0,50	0,58	0,86	0,26	-6,55
	$k_{53} > 0,9$	7	1	0,14	0,04	3,50	2,72	+54,41
Содержание активной фазы $k_6$ , %	$k_{61} = 5,8-6,5$	37	21	0,74	0,68	0,84	0,53	-7,57
	$k_{62} > 6,5$	13	3	0,26	0,12	2,17	2,36	+33,05
Температура заливки $k_2$ , °C	$k_{21} = 1560+1570$	7	2	0,14	0,08	1,75	0,73	+24,30
	$k_{22} = 1595-1620$	35	15	0,70	0,62	1,13	0,21	-5,31
	$k_{23} > 1620$	8	7	0,16	0,30	0,53	1,92	-27,57
Потери при прокатке или $k_{11}$ , %	$k_{111} = 3,96-5,5$	36	14	0,72	0,58	1,24	0,65	-1,94
	$k_{112} > 5,5$	14	10	0,28	0,42	0,67	1,22	-17,39
Интервал времени между заливкой и выемкой $k_4$ , мин	$k_{41} = 40+50$	20	13	0,4	0,54	0,74	0,92	-13,08
	$k_{42} = 60+90$	25	9	0,5	0,38	1,32	0,72	+12,06
	$k_{43} > 90$	5	2	0,1	0,08	1,25	0,10	+1,99
Твердость смеси в литебуре $k_8$ ед.	$k_{81} = 80+85$	4	1	0,08	0,04	2,00	0,60	-30,10
	$k_{82} > 85$	46	23	0,92	0,96	0,96	0,01	-1,77
Газопористость смеси $k_{12}$ , ед.	$k_{121} < 250$	39	17	0,78	0,71	1,10	0,14	-4,14
	$k_{122} > 250$	13	7	0,22	0,29	0,76	0,42	-11,92
Температура заливки $k_2$ , °C	$k_{21} = 360+440$	21	10	0,42	0,42	1,00	0,00	0,00
	$k_{22} = 440+490$	25	11	0,50	0,46	1,09	0,07	+3,74
	$k_{23} > 490$	4	3	0,08	0,12	0,67	0,35	-17,39
Влажность смеси $k_7$ , %	$k_{71} < 3,5$	48	23	0,96	0,96	1,00	0,00	0,00
	$k_{72} > 3,5$	2	1	0,04	0,04	1,00	0,00	0,00

данным определять категорию качества по пригону? Для данных диапазонов признаков диагностические коэффициенты составляют соответственно  $DK_{32} = +54,41$ ;  $DK_{31} = +24,30$ ;  $DK_{22} = 19,86$ . Сумма диагностических коэффициентов составляет  $\sum DK(k_i) = 98,57$ . При этом имеем  $\sum DK(k_i) > DK_{пор}(A_1)$ . Следова-

тельно, неравенство (7.19) нарушено и можно сделать вывод, что при данных параметрах технологического процесса и заданных ограничениях обеспечивается получение отливок с допустимым уровнем дефектов по пригону — категория  $A_1$ . Разработанные таблицы (табл. 7.6) являются основой для проведения любых расчетов по многомерной оценке качества отливок при заданных параметрах технологического процесса.

Высокая надежность таблицы может быть достигнута при машинных системах сбора исходных данных. При этом табличные системы распознавания становятся элементами АСУ способными информацию о факторах технологического процесса превратить в информацию о параметрах качества отливок.

## Глава 8 ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМОВКИ

### 8.1 МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ФОРМОВКИ

Морфологический анализ представляет собой метод систематизированного обзора всех возможных комбинаций развития отдельных элементов исследуемой системы. Он дает возможность построить строгие классификации объектов, явлений, свойств и параметров, позволяющих оценить возможные пути их развития. За основной признак классификации процессов принят метод построения морфологических карт, реализующий общую идею упорядоченного взгляда на вещи. При построении карт соблюден основной принцип морфологического анализа — выявление общности всех решений.

В табл. 8.1 и 8.2 представлены морфологические карты, отражающие варианты механического уплотнения и сочетания процессов механического уплотнения с воздействием тепловых, химических, магнитных и других полей. Морфологические карты позволяют формулировать и классифицировать проблемы, определить основной список альтернатив их решения. Карты не отражают исчерпывающего множества альтернатив. Например, известно, что существуют около 30 модификаций прессования и более 40 модификаций встряхивания с одновременным прессованием, в приведенных же картах они даны укрупненно. Для детального рассмотрения вариантов конструктивной реализации процессов целесообразно использовать структурный метод, предложенный

Таблица 8.1 Морфологическая карта процесса уплотнения

Вид динамического воздействия	Вид процесса	Прессование								
		использование методов холодной коандной	использование методов горячей коандной	газовой для флюидов	вакуумной	вакуумной с нагревом	газовая с подогревом	сжатием	ударными воздействиями	сверхзвуком
Свободная деформация или наливание										
Трамбовка или ударное воздействие										
Вибрация (объемная) и вращательная вибрация										
Пескоструйное и песко-струйное воздействие		1							2	
Высокочастотное встряхивание и вибрация виброудар										
Гравитационное воздействие										
Метание (метание)										
Искусственное воздействие сжатия воздухом							3			
Вакуум										
Взрывное воздействие										

Примечание. 1, 2, 3 — соответствующие области осуществимых или возможных и маловероятных альтернатив.

Таблица 82 Морфологическая карта процессов формовки

Вид воздействия	Основные методы и экономическое уплотнения					
	Свободная деформация, деформация в прессе, МЗ, прессование, вакуумное уплотнение	Прессование	Вакуумное уплотнение	Песчано-глиняное уплотнение	Комбинированное уплотнение	Песчано-глиняное уплотнение
Без теплового, химического и других подобных воздействий	1	1	1	1	1	1
Сушка	1	1	1	1	1	1
CO <sub>2</sub> процесс	2	1	1	1	2	1
Полимеризация	1	1	2	1	1	2
Упрочнение под действием валикатара как компонента смеси	1	2	1	1	2	2
Продукция катализаторов	1	2	2	1	2	2
Прокаливание и обжиг	1	1	2	2	2	2
Магнитное поле	1	2	2	2	2	2

Примечание: 1 — 2 — соответственно осуществление и неосуществление альтернатив

в работе [9] Площадь (морфологический интервал) карты процессов механического уплотнения разделена на три области, характеризующие осуществимые, неосуществимые и мало целесообразные варианты, а площадь карты микропроцессов — лишь на две области с констатацией наиболее часто встречающихся осуществленных вариантов. Число возможных укрупненных альтернатив процессов механического уплотнения достигает 500; из них реализовано не более 20%. Полное число альтернатив взаимодействия механического уплотнения с воздействием различных полей 3000—5000. Число реализованных вариантов составляет примерно 15% от этих значений, а морфологический интервал «разумного поиска» может быть оценен числом альтернатив порядка 200—300.

При анализе целесообразности отдельных альтернатив реализации (содержательной интерпретации соответствующих фор-

мальных прогнозов) можно констатировать, что, несмотря на относительно малую заполненность ячеек морфологической карты, применительно к макропроцессам уплотнения смеси в настоящее время этап истощения возможностей практически завершается. «Кис роса числа процессов приходится на период 1960—1970 гг., особенно это касалось различных вариантов прессования. Практика формовки показала, что большинство из них решало частные технологические задачи и не может рассматриваться в качестве базовых при автоматизации формовки. В связи с этим была сформулирована [51] тенденция сужения морфологического интервала для процессов механического уплотнения. Наиболее перспективно применение следующих процессов: прессования (особенно дифференциального), высококачественного встряхивания в различных комбинациях с прессованием и песчано-прессового (особенно при изготовлении безопочных форм), а также вакуумно-пленочного процесса и импульсного уплотнения.

С помощью морфологической карты в отличие от прогнозов по теории графов возможен анализ технического воплощения альтернатив. Целесообразность отдельных альтернатив определяется технологическими, конструктивными, экономическими и другими критериями, выявленными логическими построениями и экспертными оценками.

## 8.2 ТЕНДЕНЦИЯ РАЗВИТИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

### Смесеприготовительное оборудование

Основными тенденциями развития оборудования для приготовления обычных песчано-глинястых и песчано-бентонитных смесей являются:

- 1) разработка высокопроизводительных смесителей периодического и непрерывного действия с автоматическим регулированием свойств смеси в процессе перемешивания;
- 2) объединение смешивания и разрыхления в одном агрегате;
- 3) разработка высокопроизводительных установок непрерывного действия, в которых обработанные смеси проходят магнитную сепарацию, просеивание, предварительное увлажнение, охлаждение до комнатной температуры;
- 4) широкое применение систем пневмотранспорта;
- 5) совершенствование оборудования для регенерации.

Основным направлением совершенствования смесеприготовительного оборудования является создание автоматизированных комплексов смесеприготовления. В СССР создаются комплексы производительностью 25—400 м<sup>3</sup>/ч. В их состав входят бегуны производительностью до 300 м<sup>3</sup>, охлаждающие вибронормальные сита, азарторы и т. д. Приготовление формовочной смеси происходит автоматически; система управления электронная. Системы управления имеют программное управление и адаптивную связь сме-

ситателей с дозаторами. Для приготовления традиционных смесей основным агрегатом остаются бегуны периодического и непрерывного действия. Конструкции бегунов совершенствуются.

