

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Машины и технология литейного производства»

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Лабораторный практикум для студентов специальности
1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства»
дневной и заочной формы обучения

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по образованию в области металлургического оборудования и технологий*

Минск
БНТУ
2016

УДК 621.74(075.8)

ББК 34.61я73

Т33

С о с т а в и т е л и :

Д. М. Кукуй, В. А. Скворцов

Р е ц е н з е н т ы :

В. А. Стасюлевич, канд. техн. наук, проректор по учебной работе
ГУ "«Институт повышения квалификации и переподготовки
руководителей и специалистов промышленности
«Кадры индустрии»»;

С. Л. Ровин, канд. техн. наук, доцент УО «Гомельский
государственный технический университет имени П. О. Сухого»

Т33 **Теория** и технология литейного производства: лабораторный практикум для студентов специальности 1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства» дневной и заочной формы обучения / сост.: Д. М. Кукуй, В. А. Скворцов. – Минск : БНТУ, 2016. – 65 с.
ISBN 978-985-550-539-7.

Содержатся методические указания по самостоятельной подготовке к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теория и технология литейного производства». Приведены требования к оформлению отчетов о выполненных работах и перечень вопросов, на которые необходимо ответить при защите лабораторных работ.

УДК 621.74(075.8)

ББК 34.61я73

ISBN 978-985-550-539-7

© Белорусский национальный
технический университет, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ОРГАНИЗАЦИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	4
ИНСТРУКЦИЯ ПО МЕРАМ БЕЗОПАСНОСТИ И ОХРАНЕ ТРУДА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	5
Лабораторная работа № 1. Определение марки формовочного песка	8
Лабораторная работа № 2. Определение марки бентонитовой и каолинитовой формовочной глины	16
Лабораторная работа № 3. Исследование влияния времени перемешивания на технологические свойства смеси.....	24
Лабораторная работа № 4. Определение текучести формовочных и стержневых смесей	28
Лабораторная работа № 5. Определение технологических свойств противопопригарных покрытий.....	32
Лабораторная работа № 6. Исследование влияния влажносодержания на физико-механические и технологические свойства формовочной смеси	38
Лабораторная работа № 7. Изучение влияния количества жидкого стекла и времени продувки углекислым газом на физико-механические свойства жидкостекольных смесей	43
Лабораторная работа № 8. Изучение свойств жидких самотвердеющих смесей	48
Лабораторная работа № 9. Изучение технологического процесса изготовления литейных стержней в нагреваемой оснастке.....	54
Лабораторная работа № 10. Исследование влияния количества связующего материала и отвердителя на кинетику твердения холоднотвердеющих смесей	58

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы по дисциплине «Теория и технология литейного производства» составлены в соответствии с учебной программой подготовки студентов по специальности «Машины и технология литейного производства»

Целью проведения лабораторных работ является закрепление теоретического материала курса и ознакомление студента на практике с методами и приборами проведения испытаний формовочных материалов и смесей, а также приобретение навыков в проведении и оформлении законченных экспериментальных работ.

Данный лабораторный практикум состоит из 10 лабораторных работ, каждая из которых носит исследовательский характер и содержит необходимые теоретические сведения, описание методик, оборудования, приборов, материалов для проведения работ, а также методические указания по содержанию отчета и вопросы для самопроверки.

ОРГАНИЗАЦИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

В основу каждой лабораторной работы положены параллельное выполнение работ и принцип максимальной самостоятельности студентов.

Началу работ предшествует вводная беседа, в которой студенты получают инструктаж по технике безопасности и расписываются в соответствующем журнале.

Перед выполнением очередной работы преподаватель проверяет подготовку студентов к занятиям, сообщает некоторые теоретические сведения, относящиеся к данной работе, знакомит с безопасными приемами работы на приборах и оборудовании. Лабораторные работы проводятся под руководством преподавателя и при участии лаборанта.

По окончании работы все подгруппы обмениваются полученными результатами исследований, заносят их в соответствующие таблицы и приступают к обработке и анализу данных. Затем составляется отчет, содержание которого указано в каждой лабораторной работе и который сдается преподавателю перед началом следующей работы.

Студенты, пропустившие лабораторную работу, выполняют ее в конце семестра, вне расписания, по свободному графику.

Студент, не защитивший в установленный срок лабораторные работы, не получает зачет и к экзамену не допускается.

ИНСТРУКЦИЯ ПО МЕРАМ БЕЗОПАСНОСТИ И ОХРАНЕ ТРУДА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. К выполнению лабораторных работ в учебной лаборатории допускаются студенты:

- прошедшие медицинское освидетельствование и по состоянию здоровья допущенные к учебе;

- прошедшие инструктаж по мерам безопасности и охране труда при проведении лабораторных работ с обязательным оформлением в журнале.

2. Студенты обязаны:

- соблюдать правила внутреннего распорядка БНТУ, утвержденные приказом ректора от 27.05.2002 № 2208;

- не курить в лаборатории;

- не распивать прохладительные напитки, не принимать пищу на местах проведения лабораторных работ;

- соблюдать правила санитарной и личной гигиены;

- выполнять только ту лабораторную работу, которая задана преподавателем и предусмотрена учебным планом, безопасные способы выполнения которой ему известны;

- выполнять лабораторную работу только с теми приборами и оборудованием, которые указаны в инструкции по выполнению соответствующей лабораторной работы;

- знать безопасные методы и приемы обращения с приборами и оборудованием при выполнении данной лабораторной работы.

3. Допуск студентов в кабинет (лабораторию) осуществляется с разрешения преподавателя (лаборанта).

4. Число студентов в лаборатории не должно превышать количества индивидуальных учебных мест.

5. Перед выполнением каждой лабораторной работы студенту необходимо получить у преподавателя допуск к ее выполнению, подтверждая этим усвоение теоретического материала. Студенты не получившие допуск, к выполнению лабораторной работы не допускаются.

6. Студентам запрещается:

- работать в лаборатории в отсутствие преподавателя или лаборанта, а также в неустановленное время без разрешения преподавателя;

– выполнять в учебной лаборатории (кабинете) экспериментальные работы, не связанные с выполнением задания;

– загромождать посторонними предметами столы, а также подступы и проходы к противопожарному инвентарю и выходам из помещений (в том числе аварийным).

7. Студенты должны извещать преподавателя (лаборанта) о любой ситуации, угрожающей жизни и здоровью окружающих, о каждом несчастном случае, произошедшем во время занятий, а также об ухудшении состояния своего здоровья, в том числе о проявлении признаков острого заболевания, о замеченных неисправностях приборов и оборудования и до их устранения к выполнению лабораторной работы не приступать.

8. Приступая к выполнению лабораторной работы, необходимо:

– усвоить методику выполнения лабораторной работы, правила ее безопасного выполнения;

– методы и приемы безопасного обращения с приборами и оборудованием, меры безопасности при выполнении данной лабораторной работы;

– ознакомиться с экспериментальной установкой;

– получить у преподавателя допуск к выполнению лабораторной работы, подтверждая этим усвоение теоретического материала.

9. Включение используемых приборов и оборудования производят преподаватель или инженер. Только после того, как они убедятся в исправности приборов и правильности их сборки, можно приступить к выполнению лабораторной работы.

10. При выполнении лабораторной работы необходимо:

– строго соблюдать правила обращения с используемыми приборами или оборудованием;

– не наклоняться к ним близко, не передавать через них какие-либо предметы и не опираться на них;

– замену любого элемента установки, присоединение или разъединение разъемных соединений производить только при отключенном электропитании под наблюдением преподавателя или инженера. Повторное включение оборудования и приборов производить только после проверки преподавателем или инженером исправности приборов и правильности их подключения;

– быть внимательным, соблюдать порядок, не вмешиваться в работу соседних бригад, не отвлекать их посторонними разговорами;

– не включать приборы и оборудование, выполнение лабораторных работ на которых не предусмотрено заданием. Не оставлять без присмотра включенное оборудование.

11. Во избежание несчастных случаев запрещается выполнять лабораторные работы с приборами и оборудованием, если в лаборатории находится один человек.

Перед уходом, даже на короткое время, источник нагрева должен быть выключен. Если по условиям лабораторной работы нельзя прекращать нагрев, наблюдение за лабораторной работой и нагревом на время отсутствия обучающегося должно быть поручено другому лицу.

12. На учебном месте выполнения лабораторной работы необходимо поддерживать порядок.

13. При возникновении признаков неисправности прибора, а также при всяких затруднениях при выполнении лабораторных работ следует немедленно обращаться к преподавателю или инженеру.

14. Об окончании выполнения лабораторной работы необходимо доложить инженеру или преподавателю. Отключение аппаратуры и приборов от электросети производят преподаватель или инженер.

15. По окончании привести в порядок учебное место выполнения лабораторных работ.

16. Обо всех недостатках, обнаруженных во время выполнения лабораторной работы, сообщить преподавателю или инженеру.

17. В случае возникновения аварийной ситуации следует немедленно прекратить работу.

18. О случае травмы или внезапного заболевания, ухудшения самочувствия необходимо сообщить преподавателю, инженеру (лаборанту) и обратиться за медицинской помощью в здравпункт либо в учреждение здравоохранения.

19. При возникновении пожара или загорания студент обязан немедленно сообщить об этом в городскую пожарную службу по телефону 101, указав адрес объекта и что горит.

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАРКИ ФОРМОВОЧНОГО ПЕСКА

Цель работы: ознакомить студентов с основными стандартными методами исследования формовочных песков.

Общие сведения

Основной составляющей формовочных и стержневых смесей являются формовочные пески.

Основой формовочного песка является кварц (SiO_2). В зависимости от массовой доли глинистой составляющей, под которой понимают частицы глинистых материалов, обломки зерен кварца и других минералов размером менее 22 мкм, формовочные пески подразделяют на кварцевые (К), тощие (Т), жирные (Ж) (ГОСТ 2138–91).

Кварцевые и тощие формовочные пески подразделяют на группы в зависимости от массовой доли глинистой составляющей, содержания диоксида кремния, коэффициента однородности и среднего размера зерен, а жирные – от предела прочности при сжатии во влажном состоянии и среднего размера зерна.

В кварцевых песках доля глинистой составляющей не должна превышать 2 %. Группы кварцевых песков приведены в табл. 1.1–1.4.

Таблица 1.1

Группа	Массовая доля глинистой составляющей, %, не более
1	0,2
2	0,5
3	1,0
4	1,5
5	2,0

Таблица 1.2

Группа	Массовая доля глинистой составляющей, %, не более
К ₁	99,0
К ₂	98,0
К ₃	97,0
К ₄	95,0
К ₅	93,0

Таблица 1.3

Группа	Коэффициент однородности, %
О ₁	Св. 80,0
О ₂	От 70,0 до 80,0
О ₃	От 60,0 до 70,0
О ₄	От 50,0 до 60,0
О ₅	До 50,0

Таблица 1.4

Группа	Средний размер зерна, мм
01	До 0,14
016	От 0,14 до 0,18
02	От 0,19 до 0,23
025	От 0,24 до 0,28
03	Св. 0,28

В тощих песках содержание глинистой составляющей колеблется от 2,0 до 12,0 %. Группы тощих песков приведены в табл. 1.3–1.6.

Таблица 1.5

Группа	Массовая доля глинистой составляющей, %, не более
1	4,0
2	8,0
3	12,0

Таблица 1.6

Группа	Массовая доля диоксида кремния, %, не менее
T ₁	96,0
T ₂	93,0
T ₃	90,0

Жирные пески содержат от 12,0 до 50,0 % глинистой составляющей. Группы жирных песков приведены в табл. 1.4 и 1.7.

Таблица 1.7

Группа	Предел прочности на сжатие во влажном состоянии, МПа
Ж ₁	Св. 0,08
Ж ₂	От 0,05 до 0,08
Ж ₃	До 0,05

При маркировке кварцевых и тощих формовочных песков используют следующее обозначение: на первом месте располагается группа массовой доли глинистой составляющей, на втором – группа массовой доли диоксида кремния, на третьем месте – группа коэффициента однородности и на четвертом – группа среднего размера зерна.

Пример

3K₂O₃016 – кварцевый формовочный песок с массовой долей глинистой составляющей от 0,5 до 1,0 %, массовой долей диоксида кремния не менее 98 %, коэффициентом однородности от 60 до 70 % и средним размером зерна от 0,14 до 0,18 мм.

1T₃O₁02 – тощий формовочный песок с массовой долей глинистой составляющей не более 4,0 %, массовой долей диоксида кремния не менее 90,0 %, коэффициентом однородности свыше 80,0 %, средним размером зерна от 0,19 до 0,23 мм.

Ж₃01 – жирный формовочный песок с пределом прочности на сжатие во влажном состоянии не более 0,05 МПа и средним размером зерна до 0,14 мм.

Кварцевые формовочные пески должны соответствовать показателям по массовой доле влаги, концентрации водородных ионов водной вытяжки (рН), массовой доле вредных примесей, форме зерен, значения которых приведены в табл.1.8–1.11.

Таблица 1.8

Группа	Массовая доля влаги, %, не более
Сухие	0,5
Влажные	4,0
Сырые	6,0

Таблица 1.9

Группа	рН
Кислые	До 6,2
Нейтральные	От 6,2 до 7,0
Щелочные	Св.7.0

Таблица 1.10

Группа	Массовая доля вредных примесей, %, не более	
	Оксиды: Na ₂ O, K ₂ O, CaO, MgO	Оксиды железа Fe ₂ O ₃
Очень низкая	0,40	0,20
Низкая	0,80	0,40
Средняя	1,20	0,60
Высокая	1,60	0,80
Очень высокая	2,00	1,00

Таблица 1.11

Группа	Коэффициент угловатости, ед., %, не более
Округлая	1,10
Полу-округлая	1,25
Угловатая	1,40

По теоретической удельной поверхности и газопроницаемости кварцевые и тощие формовочные пески подразделяют на группы, приведенные в табл. 1.12, 1.13.

Таблица 1.12

Группа	Теоретическая удельная поверхность, м ² /кг, не менее
Высокая	15
Средняя	10
Низкая	5

Таблица 1.13

Группа	Газопроницаемость, м ² /Па·с, не менее
Очень высокая	550
Высокая	350
Средняя	200
Низкая	100
Очень низкая	30

По потере массы при прокаливании формовочные пески подразделяют на группы, указанные в табл. 1.14.

Таблица 1.14

Группа	Потеря массы при прокаливании, %, не более
Высокая	0,2
Средняя	1,0
Низкая	3,0

Массовая доля сульфидной серы в кварцевых формовочных песках должна не превышать 0,05 % и не иметь посторонних включений: агломератов кварцитов и кварцевых песчаников, остатков растительных слоев, угля, торфа, известняка.

В работе будут рассмотрены некоторые методы испытаний формовочных песков.

Определение массовой доли глинистой составляющей – по ГОСТ 29234.1.

Определение коэффициентов однородности и среднего размера зерна – по ГОСТ 29234.3.

Определение газопроницаемости – по ГОСТ 29234.13.

Определение формы зерен песка – по ГОСТ 29234.12.

Определение глинистых частиц

Оборудование, инструмент, материалы: шкаф сушильный, весы лабораторные; аппарат для определения глинистых частиц; трубка U-образная; мешалка лабораторная; сосуд стеклянный емкостью 1 дм³; палочка деревянная или стеклянная диаметром 4–6 мм; печь муфельная $T = 1000$ °С; чаша кварцевая; эксикатор; песок кварцевый; пирофосфат натрия 10 г/дм³; вода техническая.

Порядок выполнения работы

От исследуемого песка отбирают две навески массой по 50 г каждая. Одну навеску помещают в кварцевую чашку, высушивают при температуре 105–110 °С и переносят в эксикатор для охлаждения. Вторая навеска высыпается в сосуд аппарата, в который заливается вода в объеме 475 см³ и пирофосфата натрия 25 см³. Сосуд закрывается пробкой, устанавливается на мешалку лабораторную, и его содержимое взбалтывается в течение часа. После этого сосуд снимают с мешалки и содержимое переносят в стакан аппарата для автоматического отделения глинистых частиц, выполняя указания инструкции к аппарату.

Если аппарат отсутствует, то сосуд доливают водой до 150 мм от дна, перемешивают палочкой и дают отстояться в течение 10 мин, затем с помощью U-образной трубки сливают воду. Операцию отмучивания повторяют два раза. При образовании хлопьев в верхнем слое сосуда их удаляют в слив с помощью U-образной трубки. В третий раз доливают водой до того же уровня. Содержимое перемешивают палочкой и дают отстояться в течение 5 мин. Затем воду сливают. Эта операция повторяется до тех пор, пока вода в сосуде после 5-минутного отстаивания не станет прозрачной. Остаток содержимого сосуда переносят количественно в кварцевую чашку и после 5-минутного отстаивания сливают воду. Осадок высушивают при температуре 105–110 °С и помещают в эксикатор для охлаждения. Затем охлажденные обе навески помещают в муфельную печь и прокаливают при температуре 1000 °С в течение 1 ч, после чего охлаждают и взвешивают.

Массу первой навески в процентах определяют по формуле

$$x_1 = \frac{(m - (m_1 - m_2))100}{m},$$

где m – масса навески песка, г;

m_1 – масса чаши с навеской песка до прокаливания, г;

m_2 – масса чаши с навеской после прокаливания, г.

Массу остаточную второй навески в процентах вычисляют по формуле

$$x_2 = \frac{m_1 100}{m}, \%$$

где m_1 – масса чаши с навеской песка после прокаливания, г;

m – масса навески песка, г.

Массовая доля глинистой составляющей определяется по формуле

$$x = x_1 - x_2, \%$$

где x_1 – остаточная масса в процентах первой навески;

x_2 – остаточная масса в процентах второй навески.

Ускоренный метод можно применять при определении массовой доли глинистых частиц в тощих песках. От исследуемого песка берется навеска массой 20 г и помещается в сосуд для кипячения,

наливается вода в количестве 300 см^3 и содержимое кипятится в течение 5 мин. Затем в сосуд доливают еще 200 см^3 воды, вода взбалтывается мешалке в течение 10 мин. После взбалтывания в сосуд доливают воду до объема 1000 см^3 , перемешивают содержимое палочкой и дают отстояться в течение 10 мин. По истечении времени воду сливают U-образной трубкой. Отмучивание повторяют. В третий раз сосуд доливают водой и содержимое перемешивают палочкой, дают отстояться 5 мин. Снова сливают воду. Операцию повторяют до тех пор, пока вода в сосуде после 5-минутного отстаивания не станет прозрачной.

Осадок из сосуда количественно переносят в кварцевую чашу, после отстаивания сливают воду и высушивают при температуре $105\text{--}110 \text{ }^\circ\text{C}$. При наличии органических примесей производят прокалику осадка при температуре $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение часа. Охлажденный песок взвешивают.

Массовую долю глинистых частиц определяют по формуле

$$x = \frac{m - m_1}{m} \cdot 100,$$

где m – масса навески песка, г;

m_1 – масса чаши с навеской песка после отмучивания, г.

Определение среднего размера зерна и коэффициента однородности

Оборудование, инструмент, материалы: прибор для определения гранулометрического состава; комплект сит; весы лабораторные; кисть мягкая; песок кварцевый.

Порядок выполнения работы

Навеску песка после отделения от нее массовой доли глинистых частиц помещают на верхнее сито комплекта, который собран в порядке уменьшения стороны ячейки сита.

Рассев песка ведут в течение 15 мин, после чего прибор выключают и производят разборку комплекта сит. С каждого сита остаток

песка переносят на глянцевую бумагу, при этом с помощью кисти тщательно очищают сито и песок взвешивают.

Массовую долю остатка песка на ситах в процентах определяют по формуле

$$x = \frac{m_1}{m} \cdot 100,$$

где m_1 – масса остатка песка, г;

m – масса исходной навески песка на сите, г.

Полученные результаты заносятся в табл. 1.15 для определения среднего размера зерна и коэффициента однородности.

Таблица 1.15

Размер сторон ячейки сита в свету, мм	Остаток на сите, г	Остаток на сите, %	Частицы размером меньше сторон ячейки сита, %
2,50	0	0	100
1,60	0	0	100
1,00	0,1	0,2	98,8
0,63	0,4	0,8	99,0
0,40	1,80	3,7	95,3
0,315	4,60	9,5	85,8
0,20	18,75	38,5	47,3
0,16	8,90	18,3	29,0
0,10	11,60	23,8	5,2
0,063	2,35	4,8	0,4
0,050	0,15	0,3	0,1
Тазик	0,05	0,1	0
Всего	48,70	100,00	

По полученным данным строят интегральную кривую распределения частиц по размерам, для чего по оси абсцисс в логарифмическом масштабе откладывают размер сторон ячеек сетки в свету, а по оси ординат в линейном масштабе – количество частиц, меньшее данного размера, в процентах.

Средний размер зерна (D_{cp}) соответствует размеру сторон ячеек, через который проходит 50 % песчаной основы.

Для определения коэффициента однородности (O) по интегральной кривой находят процентное содержание частиц размером меньше $4/3 D_{cp}$ и $2/3 D_{cp}$. Коэффициент однородности равен разности этих значений (рис. 1.1).

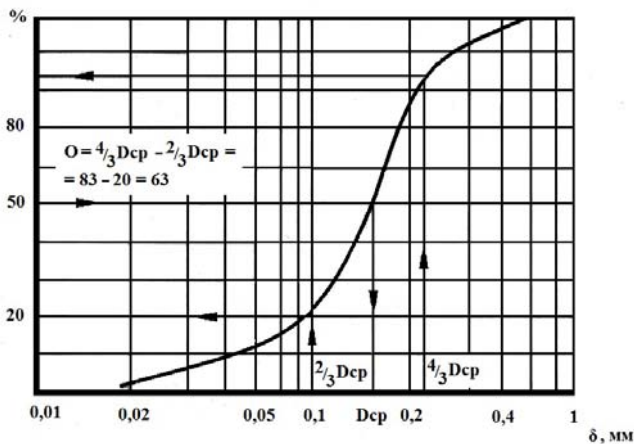


Рис. 1.1. Интегральная кривая

Содержание отчета

1. Характеристика формовочных песков.
2. Описание определения глинистой составляющей.
3. Описание определения среднего размера песка.
4. Результаты полученных исследований.
5. Выводы по каждому разделу работы.

Вопросы для самопроверки

1. Какими показателями характеризуются формовочные пески?
2. Какие показатели характеризуют марку песка?
3. Расшифровать марку песка, предложенную преподавателем.
4. Каков порядок определения глинистой составляющей?
5. Как производится определение среднего размера песка?
6. Чем характеризуется форма зерен песка?
7. Как строится интегральная кривая?
8. Какие бывают формовочные пески и чем они отличаются друг от друга?

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАРКИ БЕНТОНитОВОЙ И КАОЛИНИТОВОЙ ФОРМОВОЧНОЙ ГЛИНЫ

Цель работы: экспериментальное определение основных характеристик формовочных глин.

Приборы и материалы: приборы для определения прочности на сжатие во влажном и сухом состоянии, прочности на разрыв в зоне конденсации влаги; копер лабораторный; весы лабораторные с пределом взвешивания 500 г с погрешностью ± 100 мг; смеситель лабораторный; сушильная печь, муфельная печь; эксикатор; фарфоровая испарительная чаша; песок кварцевый марок (1-2)К₁₋₂О₁₋₃02, бентонитовый порошок, огнеупорная глина, вода с pH = 6,0–7,0.

Общие сведения

Основными связующими материалами в песчано-глинистых смесях (ПГС) являются формовочные глины, способные образовывать с водой пластичный материал, который вместе с зернами наполнителя придает формовочным смесям необходимые свойства, и в первую очередь прочностные. Прочность ПГС зависит от следующих параметров формовочной глины: минералогического и химического состава, вида и количества примесей, дисперсности частиц, коллоидальности, а также количества и состава присоединенных катионов.