В типаже оборудования СССР (1981—1985 гг.) широко представлены бегуны смешивающие с вертикальными катками (производительностью 5—70 м<sup>3</sup>/ч при объеме замеса 0,25—3 м<sup>3</sup>) и бегуны смешивающие периодического действия центробежные с горизонтально вращающимися катками производительностью до 50 м<sup>3</sup>/ч. Для обеспечения большей производительности (до 240 м<sup>3</sup>/ч и более) представлены бегуны смешивающие непрерывного действия сдвоенные с вертикально вращающимися катками. Реализуется тенденция создания конструкций бескатковых смесителей со стационарной или вращающейся чашей. Смесители оснащаются комплектом медленно и быстровращающихся лопастей.

Приведем примеры некоторых прогрессивных конструкций. Фирма «Шуотц» предложила конструкции смесителей, где смешивание осуществляется с помощью катка, а также с помощью быстро вращающегося диска с пальцами. Производительность таких смесителей от 15 до 100 м<sup>3</sup>/ч. Фирмой «Эйрих» (Eirich, ФРГ) создан смеситель интенсивного действия с наклонными вращающимися дисками и рабочими органами, вращающимися в противоположном направлении. Максимальная нагрузка смесителя 400 кг, влажность смеси корректируется с точностью до 0,08 %. Производительность смесителей фирмы «Эйрих» составляет до 300 т/ч. В ФРГ создан смеситель для стержневых смесей, к обечайке которого прикреплен электромеханический вибратор. Внутри обечайки расположена гильза с лопастями. При вибрации обечайки компоненты смеси проходят по лопастям в гильзу, поднимаются по ней и высыпаются из гильзы сверху; в результате такого повторяющегося движения происходит перемешивание. Замес массой 20 кг готовится за 40 с. В СССР и за рубежом создан ряд оборудования для приготовления различных типов смесей. Некоторые данные о типаже оборудования СССР: 1) для приготовления жидких самотвердеющих смесей (ЖСС) предусмотрены установки периодического действия производительностью до 8 т/ч и установки непрерывного действия производительностью до 30 т/ч; 2) для приготовления пластических самотвердеющих смесей (ПСС) предусмотрена установка непрерывного действия производительностью 20 т/ч; 3) для приготовления холоднотвердеющих смесей (ХТС) предусмотрены смесители непрерывного действия стационарные с производительностью от 1 до 40 т/ч; 4) для приготовления плакированных смесей горячим способом предусмотрены установки периодического и непрерывного действия производительностью от 1 до 8 т/ч.

Основной тенденцией совершенствования смесителей для ХТС является оснащение их дополнительными средствами, позволяющими уменьшить расход связующих, повысить эффективность смешивания. Это — нагреватели и охладители для песка, термостаты для жидких составляющих и т. д. Непрерывно модернизи-

руются системы подачи и дозирования компонентов, например с помощью плунжерных насосов. Считается, что сейчас создано уже третье поколение данных смесителей. В первом поколении преобладали одношнековые смесители с малым числом оборотов шнека. Во втором поколении созданы смесители с двумя шнеками — для раздельного приготовления промежуточных смесей (песка со связующим и песка с катализатором), объединяемых затем в смесительной головке. Третье поколение составляют быстродвижные смесители для приготовления смесей с коротким временем схватывания (например, 30 с). Они делятся на шнековые (частота вращения шнека до 1200 об/мин, время смешивания 3—5 с, производительность 3—30 т/ч), тарельчатые (время смешивания 1—3 с, производительность до 30 т/ч), лопастные с вертикальным рабочим валом и т. д. Все фирмы создают серии базовых моделей. Например, фирма «Фордат» (Fondat, Англия) производит смеситель-пескосушилы производительностью 5, 10, 15, 25 т/ч для формовки с применением быстротвердеющих смесей. На их базе выпускаются шестипозиционные карусельные формовочные машины с вибрацией для предварительного уплотнения смеси.

Большое внимание уделяется модернизации оборудования для охлаждения и регенерации смесей. Для охлаждения песчаной глинистых смесей применяют в основном проходные барабаны непрерывного действия с автоматическим дозированием воды в смесь в соответствии с сигналами датчиков температуры смеси. Многие барабанные установки одновременно используют для выбивки форм (в литейных безопочной формовки). Фирмы Франции разрабатывают барабаны с лопастями на внутренней поверхности, внутри барабана располагается труба с перфорированными стенками, по которой проходит сжатый воздух. Лопастями отбрасывают смесь на трубу, а струи воздуха выходящие из отверстий трубы, отбрасывают смесь обратно к стенке барабана. Совершенствуются установки, в которых продувка смеси осуществляется на виброложке. Производительность установок испарительного охлаждения составляет до 300 т/ч. Широко также применяют установки, работающие по принципу кипящего слоя.

Для регенерации отработанных химически твердеющих смесей рекомендуются установки сухой механической регенерации производительностью до 40 т/ч. Большая часть этих установок снабжена вибробункерами, используются шаровые мельницы, или пеллеры, пневматические установки, работающие по принципу ударного колпака и др. Для регенерации смесей на синтетических смолах перспективны установки термической регенерации с температурой, превышающей 800°С. В установке фирмы «Фордат» отработанный смесь с органическими связующими приводится в песчано-жидкое состояние смесью горячего газа с воздухом, поступающей снизу через пористую плиту. Сгорание газа происходит непосредственно в кипящем слое, отработанный смесь нагревается примерно до 800°С.

## Формовочное оборудование

Основной тенденцией совершенствования формовочного оборудования является дальнейшая модернизация конструкций машин и линий на базе прогрессивных процессов формообразования. В связи с этим следует отметить создание высокопроизводительных линий из унифицированных узлов с электронной системой управления и автоматическими устройствами для смены модельной оснастки в цикле работы линии; создание автоматических линий для получения отливок в опочных и безопочных формах из химических твердеющих смесей; широкое применение автоматических линий для безопочной формовки. Значительный интерес представляют пескоструйно-прессовый и вакуумно-прессовый способы формовки вместо встряхивания с прессованием для снижения шума и повышения качества форм. Таким образом, интерес к прессово-встряхивающим машинам в последнее время несколько снизился. Многие линии оснащаются различными комплекующими устройствами: например, в состав линий фирмы Газат входят дозаторы, механизмы очистки модельно-опочной оснастки, плиты — основания модельных комплектов, многотупневые прессовые головки, механизмы для высверливания литейковых воронок, выжиг и выполнения вентиляционных каналов, средства продувки форм, накопители. Линии оснащаются электронными следящими системами автоматического управления со световыми мнемостемами, воспроизводящими состояние рабочего цикла в текущий момент. В СССР созданы линии широкой номенклатуры с размерами опок от 300 × 400 до 1500 × 1500 мм и выше. По заказам изготавливаются линии с индивидуальными технологическими решениями с опочами размерами до 4000 × 3000 мм.

Ниже приведены некоторые направления совершенствования оборудования для прогрессивных процессов формовки.

**Применение ХТС** В СССР организовано изготовление комплексно-механизированных формовочных линий с размерами опок от 1000 × 800 мм до 1600 × 1200 мм. Ценным представляется зарубежный опыт разработки линий безопочной формовки крупных форм (2000 × 1600 мм) из ХТС. Выбывка форм на этих линиях осуществляется дробетным способом, а операции очистки отливки и регенерации смеси совмещаются.

В США применяют процесс для изготовления безопочных форм из ХТС путем надува смеси сверху в рабочую полость, образующую верхнюю и нижнюю модельными плитами, и последующего ее прессования нижней модельной плитой. Получаемые таким образом безопочные формы тонкого сечения с двусторонним отпечатком рабочей поверхности собираются в горизонтальную столку (с вертикальным разъемом). Процесс позволяет сократить расход формовочной смеси на 90 %, потребляемую мощность оборудования — на 80 %, а себестоимость получаемых отливок — на 60 % по сравнению с одноменными показателями

для традиционного процесса безопочной формовки по скрытым формам.

**Пескоструйно-прессовые линии для изготовления сырых форм.** Из зарубежных фирм пескоструйные линии по-прежнему занимают «Дисаматик», «Универсал» (*Universal*, ФРГ) и др. Примерами линий фирмы «Диса» (*Disa*, Дания) могут служить модели 2012, 2032, 2070. Они имеют производительность соответственно 400, 300 и 275 форм в час. Размеры блоков соответственно составляют 480 × 600 × 120 + 230, 600 × 775 × 150 — 400, 700 × 950 × 200 — 660 мм. Линии снабжаются устройствами для автоматической простановки стержней. Линии поставляются комплектно. Например, в состав линии модели 2070 входит формовочная машина, блок замены модельных плит модели 2071, прецизионный конвейер для форм модели 2072, автоматический стержнеукладчик, блок подачи смеси в машину, охлаждающий конвейер. Фирма намерена разработать линию «Дисаматик 2150» с размерами форм в свету 950 × 1200 или 1067 × 1067 мм и толщиной от 200 до 760 мм. Производительность 230 форм/ч. По данным фирмы, вертикальный разъем форм сохраняется при создании всех линий. Фирма «Универсал» производит автоматы с горизонтальным разъемом типов *KFA-10* и *KFA-20* производительностью соответственно 120—160 и 90—120 форм в час. Размеры блоков соответственно составляют 356 × 483 × 130 — 170 и 508 × 610 × 205 — 192 мм.