В зависимости от минерального состава формовочные глины разделяют на три вида: бентонитовые, каолинистые и полиминеральные (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Виды формовочных глин

Вид глин	Основной породообразующий минерал	Содержание основного породообразующего минерала, %, не менее
Бентонитовая	Монтмориллонит	70
Каолинистая и каолинитогидрослюдистая	Каолинит и гидрослюда	70
Полиминеральная и прочие мономинеральные	Не выявляется	–

Наибольшее применение в составах ПГС нашли бентонитовые глины, основным минералом которых является монтмориллонит, имеющий химическую формулу $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O \cdot nH_2O$ и пакетное строение (рис. 2.1, *з*). Отличительной особенностью монтмориллонита является его способность к набуханию в воде с увеличением своего объема в 10–12 раз. Это связано с расстоянием между пакетами, которое равно $21 \cdot 10^{-10}$ м. Каждый пакет состоит из трех слоев. Между двумя слоями кремнекислородных тетраэдров (рис. 2.1, *б*) внутри пакета расположен слой алюмогидроксильных октаэдров (рис. 2.1, *а*). Внутри слоистого пакета монтмориллонита связь между атомными группами осуществляется при помощи главных валентностей, тогда как между пакетами – слабыми силами Ван-дер-Ваальса, что и обуславливает большую способность бентонита к набуханию.

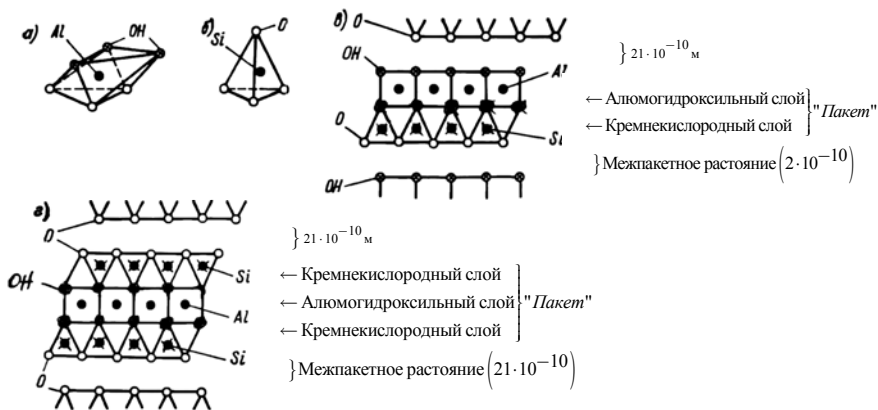


Рис. 2.1. Схема кристаллических решеток глинистых минералов:
а – октаэдр; *б* – тетраэдр; *в* – решетка каолинита; *г* – решетка монтмориллонита

Атомы кремния и алюминия, расположенные в центрах тетраэдров и октаэдров, могут замещаться атомами других металлов меньшей валентности с образованием у частиц монтмориллонита отрицательного заряда. Наличие этих зарядов приводит к адсорбции катионов на поверхности частиц монтмориллонита, способных замещаться другими катионами. Это явление называется *катионообменом*.

В монтмориллонитовых глинах способностью к катионообмену обладают не только внешние, но и внутрислоевые поверхности

пакетов. Гидратация указанных поверхностей, а также диссоциация и гидратация обменных катионов являются причинами связывания воды бентонитами.

Суммарное содержание катионов на поверхности частиц монтмориллонита называется *емкостью обменных катионов*. Поскольку эта величина весьма мала, ее выражают в особых единицах – миллиграмм-эквивалентах (мг-экв) в расчете на 100 г сухого материала.

Если в обменном комплексе преобладают одновалентные катионы щелочных металлов Na^+ и K^+ , то такой бентонит называется *натриевым*. Если же в обменном комплексе преобладают двухвалентные катионы щелочно-земельных металлов Ca^+ и Mg^+ , то такой бентонит называется *кальциевым*. По связующим свойствам лучшим из них является натриевый бентонит.

Натриевый бентонит обладает хорошими связующими свойствами и обеспечивает высокую сырую, сухую и горячую прочность формовочной смеси. Это позволяет вводить в смесь меньшее количество связующего и воды, а следовательно, и уменьшить газотворную способность смеси. В свою очередь, пониженная газотворность смесей на основе натриевого бентонита дает возможность использовать в их составе пески с более мелким размером зерна, что положительно сказывается на чистоте поверхности отливок.

Наряду с высокими связующими свойствами бентонит обладает способностью сильно набухать в присутствии воды. Это свойство обуславливает пониженную текучесть и затрудненную выбиваемость смесей. Кроме того, максимальное использование прочностных свойств натриевого бентонита требует более длительного перемешивания формовочной смеси, чем при использовании других типов связующего.

Марка бентонитовых глин включает в себя:

буквенное обозначение прочности при сжатии во влажном состоянии: П – прочная, С – среднепрочная, М – малопрочная;

цифровое – предела прочности при разрыве в зоне конденсации влаги: 1 – высокосвязующая, 2 – связующая, 3 – среднесвязующая, 4 – малосвязующая;

буквенное с индексом – термической устойчивости: Т₁ – высокостойчивая, Т₂ – среднеустойчивая, Т₃ – низкоустойчивая (табл. 2.2).

В составах ПГС, используемых для получения крупных чугунных и стальных отливок, применяют формовочные огнеупорные

глины, основным породообразующим минералом которых является каолинит, имеющий химическую формулу $Al_2 \cdot 2SiO_2 \cdot H_2O$.

Таблица 2.2
Физико-механические показатели бентонитовых глин

Марка	Предел прочности при сжатии, Па ($кгс/см^2$), не менее	Предел прочности при разрыве в зоне конденсации влаги, Па ($кгс/см^2$), не менее	Термическая устойчивость, единицы, не менее
П1Т ₁	$8,826 \cdot 10^4$ (0,9)	$0,275 \cdot 10^4$ (0,028)	0,6
П1Т ₂	$8,826 \cdot 10^4$ (0,9)	$0,275 \cdot 10^4$ (0,028)	0,3
П1Т ₃	$8,826 \cdot 10^4$ (0,9)	$0,275 \cdot 10^4$ (0,028)	–
П2Т ₁	$8,826 \cdot 10^4$ (0,9)	$0,196 \cdot 10^4$ (0,020)	0,6
П2Т ₂	$8,826 \cdot 10^4$ (0,9)	$0,196 \cdot 10^4$ (0,020)	0,3
П2Т ₃	$8,826 \cdot 10^4$ (0,9)	$0,196 \cdot 10^4$ (0,020)	–
П3Т ₁	$8,826 \cdot 10^4$ (0,9)	$0,147 \cdot 10^4$ (0,015)	0,6
П3Т ₂	$8,826 \cdot 10^4$ (0,9)	$0,147 \cdot 10^4$ (0,015)	0,3
П3Т ₃	$8,826 \cdot 10^4$ (0,9)	$0,147 \cdot 10^4$ (0,015)	–
П4Т ₁	$8,826 \cdot 10^4$ (0,9)	–	0,6
П4Т ₂	$8,826 \cdot 10^4$ (0,9)	–	0,3
П4Т ₃	$8,826 \cdot 10^4$ (0,9)	–	–
С1Т ₁	$6,865 \cdot 10^4$ (0,7)	$0,275 \cdot 10^4$ (0,028)	0,6
С1Т ₂	$6,865 \cdot 10^4$ (0,7)	$0,275 \cdot 10^4$ (0,028)	0,3
С1Т ₃	$6,865 \cdot 10^4$ (0,7)	$0,275 \cdot 10^4$ (0,028)	–
С2Т ₁	$6,865 \cdot 10^4$ (0,7)	$0,196 \cdot 10^4$ (0,020)	0,6
С2Т ₂	$6,865 \cdot 10^4$ (0,7)	$0,196 \cdot 10^4$ (0,020)	0,3
С2Т ₃	$6,865 \cdot 10^4$ (0,7)	$0,196 \cdot 10^4$ (0,020)	–
С3Т ₁	$6,865 \cdot 10^4$ (0,7)	$0,147 \cdot 10^4$ (0,015)	0,6
С3Т ₂	$6,865 \cdot 10^4$ (0,7)	$0,147 \cdot 10^4$ (0,015)	0,3
С3Т ₃	$6,865 \cdot 10^4$ (0,7)	$0,147 \cdot 10^4$ (0,015)	–
С4Т ₁	$6,865 \cdot 10^4$ (0,7)	–	0,6
С4Т ₂	$6,865 \cdot 10^4$ (0,7)	–	0,3
С4Т ₃	$6,865 \cdot 10^4$ (0,7)	–	–
М1Т ₁	$4,903 \cdot 10^4$ (0,5)	$0,275 \cdot 10^4$ (0,028)	0,6
М1Т ₂	$4,903 \cdot 10^4$ (0,5)	$0,275 \cdot 10^4$ (0,028)	0,3
М1Т ₃	$4,903 \cdot 10^4$ (0,5)	$0,275 \cdot 10^4$ (0,028)	–
М2Т ₁	$4,903 \cdot 10^4$ (0,5)	$0,196 \cdot 10^4$ (0,020)	0,6
М2Т ₂	$4,903 \cdot 10^4$ (0,5)	$0,196 \cdot 10^4$ (0,020)	0,3
М2Т ₃	$4,903 \cdot 10^4$ (0,5)	$0,196 \cdot 10^4$ (0,020)	–
М3Т ₁	$4,903 \cdot 10^4$ (0,5)	$0,147 \cdot 10^4$ (0,015)	0,6

Окончание табл. 2.2

Марка	Предел прочности при сжатии, Па (кгс/см ²), не менее	Предел прочности при разрыве в зоне конденсации влаги, Па (кгс/см ²), не менее	Термическая устойчивость, единицы, не менее
МЗТ ₂	4,903·10 ⁴ (0,5)	0,147·10 ⁴ (0,015)	0,3
МЗТ ₃	4,903·10 ⁴ (0,5)	0,147·10 ⁴ (0,015)	–
М4Т ₁	4,903·10 ⁴ (0,5)	–	0,6
М4Т ₂	4,903·10 ⁴ (0,5)	–	0,3
М4Т ₃	4,903·10 ⁴ (0,5)	–	–

Кристаллическая решетка минерала каолинита (см. рис. 2.1, в) состоит из двух слоев: алюмогидроксильного и кремнекислородного, образующих пакет. Ввиду того, что отдельные пакеты каолиновой глины соприкасаются плоскостями различных атомов (кислорода и гидроксидов), они образуют достаточно прочную водородную связь. При увлажнении каолиновой глины такие пакеты плохо расщепляются и слабо набухают. Это объясняется тем, что межпакетное расстояние каолиновой глины составляет около $2 \cdot 10^{-10}$ м, а радиус молекулы воды – $1,45 \cdot 10^{-10}$ м, вследствие чего проникновение воды в межпакетный зазор затруднительно.

Формовочные огнеупорные глины должны соответствовать требованиям ГОСТ 3226–93 и техническим условиям на глины конкретных месторождений (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Физико-механические показатели каолиновых глин

Марка	Предел прочности при сжатии, кПа, не менее	
	во влажном состоянии	в сухом состоянии
П1	50	350
П2	50	250
П2	50	150
С1	35	350
С2	35	250
С3	35	150
М1	20	350
М2	20	250
М3	20	150

Марка каолининовой глины включает в себя:

буквенное обозначение прочности при сжатии во влажном состоянии: П – прочная, С – среднечпрочная, М – малочпрочная;

цифровое – предел прочности при сжатии в сухом состоянии:

1 – высокосвязующая, 2 – среднесвязующая, 3 – малосвязующая.

Порядок выполнения работы

Каждая группа студентов исследует по два образца бентонитового порошка и изучает $\sigma_{сж}$, $\sigma_{к}$, Т и два образца огнеупорной глины, определяя $\sigma_{сж}$ в сыром и сухом состоянии.

Определение марки бентонитовой глины

Приготовить 2 кг смеси, состоящей из 95 частей песка и 5 частей бентонитовой глины, перемешивая ее в течение 2 мин в лабораторном катковом смесителе. Затем добавить 50 мл воды и перемешать увлажненную смесь в течение 10 мин.

Из приготовленной смеси изготовить три образца в цилиндрической гильзе размером 50 × 50 мм, на лабораторном копке трехкратным ударом, испытать их на приборе для определения прочности и определить среднеарифметическое значение трех испытаний.

В специальной металлической гильзе с отрывным кольцом на лабораторном копке изготовить три образца размером 50 × 50 мм и испытать их на приборе для определения прочности при разрыве в зоне конденсации влаги, определить среднеарифметическое значение трех испытаний.

Определить термическую устойчивость бентонита, для чего навеску глины массой по 200 г поместить в выпарительную чашу, которую установить в предварительно нагретую до температуры 550 °С муфельную печь и прокалить в течение часа. После прокаливания чашу с глиной поместить в эксикатор и выдержать до комнатной температуры. Приготовить два состава смесей по 2 кг с исходной и прокаленной глиной, после чего изготовить сырые образцы и испытать их прочность при сжатии.

Рассчитать термическую устойчивость по формуле

$$T = \frac{\sigma_1}{\sigma_2},$$

где σ_1 – предел прочности при сжатии во влажном состоянии с прокаленной глиной, МПа;

σ_2 – предел прочности при сжатии во влажном состоянии с исходной глиной, МПа.

По результатам испытаний определить марку бентонитовой глины по табл. 2.3.

Определение марки каолиновой глины

Приготовить 2 кг смеси, состоящей из 95 частей песка и 5 частей каолиновой глины, перемешать ее в течение 2 мин в лабораторном катковом смесителе. Затем добавить 50 мл воды и перемешать увлажненную смесь в течение 10 мин.

Из приготовленной смеси на лабораторном копре изготовить шесть стандартных цилиндрических образцов трехкратным ударом груза. Три образца испытать на приборе для определения прочности в сыром состоянии и рассчитать среднеарифметическое значение трех испытаний.

Три образца поместить в предварительно нагретый до 180 °С сушильный шкаф и выдержать их в течение 1,5 ч. Образцы извлечь из сушильного шкафа, охладить на воздухе до комнатной температуры и определить прочность при сжатии в сухом состоянии. Рассчитать среднеарифметическое значение трех испытаний.

По результатам испытаний определить марку каолиновой глины согласно табл. 2.3.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Методика проведения работы.
5. Результаты работы.
6. Выводы.

Вопросы для самопроверки

1. Разновидности формовочных глин.
2. Как маркируются глины?
3. Механизм формирования вяжущих свойств формовочных глин.
4. Методика определения марки глины.
5. Схемы кристаллических решеток глинистых минералов.

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕНИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМЕСИ

Цель работы: экспериментально установить зависимость технологических свойств смеси от режима смесеприготовления.

Приборы и материалы: катковый смеситель, прибор для определения прочности на сжатие в сыром состоянии; копер лабораторный; гильза для изготовления стандартных цилиндрических образцов; весы лабораторные; песок кварцевый; бентонитовая глина; вода с рН = 6,0–7,0.

Общие сведения

Процесс приготовления смесей для разовых форм и стержней заключается в смешивании твердых (наполнитель, порошкообразные добавки) и жидких (связующее, растворитель) составляющих. При перемешивании составляющих смеси на поверхностях частиц наполнителя образуются пленки связующего, объединяющие между собой смежные зерна. Связывание разрозненных зерен наполнителя в единую систему (смесь) обусловлено возникновением сил сцепления между поверхностью зерен и пленкой связующего (адгезией), а также наличием сил связи между частицами самого связующего вещества (когезией).

Применительно к условиям приготовления формовочных и стержневых смесей процесс смесеприготовления может быть условно разделен на собственно перемешивание, обволакивание и активацию, которые в зависимости от режима совершаются последовательно или одновременно.

Смесеобразованию обычно сопутствуют весьма важные в технологическом отношении физико-химические явления. Так, при смешивании кварцевого песка с водой ее молекулы ориентируются определенным образом по отношению к ионам, расположенным на поверхности зерен кварца, покрывая их слоем «жесткой» воды и образуя водородные связи. При сближении увлажненных зерен водные оболочки вступают в электростатическое взаимодействие, связывая между собой эти зерна.

Еще более сложные процессы происходят при взаимодействии наполнителя и многокомпонентных связующих (бентонитовых, смоляных, жидкостекольных и др.). В идеальном случае при смешивании каждое зерно наполнителя должно быть окружено оболочкой связующего.

В общем случае приготовление формовочной смеси представляет собой процесс образования термодинамически устойчивой скелетной системы коагуляционного типа. При неизменном составе и отсутствии химических взаимодействий она обратима по прочности, т. е. может многократно разрушаться и восстанавливаться. Таким образом, процесс перемешивания – это непрерывное разрушение коагуляционных контактов, сопровождающееся ростом межфазной поверхности раздела «связующее–наполнитель» за счет более равномерного распределения связующего по объему смеси и более полного обволакивания зерен наполнителя. Важным элементом смесеприготовления является порядок ввода составляющих смеси.

Первым после наполнителя вводится твердый порошкообразный материал (глина, отвердитель, специальные добавки). При смешивании этот материал вследствие возникновения поверхностного электростатического заряда (трибоэффекта) равномерно распределяется по поверхности наполнителя при минимальных энергозатратах.

Вторым вводится жидкое связующее. Если оно состоит из нескольких компонентов, то первым вводится материал, обладающий меньшим краевым углом смачивания. Последующее распределение в смеси вещества с большим краевым углом смачивания потребует меньших энергозатрат, поскольку происходит по слою жидкости, функционирующему как смазка.

Важными технологическими факторами, определяющими как эффективность процесса смесеприготовления, так и качество смеси, являются содержание в ней связующего материала и длительность перемешивания компонентов. Говоря об оптимальной длительности перемешивания компонентов, следует иметь в виду, что максимально высокие свойства смесь приобретает только в период равномерного распределения пленки связующего по поверхности зерен наполнителя, т. е. в этот период все контакты зерен огнеупорного наполнителя смеси имеют пленку связующего материала.

Увеличение продолжительности смешивания сверх оптимальной приводит к тому, что получаемая системой энергия начинает расхо-

доваться не на формирование требуемой структуры смеси, а на удаление воды или растворителя из пленки связующего. Это приводит к появлению в связующей системе внутренних напряжений, ослабляющих когезионные и адгезионные связи и, как следствие, к падению прочности и других физико-механических свойств приготавливаемых смесей.

Порядок выполнения работы

Приготовить 1 кг смеси, состоящей из 95 частей кварцевого песка и 5 частей бентонитовой глины, перемешать смесь в течение 2 мин в лабораторном катковом смесителе. Затем добавить 30 мл воды и перемешать смесь в течение 10 мин.

Из приготовленного состава отобрать смесь для изготовления трех стандартных цилиндрических образцов (50 × 50) на лабораторном копре трехкратным ударом груза, испытать на приборе для определения газопроницаемости не извлекая образец из гильзы, после чего извлечь образец из гильзы и испытать его прочность на сжатие.

Смесь от разрушенных образцов снова загрузить в бегуны и перемешивать в течение 10 мин. Операции приготовления смеси и образцов, а также определение ее свойств повторять через каждые 10 мин до тех пор, пока прочность образцов не начнет снижаться.

Определить среднеарифметическое значение испытаний образцов после каждого времени перемешивания и свести их в таблицу. По полученным в работе данным построить график: по оси ординат отложить значения прочности на сжатие и газопроницаемости, а оси абсцисс – время перемешивания.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Методика проведения работы.
5. Результаты работы.
6. Выводы.

Вопросы для самопроверки

1. Что входит в состав формовочных смесей?
2. В чем заключается процесс приготовления смесей?
3. Как распределяется связующее на поверхности огнеупорного наполнителя?
4. Перечислите факторы, оказывающие влияние на качество смеси.
5. Объясните, почему зависимость прочности от времени перемешивания имеет экстремальный характер.
6. В каком порядке вводятся компоненты в смеситель?
7. Как газопроницаемость зависит от времени перемешивания?

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕКУЧЕСТИ ФОРМОВОЧНЫХ И СТЕРЖНЕВЫХ СМЕСЕЙ

Цель работы: ознакомление с методами определения текучести формовочных и стержневых смесей в зависимости от их вида.

Приборы и материалы: прибор для определения текучести ЖСС с гильзой и основанием; весы с пределом взвешивания 500 г с погрешностью ± 10 мл; смеситель лабораторный лопастной; смеситель лабораторный для химически твердеющих смесей (ХТС); лабораторный миксер; прибор для определения формуемости; цилиндрическая гильза для стандартных образцов (50×50) с вкладышем; твердомер для сырых смесей; песок кварцевый (1-2)К₁₋₂О₁₋₂02; глина бентонитовая; смола фенолоформальдегидная; жидкое стекло; феррохромовый шлак; поверхностно-активное вещество (ПАВ).

Общие сведения

Текучесть характеризует внутреннее трение или сопротивление сдвигу смеси при ее деформации в направлении, перпендикулярном к направлению приложения нагрузки. Применительно к качеству уплотнения текучесть характеризует способность смеси уплотняться с максимальной степенью равномерности по всему объему формы или стержня.

Сопротивление сдвигу для связносыпучей среды приближенно описывается законом Кулона:

$$g_{\text{сд}} = p \operatorname{tg} \varphi + c,$$

где p – нормальное давление;

φ – угол внутреннего трения;

c – сцепление.

Угол внутреннего трения φ в большой степени связан с гранулометрией песка, формой зерен, т. е. со свойствами огнеупорного наполнителя, и для формовочных смесей находится в интервале $20\text{--}50^\circ$.

Значение сцепления c обусловлено силами адгезионно-когезионного взаимодействия зерен огнеупорного наполнителя,

покрытых пленкой связующего, т. е. зависит от свойств самого связующего (вязкости, поверхностного натяжения, адгезии к наполнителю, предельного напряжения сдвига). Сцепление оказывает наибольшее влияние на текучесть. Косвенно о текучести можно судить по прочности смеси во влажном состоянии. В зависимости от величины прочности во влажном состоянии формовочные и стержневые смеси подразделяются на пластичные, имеющие прочность свыше 0,007 МПа, сыпучие с прочностью до 0,007 МПа и жидкие, которые заполняют форму или полость стержневого ящика под действием гравитационных сил и практически не обладают начальной прочностью.

Для определения текучести пластичных смесей используется метод, основанный на определении соотношения твердости уплотненной смеси в точках *A* и *B* (рис. 4.1).

Текучесть смеси рассчитывается по формуле

$$T = \frac{H_A}{H_B} 100 \%, \quad (4.1)$$

где H_A , H_B – твердость образца в точках *A* и *B* соответственно.

Текучесть жидких самотвердеющих смесей (ЖСС) оценивают по диаметру расплыва определенного объема смеси. Для этого применяют металлическую гильзу высотой 150 мм и внутренним диаметром

100 мм, которая устанавливается в центр градуированного основания.

После заполнения гильзы исследуемой смесью избыток смеси снимается линейкой, после чего гильза резко поднимается, а смесь растекается по поверхности основания. Замеряются диаметры по двум перпендикулярным осям, затем находится средний диаметр, который характеризует текучесть смеси (рис. 4.2).