Крусельные автоматы безопочной формовки с горизонтальным разъемом форм в настоящее время производит фирма «Георг Фишер» (*Georg Fischer*, Швейцария). В СССР создан ряд линий для горизонтально- и вертикально-стопочной формовки для отливок массой до 100 кг.

**Линии для изготовления сырых форм прессованием и встряхиванием с прессованием.** Существенные успехи в создании этих линий были достигнуты еще в начале 70-х годов. В настоящее время реализуются тенденции расширения их технологических возможностей. Успехи 70-х годов можно показать на примере фирмы «Кюнхель — Вагнер» (*Kunkel — Wagner*, ФРГ). Машины фирмы в большинстве случаев используют различные варианты сочетания высокочастотного встряхивания и прессования. Применение гидравлического привода в сочетании с электронными схемами управления фирма считает основным направлением конструирования формовочных агрегатов.

Трехпозиционные машины фирмы имеют прессовые головки дифференциального типа, обеспечивающие давление до 1,8 МПа при зазоре между пуансонами 6 мм. Машины обеспечивают автоматическую смену моделей, благодаря чему достигается высокая производительность. Фирма производит трех- и пятипозиционные машины с размерами опок от 400 × 700 до 1400 × 1800 мм. Производительность линий на базе таких машин достигает 330 форм в час.

Создана уникальная установка для изготовления форм методом дифференциального прессования в опоках размерами  $2900 \times 1700 \times 500$  мм. Производительность линии на базе этой установки составляет 25 форм в час. Площадь прессования разделена на 128 прессующих пуансонов с ходом около 300 мм. Машинки могут работать с циркулирующей моделью до 8—10 наименований, номенклатура отливок деталей для железнодорожных вагонов — корпуса автосцепки, рамы тележек и т. В направлении подобного рода линий — одно из основных направлений автоматизации изготовления крупного литья.

В начале 60-х годов средняя рабочая поверхность формы составляла 0,4—0,6 м<sup>2</sup> при часовой производительности 120—140 форм, к середине 70-х годов она выросла до 1,2—1,5 м<sup>2</sup> и 200—250 форм. Производительность по формуемой площади 300 м<sup>2</sup> в час в настоящее время является своеобразным ориентиром при создании линий.

Создаются линии для изготовления форм площадью до 4 м<sup>2</sup> и более. Примером современного решения может служить изготовленная в США линия для размеров опок  $2500 \times 1600 \times 600/600$  мм. Применяется дифференциальное прессование с давлением до 1,0—1,5 МПа с одновременным встряхиванием с частотой до 8 с<sup>-1</sup>. Современные прессово-встряхивающие автоматы и линии выпускаются фирмами «Кюнкель — Вагнер» и «Циммерман» (ФРГ), СПО (США) и др. В сырых песчаных формах в ближайшее время будут производиться чугунные отливки массой до 500 кг и стальные — до 2 т. В СССР успешно создаются линии на базе многопозиционных машин (трех-, четырех-, пяти и шестипозиционные челночные автоматы и т. д.).

Некоторые зарубежные фирмы стремятся в ряде случаев заменить прессово-встряхивающие машины. Так, фирма «Циммерман» создала пескоструйно-прессовые автоматы (FS) для замены встряхивающих машин (до  $1400 \times 1250 \times 400$  мм). Интересен опыт конструирования вакуумно-прессовых автоматов фирмой «Кюнкель — Вагнер». Заполнение опоки и последующее уплотнение смеси многорукавной прессовой колесной производит под вакуумом до 0,05 МПа, что по сравнению со встряхиванием резко снижает уровень шума и повышает возможность получения сложных отливок с толщинами (до 4 мм ребрами) и большой длины (до 200 мм).

**Вакуумно-пленочная формовка.** В качестве преимуществ процесса отмечается снижение расхода формовочных материалов по меру на 40 % в качестве недостатков — помехозащитное выделение пыли при транспортировании песка и заполнении опок, увеличение времени остывания отливок, потребность в синтетической пленке и ее утилизация.

По данным японских фирм стоимость небольших форм площадью примерно 0,28 м<sup>2</sup> для V-процесса примерно в 3 раза выше, чем обычных. С увеличением форм до 0,93 м<sup>2</sup> эта разница умень-

шается до 20 %. Оптимальными считаются размеры опок  $1200 \times 1000$  мм и выше. На базе V-процесса освоено производство линий для опок различных размеров.

**Формовка взрывом.** Фирма «Георг Фингер» разработала формовочную машину, в которой смесь уплотняется под действием ударной волны, образующейся при взрыве природного газа. Газовая камера расширяется непосредственно над наполнительной рамкой опоки. В составе газовой смеси могут быть использованы природный газ, пропан — бутан, метан и др. Давление на смесь, кратковременно формирующаяся после воспламенения газовой смеси, достигает 0,45 МПа. Продукты сгорания отсасываются из реакционной камеры и термически обработаны полости над опокой, не попадая в атмосферу цеха. Разработана линия размерами опок  $1420 \times 915 \times 360$  (500) мм металлоемкость формы до 400 кг (масса отливки 0,5—150 кг) производительность до 140 циклов в час.

### Стержневое оборудование

Основной тенденцией совершенствования оборудования для изготовления стержней является дальнейшая автоматизация с учетом основных направлений химизации процессов. Значительно модернизируются конструкции пескоструйных машин для изготовления стержней на основе Hot Box и Cold Box процессов с продувкой и без продувки отверждающими газами. Одной из тенденций является применение карусельных машин, наблюдается стремление к увеличению размеров изготовляемых стержней (примерно до 1600 мм) и производительности.

При изготовлении мелких стержней мелуцим методом уплотнения смеси остается несодружный. Для производства стержней массой до 160 кг отверждаемых в нагреваемой опоке, создан ряд однопозиционных машин. При времени отверждения стержня 15—60 с производительность машины составляет 30—120 стержней в час. Яетки имеют газовый или электрический обогрев. На базе этих машин созданы автоматические линии.

Имеются тенденции создания машин (например, фирма «Гизага») для изготовления стержней по «теллону» процессу, предусматривающему нагрев ящиков до 100—200 против 240—300° С в классическом варианте получения стержней по горячей опоке.

Технологический процесс изготовления стержней в массовом производстве из ХТС развивается по двум направлениям: применение маложивучих смесей с длительным циклом твердения (3—15 мин) и применение смесей с коротким циклом твердения (10—60 с) за счет продувки газообразным катализатором. Для реализации первого направления созданы комплекс оборудования для изготовления стержней массой от 3 до 100 кг и ряд автоматических линий для изготовления стержней из ХТС массой до 600 кг. Совершенствование этой технологии подтверждает тенденцию раз-

лития все более эффективных методов твердения смеси без нагрева. Советский и зарубежный опыт показывает эффективность создания машин для осуществления различных процессов холодного и горячего отверждения смесей непосредственно в оснастке. Все машины могут поставляться с защитным кожухом, полностью изолирующим рабочего от движущихся частей машины и от выделений образующихся при отверждении стержня; многие машины оборудованы системой нейтрализации отходящих газов.

Для стержней массой свыше 500—600 кг лучшей пока остается технология ЖСС. Необходимо существенно улучшить смеси и направления облегчения выбавки, качества поверхности стержней.

В различных производствах по-прежнему применяют машины и линии для изготовления стержней из жидкостеклянных смесей с продувкой  $\text{CO}_2$ . Актуальной остается разработка смесей с пониженным содержанием жидкого стекла и с улучшенной выбиваемостью.

Для уплотнения ХТС выпускаются вибростолы различной грузоподъемности. Для изготовления смесей в СССР разрабатываются смеси с горизонтальной камерой перемешивания пронаводительностью от 1 до 40 т/ч. Для комплектация смесителей непрерывного действия создается ряд стабилизаторов температуры песка предусматривающих его подогрев и непрерывную выдачу с заданной температурой, например  $\pm 27^\circ\text{C}$ .

В последнее десятилетие ведется поиск новых и модернизированных процессов изготовления стержней. Примером может служить EPFSET-процесс для изготовления стержней замораживания. Стержневая смесь на песчаной основе содержит 2—6 % влаги и 1,5—2,5 % глинистого связующего. Замораживание производится опрыскиванием стержня жидким азотом при температуре  $-196^\circ\text{C}$ . Продолжительность хранения стержней на воздухе до 1 ч. Совершенствуется Синкор-процесс изготовления стержней в холодной оснастке. Отверждение стержней достигается продувкой сжатым воздухом нормальной температуры в течение 10—180 с. Смесь состоит из кварцевого песка и жидкого синтетического связующего в количестве 3—5 %. Стержни изготавливаются пескоструйным способом. Синкор процесс обеспечивает хорошую выбиваемость стержней из отливок.

### 83 РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ СОСТАВОВ СМЕСЕЙ

Ниже приведены основные достижения теории и практики формовки при разработке рациональных составов смесей для различных процессов формовки.