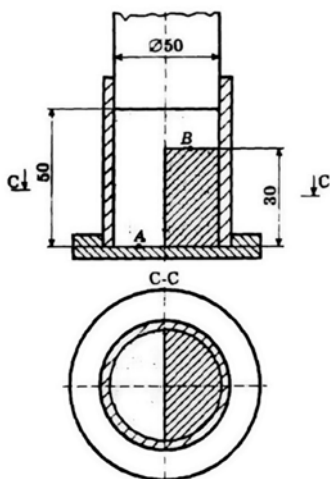


Рис. 4.1. Схема определения текучести смеси при статическом уплотнении

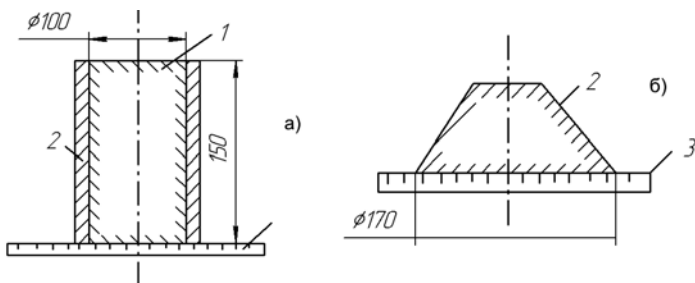


Рис. 4.2. Схема определения текучести ЖСС:
 а – начало испытаний; б – конец испытаний

Порядок выполнения работы

Определение текучести пластичных смесей

Приготовить 2 кг смеси, состоящей из 95 % кварцевого песка и пяти частей бентонитовой глины, перемешивая смесь в течение 2 мин в лабораторном катковом смесителе. Затем добавить 50 мл воды и перемешать увлажненную смесь в течение 10 мин.

Из приготовленной смеси в цилиндрической гильзе с вкладышем изготовить три образца на лабораторном копре трехкратным ступенчатым ударом. Установить гильзу на выталкиватель и твердомером замерить твердость на верхней площадке в точке *A*. Затем выдвинуть образец из гильзы на величину вкладыша, извлечь его и замерить твердость в точке *B*. Рассчитать среднеарифметическое значение твердости в точке *A* и точке *B*. По формуле (4.1) рассчитать значение текучести смеси.

Определение текучести ЖСС

Приготовить 2 кг смеси, состоящей из 95 % кварцевого песка (1-2)К₁₋₂О₁₋₂02, 5 % феррохромового шлака (ФХШ) и 7 % (сверх 100 %) жидкой композиции. В состав жидкой композиции входят 5 % жидкого стекла, 0,15 % ПАВ и вода до плотности композиции 1300 кг/м³.

Приготовление ЖСС производится в следующем порядке. В шнековый смеситель засыпается кварцевый песок и ФХШ, и перемешивание продолжается 2 мин. Затем готовится жидкая композиция, составляющие которой смешиваются на лабораторном миксере в течение 5 мин. Готовая жидкая композиция подается в смеситель до получения жидкой смеси.

Готовая смесь заливается в чистую гильзу, установленную в центр градуированного основания, а излишки смеси срезаются металлической линейкой. Гильза с основанием устанавливается на прибор для определения текучести ЖСС и включается кнопкой подъема гильзы. После подъема гильзы определяется диаметр расплава смеси по делениям на градуированном основании.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Методика проведения работы.
5. Результаты работы.
6. Выводы.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое текучесть смеси?
2. Как определяется сопротивление сдвигу и от чего оно зависит?
3. Как подразделяются смеси по прочности во влажном состоянии?
4. Каков порядок определения текучесть пластичных смесей?
5. В каком порядке вводятся компоненты в смеситель при изготовлении ЖСС?
6. Как определяется текучесть ЖСС?

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОТИВОПРИГАРНЫХ ПОКРЫТИЙ

Цель работы: изучить влияние состава противопригарных покрытий на их технологические свойства.

Приборы и материалы: лабораторный миксер; весы с пределом взвешивания 500 г с погрешностью ± 100 мг; прибор для определения прочности красочного слоя на истирание; вискозиметр ВЗ-4; набор денсиметров; мерный цилиндр емкостью 200 мл; химический стакан емкостью 1 л; шкаф сушильный с терморегулятором; пластины кварцевые; микрометр 0-25 мм; секундомер; огнеупорные наполнители; связующие, стабилизаторы, растворители.

Общие сведения

Одним из самых распространенных дефектов поверхности отливок является пригар, удаление которого значительно увеличивает трудоемкость операций обрубки и очистки. Пригар представляет собой продукт физико-химического взаимодействия на границе раздела расплавленного металла и материала формы, плотно удерживаемый на поверхности отливки и состоящий из зерен формовочного материала и цементирующего вещества. В зависимости от природы цементирующего вещества различают три вида пригара:

- 1) механический, в котором цементирующим веществом является металл, проникший в поры формы;
- 2) химический, в котором цементирующим веществом являются продукты взаимодействия оксидов металла и оксидов формовочных материалов;
- 3) термический, в котором цементирующим веществом являются легкоплавкие составляющие формовочных материалов.

Подобное разделение пригара является весьма условным, так как в реальных производственных условиях в пригарной корке всегда наблюдаются признаки всех вышеперечисленных видов.

Механический пригар образуется вследствие проникновения расплавленного металла в поры формы. Механизм образования данного вида пригара можно представить следующим образом.

Поступая в форму, жидкий металл соприкасается со стенками формы и охлаждается, в результате чего на поверхности отливки образуется затвердевшая корочка, толщина которой зависит от температуры заливаемого металла, температуры и теплоаккумулирующей способности формы и некоторых других факторов. Если отливка тонкостенная, то количество теплоты, выделяющейся при кристаллизации отливки, недостаточно для того, чтобы вновь расплавить первоначально образовавшуюся корку и обеспечить более длительный контакт жидкого металла со стенками формы. В этих условиях механический пригар образоваться не может. Если же в аналогичных условиях заливают толстостенную отливку, то под действием теплоты затвердевающей отливки образовавшаяся вначале корка вновь расплавляется и жидкий металл входит в контакт со стенками формы. Когда прилегающие к отливке слои формы нагреваются до температуры ликвидуса заливаемого сплава, проникновение неокисленного металла при определенных условиях становится возможным, что приводит к образованию механического пригара.

Химический пригар возникает в результате химического взаимодействия отливки и материалов литейной формы. Процесс образования химического пригара условно разделяется на три этапа: окисление поверхности металла, смачивание поверхности формы оксидами металла, образование соединений между оксидами металла и оксидами формы (образование промежуточного соединения пригарного слоя).

Термический пригар возникает вследствие оплавления материала формы под воздействием теплоты заливаемого металла и на поверхности отливки представляет собой спекшуюся массу формовочной или стержневой смеси.

Одним из средств предотвращения образования всех видов пригара на поверхности отливок является противопригарное покрытие – краска, которая наносится на формообразующую поверхность формы или стержня, препятствуя взаимодействию жидкого металла с материалом формы. В состав противопригарных красок входят огнеупорный наполнитель, связующий материал, стабилизатор и антисептическое вещество.

Огнеупорный наполнитель должен отвечать следующим требованиям: достаточно высокая огнеупорность, неспособность смачиваться расплавом, химическая устойчивость при высоких температурах,

инертность к расплаву и его оксидам и высокая дисперсность. В качестве огнеупорных наполнителей могут использоваться углеродные, минеральные и комплексные материалы. Из углеродистых материалов применяют графит аморфный и кристаллический, древесный и каменный уголь, кокс. Из минеральных наполнителей – тальк, пиррофиллит, хромит, хромомагнезит, шамот, маршалит, магнезит, циркон, дистен-силиманит, корунд и некоторые другие. Комплексные наполнители – это композиционные материалы, содержащие минеральные и углеродистые составляющие, такие как тальк с графитом или коксом, пиррофиллит с графитом и др.

Использование в составах противопригарных красок того или иного наполнителя зависит в первую очередь от вида сплава, заливаемого в форму, и его температуры плавления. Для чугунов применяют углеродистые и комплексные материалы. Для углеродистых и легированных сталей, магнитных сплавов – минеральные наполнители средней и высокой огнеупорности. Для алюминиевых сплавов – углеродистые и огнеупорные минеральные и комплексные наполнители.

Для обеспечения надежного сцепления красочного слоя с поверхностью формы или стержня в составах противопригарных красок используются связующие материалы. В качестве связующих компонентов применяют материалы органического происхождения (декстрин, ПВА, лигносульфонаты, фурановые смолы и др.), которые обеспечивают получение эластичных пленок при формировании противопригарных покрытий. Однако общим недостатком связующих этого класса является низкая термостойкость (до 500 °С), что ограничивает их использование при изготовлении крупных чугунных и, особенно, стальных отливок. Поэтому когда необходима повышенная термостойкость противопригарного покрытия, в качестве связующего следует применять неорганические или органоминеральные (кремнийорганические) пленкообразующие вещества.

Растворители противопригарных покрытий предназначены для создания дисперсной среды, в зависимости от вида которой все краски подразделяются на водные (растворитель – вода), требующие сушки, и самовысыхающие (органические растворители – ацетон, спирт, бензин и др.), твердение которых происходит за счет быстрого испарения растворителя.

С целью равномерного распределения огнеупорного наполнителя по всему объему в состав противопопригарных красок в обязательном порядке вводятся стабилизаторы – материалы, способные образовывать пространственную структуру в дисперсной среде. В качестве стабилизатора используют бентонитовую глину, карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ), полиакриламид, крахмалит, поливиниловый спирт и др.

Для предотвращения протекания микробиологических процессов в водных красках с органическими связующими материалами в их состав вводятся добавки – антисептики. В качестве такой добавки обычно используется формалин.

Порядок выполнения работы

Приготовить противопопригарную краску, состоящую из 40 % (по массе) дистен-силлиманита, 2 % бентонита, 6 % ПВА и 52 % воды. Порядок приготовления: в стеклянный стакан залить 260 мл воды и 30 г ПВА, поставить его в миксер и перемешивать в течение 2 мин. Затем при включенном миксере постепенно добавить 10 г глины и 200 г дистен-силлиманита. Время перемешивания 10 мин. Объем краски 450–500 мл.

Определить плотность краски с помощью денсиметров. Для этого приготовленную краску налить в стеклянный цилиндрический сосуд и опустить в него денсиметр так, чтобы он не касался стенок сосуда. По делениям денсиметра определить величину плотности.

Вискозиметром ВЗ-4 определить условную вязкость противопопригарного покрытия. Для этого плотно закрыть выходное отверстие вискозиметра и заполнить его емкость краской. Открыть выходное отверстие вискозиметра и с помощью секундомера определить время истечения исследуемого материала из вискозиметра. За условную вязкость принимают время истечения краски сплошной струей.

Для определения прочности красочного слоя к истиранию на кварцевую пластину нанести исследуемую краску путем наливания ее на поверхность пластины, расположенной под углом 45° к горизонту. Пластины с нанесенным красочным слоем поместить в сушильный шкаф и сушить при температуре 105–110 °С до полного высыхания красочного слоя. После охлаждения пластины с покрытием микрометром замерить толщину пластин с покрытием и толщину самой пластины. Рассчитать толщину красочного слоя.

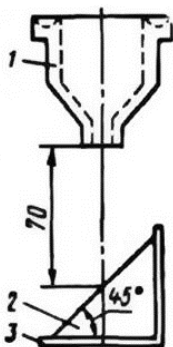


Рис. 5.1. Схема определения прочности противопригарных покрытий к истиранию

Установить пластину с нанесенным покрытием на подставку 3 прибора для определения прочности красочного слоя к истиранию (рис. 5.1) так, чтобы расстояние от выходного отверстия сопла воронки 1 до пластины 2 было 70 мм. Открыть сопло воронки, через которое песок фракцией 02 осыпается на пластину с покрытием до тех пор, пока покрытие в месте удара песка сотрется до стекла (диаметр прорыва – 2,0–2,5 мм), после чего закрыть сопло пробкой.

Весь прошедший через сопло песок взвешивают и по формуле

$$\Pi = \frac{m}{h}, \text{ кг/мм,}$$

где m – масса песка, прошедшего через сопло, кг;

h – толщина красочного слоя, мм,

рассчитывают значение прочности красочного слоя к истиранию.

Седиментационную устойчивость краски определяют через 1 и 4 ч после приготовления, для чего ее наливают в мерный цилиндр (200 мл) и оставляют в покое на указанное время. По истечении времени измеряют отстоявшийся слой растворителя, который и будет мерой седиментационной устойчивости.

Результаты работы заносят в таблицу.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Методика проведения работы.
5. Результаты работы.
6. Выводы.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое пригар?
2. Какие виды пригара могут образовываться на поверхности отливок?
3. Механизмы образования пригара.
4. Меры предотвращения образования пригара.
5. Что входит в состав противопригарных красок?
6. Каким свойствам должен отвечать огнеупорный наполнитель?
7. Разновидность огнеупорных наполнителей.
8. Роль связующего материала в краске и его разновидности.
9. Свойства краски и методика их определения.