- 1 Разработка классификации смесей и их свойств [13, 22]
- 2 Определение требуемого уровня свойств смесей для различных процессов формовки (например для автоматических линий прессовой формовки [48]) и построение логических диаграмм связи свойства смеси — дефекты отливок. Особое значение

приобретает определение комплексных свойств типа «уплотненность», «формуемость» и т. д.

3 Разработка формовочных и стержневых смесей различной природы с заданными свойствами [17, 33, 35] и внедрение их в промышленность.

4 Постановка и частичная реализация проблемы подбора и приготовления формовочных смесей с помощью ЭВМ [65]. Главным здесь представляется необходимость разработки математических моделей связывающих состав смесей непосредственно с критериями, характеризующими качество отливок.

5 Разработка методов описания смесей как индетерминированных (вероятностных) систем с постановкой задачи создания систем управления смесеприготовлением [77, 88]. Особое значение придается математическому моделированию качества формовочных смесей, используемых в замкнутой системе.

Для решения перечисленных проблем широко применяют методы прикладной автоматизации и в частности методы планирования экспериментов. Сейчас использование этих методов непрерывно расширяется. Покажем их эффективность для комплексного решения проблемы прогнозирования и разработки составов ХТС для пескоструйного процесса [69, 70].

В настоящее время насчитывается более сотни составов ХТС и технологических вариантов их использования. Такое число разработок затрудняет выбор составов смесей для конкретных условий производства отливок. Рассматривали смеси содержащие в качестве связующих фенолформальдегидные, фенолформальдегидофурановые, карбамидно-формальдегидные, карбамидно-фурановые смолы. В результате проведенного отбора для построения математических регрессионных моделей был составлен комплекс свойств включающих живучесть  $y_1$ , время отверждения смеси до манипуляторной прочности  $y_2$ , газостеркость  $y_3$ , прочность на сжатие через 0,5 и 24 ч соответственно  $y_4$  и  $y_5$ , прочность на разрыв через 24 ч  $y_6$ . Для исходного массива (23 состава) исследованные («пропущенные») данные определяли при реализации на ЭВМ программы основанной на использовании метода Бака.

Для выявления внутренних связей между свойствами  $y_1$ — $y_6$  комплексом проведен корреляционный анализ. Установлено, что все свойства статистически связаны между собой (хотя и непрямыми связями). Выделены группы наиболее сильно коррелированных между собой свойств вследствие чего размерное пространство технологических свойств сокращено от 6 до 3. В первую группу входят  $y_4$  — 0,47 —  $y_1$  — 0,50 —  $y_2$  с коэффициентами корреляции 0,47 и 0,50 во вторую —  $y_3$  — 0,42 —  $y_6$  с коэффициентом корреляции 0,42 и третью группу входят  $y_5$ .

Построение «наилучших» уравнений для  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$  осуществлялось при реализации на ЭВМ программы использующей метод Эфрамсона. Под «наилучшей» понимается модель объясняющая возможно большую долю вариации переменной и содержащая

возможно меньше факторов. Метод заключается в том, что на каждом шаге в регрессионное уравнение либо добавляют одну переменную которая дает максимально значимое уменьшение вариации зависимой переменной, либо отбрасывается одна такая переменная которая дает минимально значимое увеличение вариации зависимой переменной. Эти операции повторяются до тех пор пока добавление (исключение) переменных не дает значимого изменения вариации зависимой переменной. В качестве независимых переменных в регрессионных математических моделях приняты: тип связующего  $x_1$ ; количество связующего (%)  $x_2$  тип катализатора  $x_3$ , количество катализатора (%) —  $x_4$ , количество упрочняющей добавки, введенной в смесь (%)  $x_5$ . Причинность каждой смеси для определенного типа производства и технологического процесса обуславливается временем отверждения смеси в стержневом ящике.

Важной технологической характеристикой является время отверждения до манипуляторной прочности  $y_2$ . Математическая модель для  $y_2$  получена в следующем виде

$$y_2 = 23,5 + 8,6x_2 + 19,5x_3 - 2,47x_4x_2. \quad (8.1)$$

Ошибка прогнозирования по данной модели составляет около 6%. Математические модели для других свойств (жизучность  $y_1$ , газопроводность  $y_3$ ) менее пригодны для прогноза ошибка составляет более 30%. Однако остальные технологические свойства ХТС могут быть рассчитаны при использовании корреляционных зависимостей.

По уравнению (8.1) получены значения  $y_2$  для тех смесей которые не имели данной характеристики. Проведенный анализ исходного массива (110 составов) позволил установить что основная масса рекомендуемых в литературе составов ХТС пригодна для единичного и крупносерийного производства. И только несколько составов ХТС могут быть применены для производства стержней отливок массового производства. Для сокращения времени отверждения стержней из ХТС необходимо использовать специально разработанные для каждой смолы катализаторы.

Математические модели прогнозирования позволяют сократить время и затраты на проведение экспериментов при разработке ХТС, а также классифицировать ХТС по уровню свойств. Полученные математические модели используются при разработке смесей с максимальной текучестью для пескоструйного процесса.

При разработке составов смесей был принят следующий рациональный уровень свойств: влажность 0,5—2% газопроводность более 100 ед. живучесть до 5—8 мин, прочность на сжатие в сухом состоянии 0,003—0,006 МПа текучесть по пробе ЗИЛ не менее 20%. В качестве переменных при построении математических моделей приняты  $x_1$  — количество вводимой в смесь смолы, % к массе смеси;  $x_2$  — количество катализаторов, % к массе смеси;  $x_3$  — время прошедшее после приготовления смеси, мин;  $x_4$  —

марка смолы,  $x_5$  — количество вводимого фурфурового спирта % к массе смеси;  $x_6$  — зернистость песка. Были использованы представители трех классов смол наиболее пригодных для стального и чугунного литья: фенолформальдегидная ОФ 1, фенолформальдегидно-фурановая ФФ-1Ф, карбамидоформальдегидная УКС-Л смешанная с фурфуровым спиртом в соотношении 1:0,7. Количество смолы варьировалось на трех уровнях: 1; 5; 2; 5; 3 от массы песка соответственно количество катализатора — 0,5; 1,2; 1,5 % от массы смеси. Для смол ОФ 1 и ФФ-1Ф катализатором принят 70%-ный водный раствор бензолсульфокислоты, для УКС-Л (Ф) — 50%-ный водный раствор ортофосфорной кислоты. В качестве огнеупорного наполнителя выбраны пески марок ИК0315 ИК02, ИК016. Фурфуровый спирт вводили в количестве 0; 0,6; 0,8%. Выходные параметры:  $y_1$  — текучесть по пробе ЗИЛ, %,  $y_2$  — живучесть смеси, мин;  $y_3$  — осыпаемость, %;  $y_4$  и  $y_5$  — прочность на сжатие после 0,5 и 4 ч отверждения на воздухе. Кроме того, измеряли влажность, газопроводность, прочность на сжатие после 0,1 и 24 ч.

Для решения поставленной задачи использован регулярный факторный план. Реализация процедуры установления корреляции между параметрами позволила сократить их число до трех —  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$ . Для построения математических моделей использован шаговой регрессионный метод. Модели для расчета  $y_1$ ,  $y_2$  и  $y_3$  для каждой из смол:

1 При  $x_4 = 0$  (смола УКС-Л (Ф))

$$y_1 = 53,08 - 19,10x_2 + 7,83x_3x_2,$$

$$y_2 = 2,72 - 1,01x_1, \quad y_3 = 13,28 + 7,94x_2x_3$$

2 При  $x_4 = 1$  (смола ОФ-1)

$$y_1 = 40,21 - 14,37x_2 - 3,62x_3 + 0,10x_4 - 0,38x_2x_3 +$$

$$+ 0,57x_2x_3 + 2,72x_2x_4 + 2,09x_3x_4,$$

$$y_2 = 9,54 + 4,98x_2 - 1,98x_3x_2. \quad (8.2)$$

3 При  $x_4 = 2$  (смола ФФ-1Ф)

$$y_1 = 4,20 + 0,13x_1 - 0,93x_2 + 1,23x_3 - 2,80x_2x_3 +$$

$$+ 4,97x_1x_3 - 1,08x_2x_3 - 1,73x_2x_4,$$

$$y_2 = 9,68 - 4,55x_2 - 1,07x_1x_3, \quad y_3 = 8,15 + 2,57x_2x_3$$

Матрица планирования экспериментов содержала три уровня факторов: нижний (0), средний (1) и верхний (2). Этим уровням соответствовали следующие значения:  $x_1$  — 1,5; 2,5; 3,0;  $x_2$  — 0,5; 1,2; 1,5;  $x_3$  — 0; 5; 10;  $x_4$  — 0,6; 0,8; 0;  $x_5$  — 0315; 020; 016

На следующей стадии исследований введен комплексный показатель качества смесей — обобщенная функция желательности

$$D = 1 / \overline{d_{21} d_{22} d_{23} d_{24}} \quad (8.3)$$

где  $d_{ij}$  — желательность отдельных выходных параметров. Величину  $d$  рассчитывали по следующей зависимости

$$d = \exp \{ 1 - \exp(-y') \} \quad (8.4)$$

где  $y$  — безразмерное значение  $y$

Величины  $D$  и  $d_{ij}$  могут меняться от 0 до 1. Разработана шкала желательности  $D$  или  $d = 1$  — максимально возможный уровень качества;  $1-0,8$  — допустимый и превосходный уровень;  $0,8-0,63$  — допустимый и хороший уровень;  $0,63-0,37$  — допустимый и достаточный уровень;  $0,37$  — технический уровень качества;  $0$  — исследуемый материал или технологический процесс обладает максимально нежелательными параметрами.