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФОРМОВОЧНОЙ СМЕСИ

Цель работы: экспериментальное определение зависимости основных технологических свойств песчано-глинистой формовочной смеси от ее влагосодержания.

Приборы и материалы: лабораторные бегуны, лабораторный копер, прибор для определения влажности, прибор для определения прочности, прибор для определения газопроницаемости, твердомер для сырых образцов, гильза с вкладышем для изготовления ступенчатого стандартного образца, прибор для определения осыпаемости, кварцевый песок, глина бентонитовая, весы лабораторные с пределом взвешивания 1 кг и погрешностью ± 500 мг.

Общие сведения

Одним из важнейших факторов, обеспечивающих получение качественных отливок, является приготовление стабильной формовочной смеси, имеющей требуемый уровень физико-механических и технологических свойств. Добиться этого можно только при условии правильного выбора исходных компонентов смеси и оптимального их соотношения, рационального использования эффективных методов подготовки и приготовления смеси, высокого уровня автоматизации и непрерывного оперативного контроля качества смеси на всех этапах ее подготовки и приготовления.

Более 70 % отливок в литейном производстве изготавливается с применением песчано-глинистых формовочных смесей (ПГС). Свойства этих смесей практически полностью определяются характеристиками и соотношением трех основных компонентов: наполнителя (как правило кварцевого песка), формовочной глины (бентонитовой или коалинитовой) и воды. Влажность ПГС при заданном составе является параметром, определяющим важнейшие физико-механические и технологические свойства смеси (прочность, осыпаемость, газопроницаемость, текучесть, уплотняемость, формуемость и др.). При этом каждый состав формовочной смеси имеет

свой оптимальный диапазон влагосодержания, обеспечивающий наилучшее сочетание свойств смеси: максимальную прочность, низкую осыпаемость, высокую газопроницаемость при хорошей уплотняемости и удовлетворительной текучести.

Прочность при сжатии во влажном состоянии является одной из основных характеристик песчано-глинистых смесей, применяемых для изготовления сырых форм. На прочность во влажном состоянии наиболее существенно влияют минералогический состав глин, дисперсность глинистых частиц, емкость и состав обменного комплекса. Прочность ПГС во влажном состоянии обусловлена физическими и физико-химическими силами взаимодействия материала зерновой основы, глины и воды. Основой прочности смеси являются водородные связи, однако в формировании прочности также принимают участие силы поверхностного натяжения воды, капиллярные силы и силы межмолекулярного взаимодействия. Водородные связи возникают между атомами водорода и атомами наиболее электроотрицательных элементов, в частности кислорода. При наличии мощных водородных связей физические силы взаимодействия обычно отходят на второй план. Водородные связи возникают непосредственно между гидроксильрованными слоями частиц наполнителя, а также между ними и слоями атомов базальтных поверхностей глинистых частиц.

В процессе перемешивания и уплотнения смеси происходят разрыв одних водородных связей и образование других. Аналогично может быть представлено взаимодействие зерен диоксида кремния с монтмориллотитом или другим глинистым минералом. В сырых формах в смеси находятся свободные молекулы воды, и чем больше слоев таких молекул, тем меньше прочность смеси во влажном состоянии. Поэтому при приготовлении смесей для сырых форм важным является оптимальное соотношение глины и воды, неодинаковое для глин разной минералогической природы и различного гранулометрического состава. Это соотношение для каждой новой партии глин следует определять опытным путем. На рис. 6.1 приведены зависимости физико-механических свойств ПГС от ее влажности.

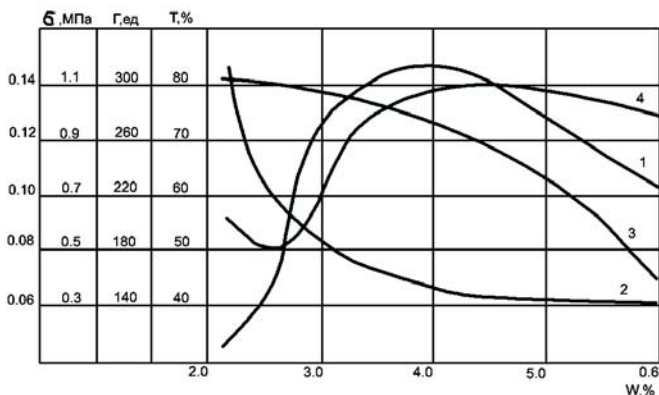


Рис. 6.1. Изменение физико-механических свойств смеси в зависимости от ее влажности: 1 – прочность смеси на сжатие; 2 – осыпаемость; 3 – газопроницаемость; 4 – текучесть

Как видно из рис. 6.1 (кривая 1), недостаток влаги обуславливает неэффективное использование глины, что не позволяет получить максимальную прочность смеси при данном глиносодержании. Увеличение содержания воды до 4 % позволяет полностью активизировать водородные связи, возникающие между слоями частиц наполнителя и слоями базальтных поверхностей глинистых частиц. Дальнейшее увеличение влажности (свыше 4 %) приводит к снижению прочности смеси из-за образования избытка слоев свободных молекул воды, которые снижают прочность водородных связей. Аналогичный эффект наблюдается и при изучении текучности ПГС (см. рис. 6.1, кривая 4).

Газопроницаемость формовочных смесей при увеличении их влажности снижается (см. рис.6.1, кривая 3).

Порядок выполнения работы

Приготовить 2 кг смеси, состоящей из 95 частей кварцевого песка и 5 частей бентонитовой глины, перемешивая их в течение 2 мин в лабораторном катковом смесителе. Затем добавить 80 мл воды и перемешивать увлажненную смесь в течение 10 мин.

Определить влажность полученной смеси, для чего подготовить навеску смеси $50 \pm 0,1$ г в специальной чаше и установить ее в при-

бор для определения влажности. Температура в приборе находится в пределах 105–110 °С. По истечении 30 мин чашку с навеской вынимают, охлаждают и взвешивают, затем опять помещают в прибор и высушивают в течение 15 мин до постоянной массы. Влажность смеси определяют формулой

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \%,$$

где m – масса навески, г;

m_2 – масса после высушивания, г.

Одновременно сушат три образца.

Из приготовленной смеси изготовить шесть образцов в цилиндрической гильзе диаметром 50 и высотой 50 ± 1 мм на лабораторном копре трехкратным ударом груза и не извлекая образцы из глины испытать их на газопроницаемость. После этого извлечь образцы из гильзы и три образца испытать на прочность при сжатии в сыром состоянии и три образца – на осыпаемость.

В цилиндрической гильзе с вкладышем изготовить три ступенчатых образца и определить текучесть смеси по методике, представленной в лабораторной работе № 4.

Повторить все испытания, приведенные выше, на смесях, содержащих 60 и 100 мл воды, при том же количестве кварцевого песка и бентонитовой глины.

По результатам работы построить графические зависимости влияния влажности смеси на прочность при сжатии в сыром состоянии, газопроницаемость, текучесть и осыпаемость.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Методика проведения работы.
5. Результаты работы.
6. Выводы.

Вопросы для самопроверки

1. Что входит в состав ПГС?
2. Перечислите основные физико-механические свойства формовочных смесей.
3. Как определяется влажность смесей?
4. Объясните изменение значений сырой прочности при различном содержании влаги.
5. Как изменяются газопроницаемость, текучесть, осыпаемость при увеличении содержания влаги в смеси?

Лабораторная работа № 7

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЛИЧЕСТВА ЖИДКОГО СТЕКЛА И ВРЕМЕНИ ПРОДУВКИ УГЛЕКИСЛЫМ ГАЗОМ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕКОЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Цель работы: экспериментальное определение зависимости предела прочности при растяжении образцов из жидкостекольных смесей, отверждаемых углекислым газом, от количества связующего материала в смеси и времени отверждения образцов.

Приборы и материалы: лабораторный смеситель, лабораторный копер; стержневые ящики для изготовления цилиндрических образцов и образцов на разрыв «восьмерок»; прибор для определения прочности; весы лабораторные с пределом взвешивания 500 г и погрешностью ± 10 мл; баллон с углекислым газом; оснащенный редуктором, шлангом и насадками; сухой кварцевый песок; жидкое стекло, вода.

Общие сведения

Жидкие стекла – это водные растворы щелочных силикатов, относящиеся к водорастворимым неорганическим связующим материалам, которые отличаются относительно низкой стоимостью, доступностью и хорошими экологическими показателями.

Жидкое стекло для литейного производства (ГОСТ 13079–81) получают из водорастворимых силикатов натрия «мокрым» или «сухим» способом. «Мокрый» способ заключается в том, что производство жидкого стекла осуществляется в автоклаве путем растворения материалов на основе кристаллического или аморфного кремнезема в водном растворе едкого натра при давлении пара 1,5–2,5 МПа. Этот процесс весьма длителен и имеет низкие технико-экономические показатели, в связи с чем применимость его в производстве жидкого стекла весьма ограничена.

Наиболее широко используется «сухой» способ производства жидкого стекла, осуществляемый в два этапа:

первый – производство силикат-глыбы, которое осуществляется на стекольных заводах путем сплавления при температуре 1300–1500 °С кварцевого песка с содой, сульфатом натрия и углем;

второй – автоклавное растворение силикат-глыбы в воде при давлении пара 0,4–0,8 МПа.

Получаемое таким способом натриевое жидкое стекло представляет собой коллоидный раствор силиката натрия $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$.

Кроме натриевого существует калиевое жидкое стекло, однако в литейном производстве оно не применяется.

Основным показателем жидкого стекла, который значительно влияет как на свойства жидкого стекла, так и свойства жидкостекольных смесей, является силикатный модуль, определяющий соотношение основных компонентов SiO_2 и Na_2O . Силикатный модуль определяется из выражения

$$m = \frac{\% \text{SiO}_2}{\% \text{Na}_2\text{O}} \cdot 1,0323,$$

где 1,0323 – отношение молекулярной массы оксида натрия к молекулярной массе диоксида кремния.

Известно, что по мере повышения силикатного модуля растет степень полимеризации кремнекислородных анионов, приводящая при равной плотности к повышению вязкости раствора и увеличению его реакционной способности.

Плотность жидкого стекла зависит от химического состава и общего количества растворенных в нем силикатных образований и должна находиться в пределах 1470–1520 кг/м³. При ее снижении в результате увеличения общей влажности смеси возрастает опасность образования в отливках газовых раковин, а при повышении затрудняется обволакивание зерен наполнителя.

В соответствии с ГОСТ 13078–81 различают три марки содового жидкого стекла (*A*, *B* и *B* с силикатным модулем соответственно 2,31–2,6; 2,61–3,0; 3,01–3,5) и две марки содово-сульфатного (*A* и *B* с силикатным модулем соответственно 2,31–2,6 и 2,61–3,0) жидкого стекла.

Уровень силикатного модуля жидкого стекла целесообразно выбирать в зависимости от назначения смеси:

для крупных форм и стержней с многосуточным циклом производства $m = 2,0\text{--}2,3$;

для форм и стержней с циклом производства 1–2 суток $m = 2,31\text{--}2,6$; для небольших форм и стержней в крупносерийном и массовой производстве $m = 2,61\text{--}3,0$.

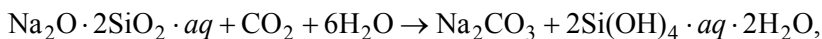
В летний период при повышении температуры воздуха и исходных материалов до 30–32 °С живучесть смеси резко падает. В таких случаях рекомендуется работать с жидким стеклом, имеющим пониженный модуль, достигать которого можно добавлением в жидкое стекло 42–48%-го водного раствора NaOH.

Стержневые смеси с жидким стеклом, отверждаемые углекислым газом, содержат 4,5–5,0 % жидкого стекла ($m = 2,3\text{--}2,5$, $\rho = 1400\text{--}1420 \text{ кг/м}^3$), 0,4–0,8 % (10%-й раствор NaOH) и 3,0–4,0 % добавок для увеличения выбиваемости (сланцевые материалы и др.).

В формовочные смеси с силикатным связующим дополнительно вводят 4,0–5,0 % глинистого связующего материала для придания смеси сырой прочности.

Живучесть смеси для CO₂-процесса – обычно 3–4 ч, но лучшие результаты свойств достигаются при использовании смеси сразу же после ее приготовления, которое можно осуществлять практически в любых смесителях непрерывного или периодического действия.

Отверждение при взаимодействии углекислого газа и жидкого стекла проходит по реакции



в результате чего образуется твердый силикагель $2\text{Si}(\text{OH})_4 \cdot aq \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, связывающий зерна наполнителя и придающий стержням и формам сухую прочность.

Удельный расход CO₂ обычно составляет 0,5–1,5 дм³ на 1 г жидкого стекла.

Отверждение стержней осуществляется в контакте с оснасткой, а форм, как правило, – после извлечения модели.

Смеси, продутые углекислым газом, гигроскопичны, так как продукты отверждения – карбонаты (Na₂CO₃) и силикагель ($2\text{Si}(\text{OH})_4 \cdot aq \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) – гидрофильны и частично растворимы в воде. Поглощение влаги из воздуха при хранении готовых форм и стержней приводит к снижению их прочности.

Большим недостатком жидкостекольных смесей является затрудненная выбиваемость после их прогрева до высоких температур. Для улучшения выбиваемости применяют различные органические и минеральные доавки.

Каждая группа студентов приготавливает и изучает один номер смеси, приведенный в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Составы жидкостекольных смесей

№ п/п	Содержание кварцевого песка, %	Содержание жидкого стекла, %
1	96	4
2	95	5

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать компоненты на 2 кг смеси и приготовить смесь в лабораторном смесителе. Продолжительность перемешивания 3 мин.

2. Приготовить девять образцов «восьмерок» для определения прочности при растяжении. Образцы изготавливаются в специальном разъемном стержневом ящике. Навеску смеси массой 110–120 г засыпают в сборный ящик и уплотняют с помощью лабораторного копра трехкратным ударом груза. Избыточный слой смеси, который не должен превышать 3 мм, срезают специальным ножом, установленном в ящике, без заглаживания.

3. Продуть по три образца углекислым газом в течение 15, 30 и 45 с. Для этого отрегулировать с помощью редуктора давления – газа в пределах 0,15–0,17 МПа и приложить насадку шланга к поверхности ящика.

4. Определить прочность образцов при растяжении, для чего установить образец в соответствующее приспособление прибора и разрушить. Результат испытания фиксируется прибором в мегапаскалях.

5. По окончании работы обменяться результатами исследования каждой группы и данные свести в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Результаты исследований

№ п/п	Содержание жидкого стекла, %	Время продувки CO ₂ , с		
		15	30	45
1	4			
2	5			

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Методика проведения работы.
5. Результаты работы.
6. Выводы.

Вопросы для самопроверки

1. Что представляет собой связующее – жидкое стекло?
2. Как получают жидкое стекло?
3. Что такое модуль жидкого стекла и как он определяется?
4. На какие физико-механические параметры жидкостекольных смесей влияет модуль?
5. Какие марки жидкого стекла используются в литейных цехах?
6. Как выбирается необходимый модуль жидкого стекла?
7. Что входит в состав смеси для CO_2 -процесса?
8. Что происходит с жидкостекольным связующим при продувке смеси углекислым газом?
9. Преимущества и недостатки жидкостекольных смесей.

Лабораторная работа № 8

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ЖИДКИХ САМОТВЕРДЕЮЩИХ СМЕСЕЙ

Цель работы: экспериментальное изучение технологии получения и свойств жидких самотвердеющих смесей (ЖСС) в зависимости от содержания исходных компонентов.

Приборы и материалы: лабораторный смеситель для приготовления ЖСС; миксер для приготовления жидкой композиции; стержневые ящики для изготовления стандартных образцов; прибор для определения прочности стандартных образцов, технические весы с пределом взвешивания 500 г и погрешностью ± 100 мг; сухой кварцевый песок марок (1-2)К₁₋₂О₁₋₂ (02–025); жидкое стекло плотностью 1450–1500 кг/м³ и модулем 2,4–2,6; феррохромовый шлак; ПАВ; вода; графит кристаллический; керосин.

Общие сведения

Большинство известных способов изготовления форм и стержней основано на применении принципа уплотнения смесей под действием приложения внешних нагрузок. Совершенно иные технологические решения заложены при использовании жидких самотвердеющих смесей, которые сочетают в себе свойства жидкости, позволяющей получать формы и стержни свободной заливкой, и способность затвердевать на воздухе в заданное время. Основные преимущества этой технологии следующие:

- резко уменьшается трудоемкость изготовления форм и стержней;
- производительность труда повышается в три–четыре раза;
- отпадает необходимость в длительной сушке форм и стержней;
- появляется возможность комплексно механизировать и автоматизировать изготовление форм и стержней в условиях индивидуального и мелкосерийного производства;
- прочность формируется по всему объему формы или стержня;
- повышается точность форм и стержней, что позволяет уменьшить припуски на механическую обработку отливок;
- в два–три раза увеличивается срок службы модельной оснастки;

– улучшаются санитарно-гигиенические условия труда на участках изготовления форм и стержней.

Составы жидких самотвердеющих смесей приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Составы ЖСС

Наименование компонента	Содержание компонентов, % в смеси		
	Облицовочная смесь	Наполнительная смесь	Стержневая смесь
Песок кварцевый (1-2)K ₍₁₋₂₎ O ₍₁₋₂₎ (02-025)	57,0–66,5	58,0–67,0	94,0–96,5
Регенерированный песок	30,0–37,0	30,0–37,0	–
Феррохромовый шлак	3,0–5,0	3,0–5,0	3,0–5,0
Добавка для улучшения выби- ваемости	0,5–1,0	–	0,5–1,0
Жидкая композиция (сверх 100 %)			
Жидкое стекло	6,0–7,0	4,0–5,0	7,5–8,5
10%-й раствор NaOH	0,2–0,3	0,2–0,3	0,2–0,3
ПАВ (РАС, КЧНР и др.)	0,05–0,1	0,005–0,1	0,05–0,1

В состав жидкой композиции вводится вода до плотности 1280–1320 кг/м³.

Свойства жидкости смесь приобретает в результате введения в ее состав поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Поверхностная активность ПАВ определяется особенностями молекулярного строения вещества. Для всех ПАВ типичной является резко выраженная асимметричность молекулярной структуры. Молекула состоит из двух значительно отличающихся по свойствам частей: полярной гидрофильной группы с большим молекулярным сродством к воде – на одном конце молекулы, и длинной неполярной углеводородной группы – на другом (рис. 8.1, а). Полярные группы молекул ПАВ чаще всего бывают представлены в виде –ОН, –NH₂, –СООН, SO₂ОН, SO₃Na и др. Такая особенность строения молекул ПАВ определяет и способность самопроизвольно адсорбироваться из растворов на различных поверхностях раздела жидких и газообразных фаз (рис. 8.1, б). Адсорбция ПАВ на границе раздела «жидкость–газ»

приводит к снижению поверхностного натяжения растворов и проявлению таких характерных свойств, как пенообразование (рис. 8.1, в).

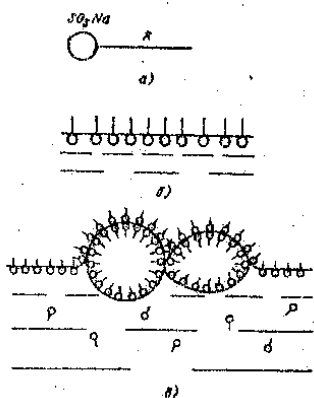


Рис. 8.1. Схема строения дифильной молекулы ПАВ (а), ориентации молекул ПАВ на поверхности воды (б) и образование пены (в)

Возникающие при перемешивании смеси пузырьки пены располагаются между зернами песка (рис. 8.2), разобочают их, снижая тем самым трение между песчинками и сводя до минимума влияние шероховатости поверхности наполнителя. Когда пространство между зернами наполнителя заполнится пузырьками пены, смесь становится жидкоподвижной и ее можно заливать в форму или стержневой ящик.

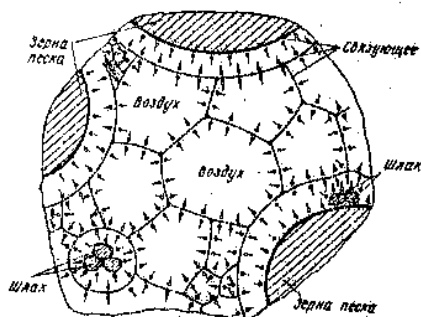


Рис. 8.2. Схема ориентации молекул ПАВ вокруг зерен песка, частиц шлака в жидкой смеси

После заливки ЖСС в форму или стержневой ящик по истечении некоторого времени происходит гашение пены и смеси твердеют на воздухе. При этом равномерно по всему объему постоянно увеличивается прочность. Отверждение происходит вследствие взаимодействия жидкого стекла и феррохромового шлака (ФХШ), содержащего в своем составе $\gamma 2\text{CaSiO}_2$, в результате чего образуется сложный гидросиликат $(\text{Na}_2\text{O})_m \cdot (\text{CaO})_n \cdot (\text{SiO}_2)_p \cdot (\text{H}_2\text{O})_q$, являющийся основной структурообразующей фазой. Отличительная особенность ЖСС – высокая газопроницаемость, особенно после отверждения в течение 24 ч, когда из смеси полностью исчезает пена, а образованные пеной поры являются причиной высокой газопроницаемости смеси.

Свойства жидких самотвердеющих смесей представлены в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Свойства жидких самотвердеющих смесей

Параметр смеси	Время отверждения, ч	Физико-механические свойства ЖСС		
		облицовочной	наполнительной	стержневой
Текучесть, мм	–	120–125	105–110	130–135
Устойчивость пены, с	–	360–420	300–350	420–600
Влажность, %	–	4,5–5,0	5,0–5,6	5,0–5,6
Прочность на сжатие, МПа	1	0,09–0,12	0,03–0,05	0,15–0,20
	3	0,25–0,30	0,13–0,15	0,35–0,45
	24	0,45–0,60	0,30–0,35	0,60–1,20
Газопроницаемость, ед.	1	150–200	100–120	200–250
	3	200–230	180–200	300–350
	24	300–340	300–340	400–450
Работа выбивки после проковки при температуре 800 °С, Дж	–	30–45	30–35	40–60

Подвижность ЖСС характеризуется текучестью, которая зависит от эффективности процесса пенообразования при перемешивании смеси. Поэтому конструктивные особенности агрегатов для приготовления смеси должны обеспечивать не только хорошее перемешивание, но и достаточно интенсивное вовлечение в смесь воздуха. Этим условиям в наибольшей степени отвечают лопастные смесители периодического или непрерывного действия.

Порядок приготовления ЖСС следующий: вначале перемешиваются сухие компоненты – песок и ФХШ в течение 60–80 с, затем в смеситель подается жидкая композиция, которая приготавливается в специальной мешалке с непрерывным перемешиванием и после приобретения смесью подвижности смесь заливается в форму или стержневой ящик.

Порядок выполнения работы

Приготовить 3 кг смеси, состав которой приведен в табл. 8.3 и назначается преподавателем. Порядок приготовления смеси следующий: в смеситель загружаются песок и ФХШ и перемешиваются в течение 60 с, затем вводится предварительно приготовленная на миксере жидкая композиция и процесс перемешивания продолжается в течение 120–180 с до получения жидкоподвижной смеси.

Таблица 8.3

Составы ЖСС

№ смеси	Кварцевый песок	Феррохромовый шлак	Жидкое стекло*	ПАВ*	Вода*
1	95	5	4	0,15	2,0
2	95	5	6	0,15	2,0
3	95	5	8	0,15	2,0

Приготовленную смесь заливают в стержневые ящики, предварительно покрытые разделительным покрытием.

Каждая группа студентов приготавливает один состав смеси, приведенный в табл. 8.3.