Были построены три уравнения (для каждой смолы) связывающие  $D$  с факторами  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$

$$\left. \begin{aligned} x_1 = 0 \quad D &= -0,09 + 0,26x_2 + 0,22x_1x_2 - \\ & \quad 0,37x_1x_3 + 0,19x_1x_4 \\ x_2 = 1 \quad D &= 0,76 - 0,21x_3 - 0,16x_1x_2 + \\ & \quad + 0,05x_1x_4 - 0,16x_1x_5 \\ x_3 = 2 \quad D &= 0,26 - 0,10x_2 + 0,11x_1x_4 \end{aligned} \right\} \quad (8.5)$$

Оптимизация состава для смолы ФФ 1Ф ( $x_1 = 2$ ) проведена по  $y_1$  с ограничениями по  $y_6$  и  $y_5$  на допустимых уровнях, оптимизация смесей с остальными смолами — по уравнениям (8.5). Составы смесей, обеспечивающие высокое качество стержней при их изготовлении на опытной установке смонтированной на базе лесокартельной машины модели 348, приведены в табл. 3 Б

#### 8.4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫБОРА И ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ФОРМОВКИ

Этапы оценки и выбора процессов формовки и уплотнения [6, 51, 67].

1 Составление исходного списка процессов формовки для определяемого класса отливок

2 Выбор и оценка наиболее перспективных процессов формовки по комплексу критериев

3 Выбор рациональных режимов перспективных процессов

4 Оценка технологических возможностей процессов по критерию качества форм и отливок

5 Технико-технологические оценки процессов формовки

Этапы 1-2 наиболее характерны для стадии технологической подготовки производства, этапы 3 и 4 — для стадий функцио-

рования формовочных комплексов, оптимизации режимов их работы и определения перспективности развития

Перечисленные этапы реализованы для рассмотренных ранее двух классов отливок массового производства — станины электродвигателя и эконогусиничное. При включении в исходный список процессов уплотнения смеси прежде всего производится их оценка с точки зрения возможности достижения технологически необходимой степени уплотнения (см. гл. 3). Исходный список процессов формовки для обоих классов отливок учитывал направления развития прогрессивных методов формовки и специфика соответствующих отраслей — фактическую и перспективную оснащаемость оборудования, требования предъявляемые к отливкам, и т. д. Номенклатура рассмотренных процессов представлена в табл. 8.3.

Для оценки процессов формовки применяли метод экспертных оценок. Исходный список и последующие экспертные оценки результируют решение проблемы в виде построения и срубания нетвей дерева поиска. Основные показатели метода экспертных оценок определяли по следующим зависимостям

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^n Q_{ij} \beta_{ik} / k \quad (8.6a)$$

Таблица 8.3 Номенклатура процессов формовки

Процесс формовки	Оценки	
	степень электродвигателя	экономичность
Встряхивание	+	+
Прессование	+	+
Встряхивание:		
с допрессовкой	+	—
> одновременим. прессованием	+	—
Последов.-прессовани	+	+
Вибропрессование	+	+
Дифференциальное прессование	+	+
Встряхивание с иерархич. верхним прессовани	+	+
и с	+	+
Импульсное уплотнение	+	+
Формовка в стержнях	+	+
Объемные формы	+	+
Объемный кокиль	+	+
Литье по газифицирующей модели	+	+
Металлические формы (кокиль)	+	+
Центробежное литье	+	+
Песчаное уплотнение	+	+
Металлостатные формы	+	+

Примечание: Знак «+» — способ рассматривался; знак «—» — способ не рассматривался.

среднее статистическое значение относительных оценок

$$M_j = \sum_{i=1}^{m_j} C_{ij} / m_j \quad (8.66)$$

сумма ранговых оценок

$$S = \sum_{i=1}^{m_j} R_{ij} \quad (8.66)$$

среднее статистическое сумм ранговых оценок

$$M\{S_j\} = \sum_{i=1}^l S_{ij} / n \quad (8.67)$$

отклонение сумм ранговых оценок

$$d_j = S_j - M\{S_j\} \quad (8.68)$$

показатель связанных (ранговых) оценок

$$T_j = \sum_{i=1}^l (d_i^2 - l_i) \quad (8.69)$$

дисперсия и среднее квадратическое отклонение оценок

$$D_j = \sum_{i=1}^{m_j} (C_{ij} - M_j)^2 / m_j, \quad \sigma_j = \sqrt{D_j} \quad (8.64)$$

коэффициент вариации

$$V_j = \sigma_j / M_j \quad (8.65)$$

коэффициент конкордации

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^l d_i^2}{m^2 (m^2 - 1) - m \sum_{i=1}^l T_j} \quad (8.66)$$

где 1, 2, 3, ..., l — число экспертов 1, 2, 3, ..., j  
 n — число процессов 1, 2, 3, ..., k — число показателей  
 m<sub>j</sub> — число экспертов, оценивших j-й процесс формовки; Q — оценка i-м экспертом j-го процесса по l-му показателю β — значимость показателя; C<sub>ij</sub> — относительная оценка i-го эксперта j-го процесса формовки, балл R<sub>ij</sub> — ранговая оценка, данная i-м экспертом j-му процессу формовки L — число групп связанных рангов; l<sub>i</sub> — число связанных рангов в i-й группе.

В качестве экспертов привлекали специалистов СССР, ГДР, ЧССР.

Для оценки процессов формовки отливок «станция электродвигателя» были выбраны шесть показателей, а отливок «звено

Таблица 84 Значимость показателей процессов формовки

Показатель	Отливы			
	станция электродвигателя		звено гусеничное	
	Приведенные оценки	Коэффициент корреляции	Приведенные оценки	Коэффициент корреляции
Возможность автоматизации и комплексной механизации процессов	0,2	0,15	0,1	0,12
Наличие серийно выпускаемого оборудования	0,15	0,34	0,1	0,4
Возможность получения отливок со сложнейшими техническими требованиями	0,21	0,12	0,2	0,06
Коэффициент использования металла	—	—	0,2	0,15
Длительность периода организации производства	0,1	0,42	—	—
Себестоимость отливок	—	—	0,1	0,17
Товарный вид отливок	0,16	0,23	—	—
Условия труда	0,18	0,17	—	—

гусеничное — пять. Оценки значимости показателей представлены

в табл. 84 (сумма приведенных оценок  $\sum_{i=1}^m C_{ij} = 1$ )

Выбор показателей обусловлен спецификой соответствующих отраслей. Оценка показателей для отливок «станция электродвигателя» 11-ю экспертами проводилась в интервале 1—10 баллов, а отливок «звено гусеничное» 9-ю экспертами — 0—200 (нижний предел соответствовал минимальной, а верхний предел — максимальной возможной оценке).

При использовании показателей непосредственно для оценки процессов формовки приняты интервалы 0—100 баллов (станция электродвигателя) и 0—200 (звено гусеничное).

Сочетание табл. 83 и 84 в зависимости (8.6а—в) представляет собой морфологическую карту 2-го рода — матрицу характеристик. Сочетание морфологического анализа и экспертных оценок является одной из ступеней решения задач эвристического поиска оптимальных вариантов при проектировании технологических процессов. Это открывает возможности использования метода «предикторов», «звездочка», «предсказываю», основанного на использовании законов теории множеств и математической логики. Дальнейший путь развития теории в части выбора оптимальных процессов формовки состоит в рациональности сочетаний эвристических и формальных методов.

Полученные в результате опроса экспертов данные представляли собой совокупность оценок относительной важности каждого из оцениваемых процессов формовки. Опенку проводили в два этапа. Распределение процессов формовки отливок станции по

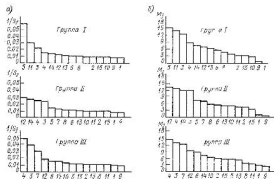


Рис. 8.1 Оценка процессов формовки для I, II и III групп отливок станин электродвигателей по ранжам (а) и баллам (б) оценкам

ранговым и балльным оценкам первого этапа показано на рис. 8.1. Практика коллективной оценки показала что часто первичные мнения экспертов существенно расходятся. Это вызвало необходимость математической оценки степени согласованности, выявления причин несогласованности с последующим согласованием мнений. Степень согласованности мнений экспертов о продолжительности того или иного процесса оценивали на втором этапе по коэффициентам вариации и конкордации. Чем меньше значение коэффициента вариации тем выше степень согласованности мнений. Изменение коэффициента конкордации от 0 до 1 также соответствует увеличению степени согласованности оценок. Значимость коэффициентов конкордации определяли по критерию Пирсона.

В табл. 8.6 представлены результаты окончательного опроса экспертов по выбору рациональных процессов формовки для различных типоразмеров отливок станин электродвигателей. В таблице представлены значения коэффициентов конкордации для двух этапов оценок.

Алгоритмически оценивали процессы формовки для отливок с учетом гоущинное. Выявлена наибольшая перспективность следующих процессов: пескодувно-прессовый, дифференциальное прессование, истрихивание с одновременным и последующим прессованием, прессование контурной плитой, прессование плоской плитой.

Таким образом результатом первых двух этапов исследований является построение исходного списка процессов формовки и его

Таблица 8.6. Рациональные процессы формовки отливок «станина электродвигателя»

Параметр	Группы отливок		
	I	II	III
Высота вращения электродвигателя, мм	71—100	112—132	160—250
Процесс формовки	Встрихивание с депрессовкой		
	Оболочечные формы	Облицовочный кондуктор	Встрихивание с одновременным прессованием
Коэффициент конкордации	Встрихивание с дифференциальным прессованием		
	1-й этап	0,56	0,52
2-й этап	0,62	0,60	0,66

сокращения на основе комплексных оценок по системе показателей. Исследования по третьему и четвертому этапам подробно описаны в гл. 3 и 7. Их результатами явились определение рациональных режимов выбранных процессов и их объективное сопоставление по критериям качества форм и отливок. В итоге число рациональных процессов формовки для каждой из групп отливок снова уменьшается. Так для всех трех групп отливок «станина электродвигателя» по критериям качества форм и отливок не выдерживает конкуренции с другими процессами встрихивание с депрессовкой.

На пятом этапе определяются экономически целесообразные границы применения различных процессов формовки в зависимости от типоразмера и объема производства отливок «станина электродвигателя» [6, 67]. Даны технико-экономический анализ и сопоставление приведенных затрат на 1 т отливок с высотами оси вращения 71—250 мм для всех способов формовки. Оптимальный процесс формовки определялся при расчете технологической себестоимости капиталовложений и суммы приведенных затрат.

Технологическая себестоимость рассчитывалась как сумма расходов зависящая от способа формовки. Оптимальность

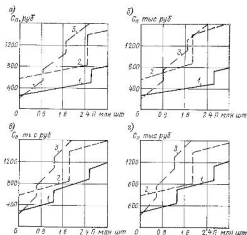


Рис. 8.2 Зависимость суммы приведенных затрат  $C_n$  от годового выпуска II отливок I группы станков электродвигателей при различных процессах формовки с различными высотами вращения (мм): а — 71; б — 80; в — 90; г — 100  
1 — пескоструйно-прессовый; 2 — встряхивание с однозарядной прессовкой; 3 — литье в оболочечной форме

способа формовки определялась минимумом критерия приведенных затрат

$$C_n = a\Pi + b + E_n K = \text{шт.}, \quad (8.7)$$

где  $a$  — переменные расходы, руб.;  $b$  — постоянные расходы, руб;  $\Pi$  — программа выпуска, шт.;  $K$  — капиталовложения, руб;  $E_n$  — коэффициент сравнительной экономической эффективности

Для всех групп отливок построены диаграммы, позволяющие выбрать оптимальный способ формовки по критерию минимума приведенных затрат в зависимости от годового выпуска отливок. Диаграмма для групп отливок «станки электродвигателя» с высотой вращения 71, 80, 90, 100 мм представлена на рис. 8.2. Очевидна оптимальность пескоструйно-прессового процесса. Вертикальные участки ломаных линий обозначают необходимость установки следующего формовочного комплекса. Точка пересечения прямых, характеризующих приведенные затраты при различных процессах формообразования, соответствует критической программе выпуска, при которой оба процесса формовки выгодны.

Влияние объемов производства на эффективность работы автоматических линий можно проследить на примере введения автоматической линии изготовления отливок для станки электродвигателей в безопочных формах, уплотняемых пескоструйно-прессовым методом (вариант II) на одном из заводов Минэлектротехпрома. До введения линии формы изготавливались на встряхивающих формовочных машинах с допрессовкой и дальнейшей заливкой на конвейере (вариант I).



Рис. 8.3 Зависимость приведенных затрат  $C_n$  от годового объема производства II во вариантах I и II

Изменение основных технико-экономических показателей изготовления отливок в зависимости от объема производства показано в табл. 8.6 [92].

Снижение себестоимости изготовления отливок при увеличении объема производства происходит вследствие уменьшения расходов на заработную плату, амортизацию и содержание оборудования, потерь от брака, расходов на технологическую осадку путем ликвидации оков, стоимость которых составляет 15—20 % от стоимости формовочного оборудования, и т. д.

Для определения области экономической эффективности введения автоматической линии безопочной формовки по результатам табл. 8.6 построена зависимость приведенных затрат от годового объема производства (рис. 8.3). Проекция на ось абсцисс точки пересечения кривых показывает размер годовой критической программы для вариантов I и II. Начиная с объема производства отливок 2400 т, внедрение автоматической линии безопочной формовки становится эффективным несмотря на ее высокую

Таблица 8.6 Техничко-экономические показатели

Показатель	Затраты по вариантам при годовом выпуске отливок (т) по вариантам							
	4000		2000		1000		1000	
	I	II	I	II	I	II	I	II
Капиталовложения тыс. руб.	192	620	154	620	110	620	36	620
Имущественная оценка себестоимости тыс. руб. в год	562.5	416.1	492.5	381.1	408.5	312.5	219.6	157.6
Приведенные затраты на годовой выпуск отливок, тыс. руб.	591.3	539.1	515.6	477.6	425.0	405.5	225	250.6

стоимость. При объемах производства менее 2400 т изготовление отливок целесообразно на кошедерах, оснащенных формовочными машинами.

Существующие методики определения экономической эффективности посвящены расчету экономического эффекта от внедрения автоматических линий. Однако при этом не учитывается сверхреализуемый экономический эффект, определяемый потерями, которые являются следствием недоиспользования автоматических линий по их технической или проектной производительности.

Нереализуемый экономический эффект в связи с недоиспользованием автоматических линий по их проектной производительности

$$\mathcal{E}_{н.р.} = \sum A_j (\ln W_{пр} - \ln W_j) - C_{пр} (W_{пр} - W_j) + W_j (C_j - C_{пр}), \quad (8.5)$$

где  $A_j$  — суммарные текущие затраты на изготовление годовой программы в  $j$ -м году тыс. руб.;  $W_{пр}$  — годовая производственная мощность линии, оцененная по проектной производительности  $j$ -го года т;  $W_j$  — фактическая мощность линии  $j$ -го года, т;  $C_{пр}$  — себестоимость 1 т отливок соответствующая проектной производительности руб;  $C_j$  — фактическая себестоимость 1 т отливок в  $j$ -м году, руб.

Подсчитано значение  $\mathcal{E}_{н.р.}$  для автоматической линии без опочной формовки  $\gamma$  с размер потерь вследствие производительности. При этом принята проектная производительность линии 6000 т/год себестоимость 1 т отливок 190 руб. Нереализуемый экономический эффект при годовом выпуске отливок 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 т/год составляет соответственно 176, 137, 109, 5, 80, 60 тыс. руб. в год и зависит таким образом от объема производства.

Выполненный анализ позволил определить как объемы производства при которых применение автоматических линий безопочной формовки становится целесообразным, так и размеры убытков, которые несет народное хозяйство вследствие недоиспользования автоматических линий по их проектной производительности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Абашев В. К., Кузин А. В. Взаимодействие газов с поверхностью стальных отливок при литье в формы из холодильноудерживающих смесей // Литейное производство, 1979, № 6 С. 2—4.
- 2 Абашев В. К., Кузин А. В. Влияние технологических факторов на науку рождение стальных отливок, получаемых в формах из ХТС // Литейное производство, 1980, № 12 С. 21—22.
- 3 Адам М. К. Физика и химия поверхностей. Л.: Гостэклиздат 1974 562 с.
- 4 Аболов Р. Химия кремнеземов. В 2 ч. М.: Мир, 1982. Ч. 1—2. 1127 с.
- 5 Ахмедов П. Н. К вопросу о работе формовочных машин // Вестник южного района, 1926, № 6 С. 252.
- 6 Ахмедов Е. В., Юффе М. А., Корнишова О. А. Выбор способов формообразования чугунных отливок деталей искровых алэктродугалей // Технология алэктротехнического производства, 1979, № 6 С. 4—9.
- 7 Балдин В. В. Модальное производство. М.: Машиностроение 1970 60 с.
- 8 Балдин Г. Ф. Основы теории формирования отливок. В 2 ч. М.: Машиностроение, 1976. Ч. 1. 328 с.; 1979. Ч. 2. 335 с.
- 9 Балдинов О. А. Структурный метод исследования сложных производственных систем // Тр. МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1976, № 187. С. 4—25.
- 10 Бере П. П. Качество литейной формы. М.: Машиностроение, 1971. 291 с.
- 11 Бере П. П. Формовочные материалы. М.: Машиностроение, 1963. 408 с.
- 12 Биргер И. А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение 1978 210 с.
- 13 Боровский Ю. Ф. Классификация смесей // Литейное производство, 1980 № 12. С. 14—15.
- 14 Боровский Ю. Ф., Шапкин М. И. Формовочные и стержневые смеси. М.: Машиностроение 1980. 86 с.
- 15 Борсух П. А., Игнатенко В. И. Жидкоскопические смеси с жидкими отвердителями // Литейное производство 1982, № 8. С. 18—20.
- 16 Борсух П. А., Ласс А. М. Жидкие самоветвердеющие смеси. М.: Машиностроение 1979. 254 с.
- 17 Бречко А. А., Великанов Г. Ф. Формовочные и стержневые смеси с задерживающими свойствами. Л.: Машиностроение, 1982. 216 с.
- 18 Великановский И. В. Пригор на отливках. М.: Машиностроение 1983 192 с.
- 19 Васильев В. В. Исследования взаимодействия крупных стальных отливок с формой и улучшение качества их поверхности. Дип. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. Л.: ЛПИ им. М. И. Калашникова, 1978. 216 с.
- 20 Васильев И. Е., Корнишова О. А., Васильев В. В. Исследование попарного соотношения холодильноудерживающих смесей // Литейное производство 1982 № 12. С. 18—19.
- 21 Васильев В. А., Кузнецов В. П., Николаев В. Г. Расчет окислительной восстановительной газовой атмосферы литейной формы // Тр. МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1975, № 187. С. 79—102.
- 22 Васин Ю. П., Васин З. М. Научная и инженерная классификация свойств формовочных смесей // Программизация процессов изготовления литейных форм Челябинск, 1979. С. 15—18.
- 23 Вербицкий В. И., Гайн О. И. Современная тенденция совершенствования стержневых формовочных машин // Литейное производство, 1983 № 3 С. 30—31.
- 24 Влияние технологических факторов на качество поверхностного слоя из сплава ЖСБ-К/С. И. Пиланов М. М. Захаров, Е. Н. Масленко и др. // Современная методика обеспечения высокого качества отливок. Л.: ЛПИИП 1977. С. 50—53.
- 25 Волынец А. А. Модель процесса уплотнения формовочной смеси // Литейное производство в автомобильном строительстве. М.: 1982, вып. 2. С. 108—113.

26. Григорьев Б. Л., Ефимов Л. А. Регулируемые характеристики водных растворов сплава натрия//Тр. ЛПИ им. М. И. Калашникова, 1978, № 304. С. 103—105.

27. Губарь Е. В. Вычислительные методы анализа и распознавания патологических процессов. М.: Медицина, 1978. 218 с.

28. Гуляев Б. Б., Корнишкин О. А. Современное состояние и перспективы формовочных процессов//Развитие методов и процессов образования литейных форм. М.: Наука, 1977. С. 5—20.

29. Гуляев Б. Б. Теория литейных процессов. Л.: Машиностроение, 1976. 214 с.

30. Дифференцирование последовательное двустороннее прессование форм изоблен, прокаткой и пресской центрич. В. В. Рабинович, Ю. К. Дьяков, В. Д. Пелевин, С. Н. Козлов//Литейное производство, 1982, № 4. С. 18—19.

31. Дорошенко С. П., Ващенко К. И. Национальная формалка Киев. Визд. сиб. 1980. 176 с.

32. Дорошенко С. П., Дроблюко В. И., Ващенко К. И. Получение отливок без прерыва в мешалочных формах. М.: Машиностроение, 1978. 208 с.

33. Дорошенко С. П. Основы выбора смесей//Развитие методов и процессов образования литейных форм. М.: Наука, 1977. С. 23—25.

34. Елисеенко И. И., Рукавишников В. О. Группировка корреляции распада ивации образцов. М.: Статистика, 1977. 192 с.

35. Жуковский С. С., Лисеев А. М. Формы и стержни из высокопрочных сплавов. М.: Машиностроение, 1978. 224 с.

36. Изготовление форм безотливных отливок: станки электродвигательного приводу прессовым методом//Е. В. Андринов, Б. В. Гуляев, О. А. Корнишкин и др.//Литейное производство, 1976, № 8. С. 97—98.

37. Изменение химического состава поверхности слоя отливок//В. В. Андринов, С. И. Иванов, А. В. Кузнецов и др.//Пути предупреждения дефектов в отливках и контроль их качества. Л.: ДЛНТП, 1980. С. 61—64.

38. Испытания формовочных смесей при динамическом нагружении//И. В. Матвеев, В. А. Исеевич, А. З. Исатулов и др.//Литейное производство, 1981, № 2. С. 14—15.

39. Исследование газового режима форм//П. В. Черноголов, В. И. Шварц, Г. А. Дробях и др.//Литейное производство, 1976. № 6. С. 20—22.

40. Исследование напряженного состояния в литейных формах//О. А. Корнишкин, М. А. Иоффе, Г. А. Смирнов и др.//Развитие методов и процессов образования литейных форм. М.: Наука, 1977. С. 93—103.

41. Исследование состава газовой среды литейных форм методом газодиффузионной хроматографии//В. В. Бауаев, И. Б. Куньяев, А. В. Овчинников и др.//Прогрессивные методы изготовления литейных форм. Челябинск: УПИ им. Ленинского комсомола, 1975. С. 43—50.

42. Исследование технологии дифференциального прессования форм//Ю. В. Смирнов, О. А. Корнишкин, В. В. Гуляев и др.//Литейное производство, 1976, № 5. С. 20—21.

43. Исследование технологии отливок методом математической статистики//М. А. Иоффе, О. А. Корнишкин, Е. В. Андринов и др.//Технология электродвигательного производства, 1983, № 7. С. 1—2.

44. Калашникова А. Я. Современное формовочное материалы для литейного производства//Тезисы докладов VI Всесоюзного научно-технического съезда литейщиков (Ленинград, 17—20 мая 1983 г.). М.: НИИ информатики по машиностроению, 1983. С. 197—198.

45. Карпов Ю. И. Исследование и разработка оптимального режима уплотнения литейных форм на формовочных машинах с комбинированным прессово-вспрыскиванием рабочих цилиндров. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МАМИ, 1975. 24 с.

46. Кизильская Г. С., Аббасов Ю. И. Многостержневые группировки. М.: Статистика, 1978. 159 с.

47. Козлов С. М. Газовый режим и консолидирование органических наполнителей форм при затворах//Литейное производство, 1976, № 3. С. 27—28.

48. Комиссаров В. А., Калашникова А. Я. Состояние и перспективы развития формовочных материалов и смесей//Литейное производство, 1980. № 2. С. 16—18.

49. Корнишкин О. А., Иоффе М. А. Исследования характеристик механических свойств формовочных смесей//Исп. вузов. Машиностроение, 1976, № 6. С. 120—130.

50. Корнишкин О. А., Надерьяев В. П., Солнцева Л. Е. Длительность качающегося отливки//Применение ЗВМ и повышение эффективности литейного производства. Л.: ДЛНТП, 1983. С. 9—12.

51. Корнишкин О. А. Опыт разработки и совершенствования методов уплотнения формовочных и стержневых смесей. Л.: ДЛНТП, 1976. 24 с.

52. Корнишкин О. А. Разработка теории и исследования процессов уплотнения формовочных смесей. Дис. ... докт. техн. наук. М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1979. 30 с.

53. Леопольдов М. Н., Шварцман Л. А., Шуца Л. А. Физико-химические основы взаимодействия металлов с контролируемым атмосферой. М.: Металлургия, 1980. 264 с.

54. Лещинский В. Л. Некоторые вопросы пескоудерживающего процесса//Литейное производство, 1975, № 11. С. 24—27.

55. Матвеев И. В., Волковский В. Д., Чахович Ф. А. Современные тенденции развития импульсных методов формовки//Литейное производство в автоматизированном. М.: 1982. Вып. 2. С. 35—39.

56. Матвеев И. В., Иванов Е. И. Метод теоретического определения пара метров процесса уплотнения форм//Литейное производство, 1982, № 7. С. 18—20.

57. Матвеев И. В., Корнишкин Л. Е., Шелкин Н. С. Реологические уравнения для состояния формовочных смесей при уплотнении//Литейное производство в автоматизированном. М.: 1982. Вып. 2. С. 91—97.

58. Матвеев И. В., Рачинский Е. А., Иванов Е. И. Реологические испытания формовочных смесей//Литейное производство, 1977, № 12. С. 13—22.

59. Матвеев И. В. Реологические уравнения состояния формовочных смесей//Развитие методов и процессов образования литейных форм. М.: Наука, 1977. С. 104—110.

60. Матвеев И. В. Скоростное прессование форм//Литейное производство, 1981, № 12. С. 20—21.

61. Матвеев И. В., Юсупов А. Б. Исследование процесса уплотнения песчаных форм при скоростном прессовании//Литейное производство, 1983, № 10. С. 17—18.

62. Медведь Я. И. Газовый процесс в литейной форме. М.: Машиностроение, 1980. 200 с.

63. Метод исследования процесса образования трещин на отливках//И. Ю. Пашкева, Е. А. Шварц, В. А. Ионовский и др.//Литейное производство, 1977, № 10. С. 26—28.

64. Орлов Г. М. Механизм динамического уплотнения форм//Литейное производство, 1983, № 7. С. 3—5.

65. Орлов Г. М. Об использовании ЗВМ при подборе и сгруппировании формовочных смесей//Литейное производство, 1981, № 5. С. 13—14.

66. Орлов Г. М. Современные процессы уплотнения сырых песчаных смесей//Литейное производство, 1983, № 4. С. 19—20.

67. Оценка способов формования отливок станком электродвигательного привода//О. А. Корнишкин, Б. В. Гуляев и др.//Литейное производство, 1979, № 1. С. 18—20.

68. Повышение эффективности литейного производства и качества литых отливок//Тезисы докладов I съезда литейщиков. Минск: 1978. 80 с.

69. Прогнозирование свойств высокопрочных смесей//Н. Е. Василевский, Л. Е. Солнцева, О. А. Корнишкин и др.//Экономические основы и планирование литейного производства. Л.: ДЛНТП, 1979. С. 82—85.

70. Разработка оптимальных составов холодноупрочняющих смесей для эпоксидного процесса изготовления стержней//Н. Е. Василевский, Л. Е. Солнцева, О. А. Корнишкин и др.//Систематическое реконструирование

механизации и автоматизации литейных цехов и заводов ЛДНТП 1978 С 21—24

71. Расчет напряженного состояния смеси при прессовании форм/О. А. Корюшкин, М. А. Иоффе, Б. Б. Гуляев и др.//Литейное производство 1976 № 3. С. 26—27

72. Регенерация песков из отработанных смесей/В. А. Комиссаров, А. А. Шенкерт В. А. Сафронов и др.//Литейное производство 1978, № 5. С. 16—17

73. Сварка А. А. Покрытие литейных форм М. Машиностроение 1977. 216 с.

74. Свойства стальных отливок при изготовлении их с использованием ХТС/В. К. Абашев Ю. И. Остахов Е. И. Черышева и др.//Опыт совершенствования процессов формовки. Л.: ЛДНТП, 1980. С. 28—32.

75. Сидоров Н. М., Васильев В. А. Методика определения состава паровоздуха среды литейной формы//Изв. вузов Машиностроение 1976 № 2. С. 140—143

76. Сравнение по теплотному актию 3-х изд. отработ и дог. Л. Машиностроение 1978, 758 с.

77. Средства и системы автоматизации литейного производства//К. С. Богдан В. И. Горбенко В. М. Делиска и др. М.: Машиностроение 1981. 272 с.

78. Степанов Н. Ф., Ермакин М. Е., Филиппов Г. Г. Методы выявления дефектов в физическом анализе. М.: МГУ 1976. 360 с.

79. Стрелец В. Насадочные материалы в газовой хроматографии М. Химия 1974. 357 с.

80. Тезисы докладов II съезда литейщиков. Л.: 1983. 414 с.

81. Технологические особенности изготовления форм для отливок стали и чугуна электроплавильной вакуумно-прессовым методом/Е. В. Акимов М. А. Иоффе, Г. И. Гуляев и др.//Технология электроплавильного чугуна 1982. № 4. С. 4—6.

82. Титов Н. А. Контрольные атмосферы в термической обработке. Горький: ГПИ им. А. А. Жданова, 1981. 84 с.

83. Толорос Р. П., Пелко П. Ц. Дефекты в отливках из черных сплавов. М. Машиностроение, 1984. 184 с.

84. Тугунов Л. И., Карапетян Э. Г. Мирноев Р. Г. Управление качеством промышленных изделий. Л.: ЛГУ, 1977. 119 с.

85. Уорретт У. Глины и керамическое сырье Пер с англ. М. Мир 1978. 237 с.

86. Факторы качества отливок турбинных лопаток из сплава АВСВ/К. С. Ильянов, А. В. Кузид, Е. Н. Масляева и др.//Литейное производство 1978, № 12. С. 19—20

87. Фролова М. В., Тульчинский И. И. Снижение расхода формовочных песков — народнохозяйственная задача//Литейное производство, 1976, № 9. С. 1—2.

88. Хазан Л., Агитинко В. И. Статистические методы как основа системного анализа процессов приготовления разделов формовочных смесей//Развитие методов и процессов литейных форм. М.: Наука, 1977. С. 82—86.

89. Харьков М. И., Абашев В. К., Кузин А. В. Влияние атмосферных форм на качество стальных отливок при использовании синтетических смесей//Литейное производство, 1978, С. 19—16

90. Шестова В. М., Бурман П. Н. Состояние и перспективы развития литейного производства в зарубежных промышленно развитых странах: Технология литейного производства. М.: НИИИзм, 1982. 72 с.

91. Энгельс Г. Регенерация отработанных смесей//Литейное производство 1976 № 2. С. 30—33

92. Эффективность процессов формовки/Е. В. Акимов М. С. Писневич М. А. Иоффе и др.//Опыт совершенствования процессов формовки ЛДНТП 1980 С. 4—8.

93. Vinyerger J. Jahresübersicht Formstoffe (15 Folge)//Gießerei 1978 65 N 21 S 588—594 600

94. Burian A., Kristek J., Nonzova S. Nova metoda k provozni kontrole kvality slevarenskych vodnich skej//Slevarenstvi, 1979. N 3/4. S. 119—122.

95. Burian A., Kristek J. Prilpavek k hodnoteni vlastnosti vodnich skej pomoci koagulačního práhu//Slevarenstvi, 1982. xxx N 2/3. S. 58—60.

96. Carey P. Fundamentals of No-base Sand Reclamation/Modern Castings 1977 67 N 12 P 63—65.

97. Сравнение методов за работами на термике сырьем/Т. Ангелов П. Ильянов Э. Масляева и др.//София: Техника, 1973. 295 с.

98. Flala A., Rossin K. Zemeck L. Control of the CO<sub>2</sub> Process by a Potentiometric Technique/Foundry Trade Journal 1978 144 N 3128 P 19—14 17—18 21—22

99. Gettwert G. Der gegenwertige Stand des Kohlendioxid-Erstarrungsverfahrens zur Form und Kernherstellung/Gießerei, 1981. 68. N 22. S. 609—606.

100. Jelinek P., Miksovsky F. Možnosti ovlivnovani pevnosti tvoriviny hurnových smesí sflitací/Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské v Ostrave 1977, N 3. S. 201—225

101. Paulček R. Die selbsttätigenden Formstoffmischungen in der ČSSR//Gießereitechnik, 1976, 22 N 12. S. 418—419.

102. Poláček B. Problemy regenerace vratů ST smesí s vodním sálem a použitelnost regenerátu/Slevarenstvi, 1978, 26. N 2/3. S. 65—69

103. Pristley R. J. Fluid bed sand reclamation system offers economic benefits improved castings/Modern Castings, 1978, 68, N 8. P. 47—49.

104. Seingesh K. Chemistry of sodium silicate as a Sand Binder/International Cast Metal Journal, 1979, March, P. 60—63.

105. Taylor D. A. Reclamation and re-use of sand from chemically bonded system/Chem. Binders Foundries Warwick, 1976, P. 231—23/9.

106. Taylor D. A. Recuperation et réutilisation du sable à partir de systèmes avec liants chlorogénaux/Fonderie, 1977, N 369, P. 243—247.

107. Williams R., George R. D., Richman D. J. Further aspects of the reclamation of Sodium silicate bonded sand/International Foundry Congress 43-rd Bucharest 1976 Report N 7 P 18

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава 1</b> Возникновение и развитие технологии и теории формовочных процессов . . . . .	4
1.1 Этапы совершенствования технологии литейной формки	5
1.2. Основные понятия и термины	10
<b>Глава 2</b> Технологические схемы изготовления литейных форм	—
2.1. Материалы для изготовления литейных форм	22
2.2. Оснастка	26
2.3. Формовка	40
2.4. Регенерация смесей	52
<b>Глава 3</b> Процессы уплотнения смесей	—
3.1 Основное положение теории уплотнения	—
3.2 Определение технологически необходимой степени уплотнения . . . . .	59
3.3 Уплотнение прессованием	61
3.4 Пескодульный и пескодульно-прессовый процессы уплотнения	83
3.5 Доплазменные процессы уплотнения	94
<b>Глава 4</b> Процессы упрочнения смесей	107
4.1. Общие сведения об упрочнении смесей	—
4.2. Песчано-галенистые смеси	122
4.3. Смеси с жидким стеклом	131
4.4. Смеси с силикатными смолами	142
<b>Глава 5</b> Атмосфера литейной формки . . . . .	161
5.1 Формирование атмосферы литейной формки	—
5.2. Исследование атмосферы формки	176
<b>Глава 6</b> Формирование поверхности отливок	194
6.1 Обзор поверхностных дефектов отливок	—
6.2 Изменение химического состава поверхностного слоя	201
<b>Глава 7</b> Анализ качества форм и отливок	209
7.1 Критерии и методы оценки качества	—
7.2 Оценка качества форм . . . . .	210
7.3 Оценка качества отливок . . . . .	216
7.4. Диагностика качества отливок . . . . .	223
<b>Глава 8</b> Выбор и оптимизация процессов формовки	236
8.1. Морфологический анализ процессов формовки	—
8.2 Тенденция развития оборудования	239
8.3 Разработка рациональных составов смесей	246
8.4 Последовательность выбора и оптимизации процессов формовки . . . . .	250
Список литературы . . . . .	259