Образцы для испытания физико-механических составов выдерживать в стержневых ящиках в течение 1200 с и после истечения требуемого времени (1, 3, 24 ч) испытывать на прочность и газопроницаемость.

Результаты испытаний занести в табл. 8.4 и построить графическую зависимость влияния состава смеси на прочность и газопроницаемость.

* Компоненты берутся сверх 100 % и вводятся в смесь песка и ФХШ в виде предварительно приготовленной жидкой композиции.

Таблица 8.4

Результаты испытаний

№ смеси	Время твердения, ч					
	1	2	24	1	3	24
	Прочность, МПа			Газопроницаемость, ед.		
1						
2						
3						

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Методика проведения работы.
5. Результаты работы.
6. Выводы.

Вопросы для самопроверки

1. Преимущества ЖСС в сравнении с ПГС.
2. Особенности строения ПАВ.
3. Почему ЖСС приобретает свойства жидкости?
4. Что входит в состав ЖСС?
5. Как определяется текучесть ЖСС?
6. Как влияет количество жидкого стекла в ЖСС на прочность и газопроницаемость?

Лабораторная работа № 9

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ В НАГРЕВАЕМОЙ ОСНАСТКЕ

Цель работы: изучить технологический процесс изготовления стержней в нагреваемой оснастке.

Приборы и материалы: лопастной смеситель; прибор для изготовления образцов в нагреваемой оснастке; прибор для определения прочности на разрыв; весы лабораторные с пределом взвешивания 500 г с погрешностью ± 100 мл; набор посуды для жидких и сыпучих компонентов; компрессор; сухой кварцевый песок марок (1-2)К₁₋₂О₁₋₂ (02-025); фенолоспирт.

Общие сведения

В массовом и крупносерийном производстве стержней I–III групп сложности для отливок из различных сплавов используется Hot-box-процесс.

Принципиальной особенностью этого процесса является отверждение стержней и приобретение ими высоких технологических свойств в течение 1–5 мин непосредственно в стержневом ящике. Сущность процесса заключается в том, что нагретый до 180–300 °С металлический стержневой ящик заполняется быстротвердеющей под действием тепла песчано-смоляной смесью, которая при контакте с нагретой рабочей поверхностью ящика затвердевает. По истечении времени, необходимого для отверждения стержней, стержневой ящик раскрывается и из него извлекается готовый к установке в форму стержень. При этом удаление стержня из ящика производится до наступления полного отверждения стержня по всему его сечению. Извлечение производится, как только образовался достаточно прочный наружный слой, обеспечивающий возможность удаления стержня из ящика без разрушения. В этом случае внутренняя часть стержня доотверждается на воздухе за счет действия аккумулированного стержнем тепла.

В настоящее время имеется множество смесей для изготовления стержней в нагреваемой оснастке, огнеупорную основу которых

составляет сухой среднезернистый кварцевый песок, на 100 % (по массе) которого в типовом составе смеси используются:

смоляной связующий материал – 1,5–3,0 % (по массе);

катализатор – 0,2–0,5;

специальные добавки – 0,4–2,0 %.

Выбор типа и количество связующего зависят от многих факторов, основные из которых – вид сплава отливки, геометрические размеры стержня, технологически необходимая скорость отверждения, прочностные показатели стержня и др.

Для реализации этой технологии используются любые смоляные связующие материалы, описанные в лабораторной работе № 10. Однако применение каждого из них имеет как положительные, так и отрицательные стороны. Так, смеси, содержащие карбамидоформальдегидные связующие, обладают достаточно высокой реакционной способностью, но из-за низкой термостойкости в отвержденном состоянии рекомендуются для изготовления преимущественно алюминиевых отливок.

Фенолформальдегидные смолы обладают рядом достоинств, главные из которых – высокая термостойкость, отсутствие азота, невысокая стоимость, поэтому они нашли применение для производства стержней как для чугунных, так и стальных отливок. Из этого класса связующих наиболее часто применяют фенолоспирт (СФ-480, СФ 3042 и др.).

Карбамидоформальдегидно-фурановые смолы (фуритол-80, КФ-40, КФ-90, БС-40) являются наиболее реакционноспособными. Стержни, изготовленные на этих связующих, обладают высокой прочностью и достаточно большой гидро- и термостойкостью. Однако из-за наличия азота они применяются в основном для изготовления стержней чугунных отливок.

Фенолкарбамидоформальдегидные смолы являются промежуточными между феноло- и карбамидоформальдегидными, имеют улучшенную гидро- и термостойкость по сравнению с карбамидными и более высокую реакционную способность по сравнению с фенольными. Применяются для изготовления стержней крупных отливок.

Основные виды катализаторов (КЧ-32, КЧ-41, К4-51) представляют собой водные растворы солей кислот, устойчивых при нормальных температурах. При повышении температуры эти соли в водном растворе (вода содержится в смоле, песке, катализаторе)

диссоциируют с образованием сильных кислот, что способствует ускорению процесса отверждения стержней.

Для придания стержневым смесям требуемых физико-механических и теплофизических свойств в их составах используют специальные добавки:

серебристый графит – для увеличения теплопроводности;

стеорат цинка или кальция – для уменьшения прилипаемости стержней к горячей оснастке и увеличения текучести смеси;

этиловый спирт – для увеличения живучести смеси;

оксиды железа – для предотвращения образования просечек.

Приготовление смеси осуществляется путем перемешивания компонентов, как правило в лопастном смесителе. Из-за довольно высокой вязкости связующих предпочтительно производить перемешивание смеси в оборудовании, имеющем скорость вращения вала не более 30 об/мин. Готовая смесь надувается либо настреливается в нагретую стержневую оснастку и отверждается в ней. Поскольку смолы, применяемые для Hot-box-процесса, являются поликонденсационными, то при нагревании смеси происходит реакция поликонденсации между исходными мономерами с образованием полимера и воды. Процесс протекания реакции поликонденсации подробно рассмотрен в лабораторной работе № 10.

Порядок выполнения работы

Каждая группа студентовготавливает и исследует один состав смеси, содержащий 2, 3 и 4 % связующего материала.

Рассчитать составляющие на 0,7 кг смеси и приготовить смесь на приборе модели 4740. Смесь выгрузить в бункер и установить его на предварительно нагретый до температуры 250 °С стержневой ящик прибора модели 4735. Вдуть смесь в стержневой ящик и выдержать ее в ящике заданное в табл. 9.1 время, раскрыть ящик и извлечь отвержденные образцы. Образцы выдержать на воздухе в течение 10 мин и приступить к определению предела прочности при разрыве.

По окончании работы результаты всех испытаний занести в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Результаты испытаний

Содержание связующего, %	Прочность, МПа, при времени отверждения, мин			
	1,0	1,5	2,0	2,5
2,0				
3,0				
4,0				

Оформить результаты всех испытаний в виде графической зависимости прочности от количества связующего материала и времени отверждения.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Методика проведения работы.
5. Результаты работы.
6. Выводы.

Вопросы для самопроверки

1. Сущность Hot-box-процесса.
2. Что включает в себя типовой состав смеси для Hot-box-процесса?
3. Какие связующие применяются для данного процесса?
4. Для чего применяются катализаторы в составе смеси для Hot-box-процесса?
5. Какие специальные добавки вводятся в смесь и каково их назначение?
6. Как влияют количество связующего и время выдержки смеси в стержневом ящике на прочностные свойства образцов?

Лабораторная работа № 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЛИЧЕСТВА СВЯЗУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА И ОТВЕРДИТЕЛЯ НА КИНЕТИКУ ТВЕРДЕНИЯ ХОЛОДНОТВЕРДЕЮЩИХ СМЕСЕЙ

Цель работы: экспериментальное изучение процесса твердения холоднотвердеющих смесей (ХТС).

Приборы и материалы: прибор модели 4740 для изготовления стандартных образцов из ХТС; прибор для испытания образцов на прочность; стержневые вытряхные ящики для изготовления стандартных образцов; лабораторные весы с пределом взвешивания 500 г с погрешностью ± 100 мг; фенолформальдегидный связующий материал; ортофосфорная кислота; кварцевый песок марок (1-2)К₁₋₂О₁₋₂ (02-025); керосин; серебристый графит.

Общие сведения

Современные способы изготовления стержней основаны на использовании в качестве связующих материалов синтетических поликонденсационных смол и композиций на их основе.

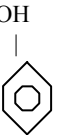
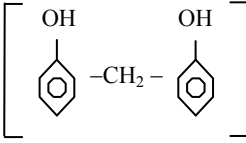
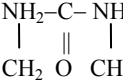
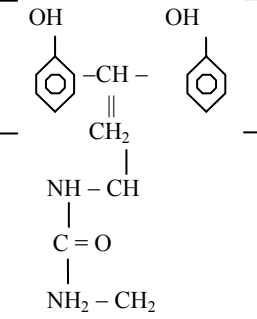
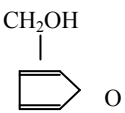
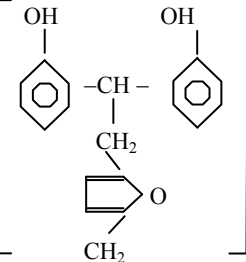
В зависимости от типа отверждения они подразделяются на следующие виды:

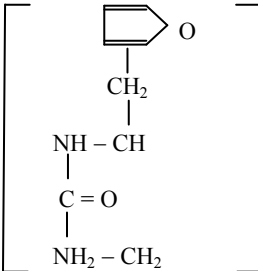
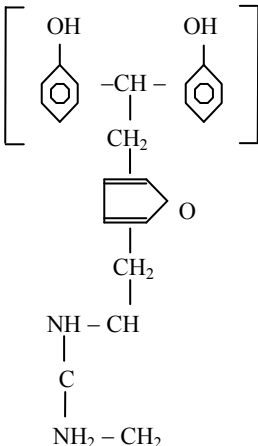
- холодного отверждения в оснастке в присутствии жидких катализаторов или отвердителей;
- холодного отверждения в оснастке под действием газовых реагентов;
- отверждения в нагреваемой горячей (Hot-box или тепловой Warm-box) оснастке;
- теплового отверждения вне оснастки (конвективная сушка, ТВЧ или СВЧ-сушка, инфракрасное излучение и др.).

Большинство смоляных связующих получают в результате реакции поликонденсации между исходными мономерами (табл. 10.1). В общем случае синтез литейных связующих проводят между фенолом, карбамидом или фуриловым спиртом и формальдегидом.

Таблица 10.1

Структурная характеристика смол

Исходные мономеры	Класс смол	Строение структурного звена
1	2	3
Фенол  Формальдегид $\text{H}-\text{C} \begin{array}{l} \text{// O} \\ \text{\ \ H} \end{array}$	Фенолформальдегидная (фенольная)	
Карбамид $\text{NH}_2-\text{C} \begin{array}{l} \text{\ \ NH}_2 \\ \text{\ \ O} \end{array}$ Формальдегид	Карбаминоформальдегидная (карбамидная)	
Фенол Карбамид Формальдегид	Фенолкарбаминоформальдегидная (фенолокарбамидная)	
Фенол Формальдегид Фуриловый спирт 	Фенолформальдегидно-фурановая (фенолофурановая)	

1	2	3
Карбамид Формальдегид Фуриловый спирт	Карбамидоформальдегидно-фурановая (карбамидофурановая)	
Карбамид Фенол Формальдегид Фуриловый спирт	Карбамидофенол-формальдегидно-фурановая (карбамидофенолофурановая)	

Образующиеся метиленовые ($-\text{CH}_2-$) или диметилэфирные ($-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2-$) связи являются своеобразными мостиками для формирования структурных звеньев олигомеров (основных продуктов реакции), формирующих адгезионную и когезионную прочность в процессе отверждения стержней и форм, содержащих органические связующие материалы.

В процессе синтеза смол реакции до конца не доводят, получая продукты 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.

Основными процессами, протекающими при отверждении смол, являются полимеризация или поликонденсация. Необходимое условие этих реакций – наличие в молекулах исходных веществ активных частей – групп атомов (или отдельных атомов), называемых функциональными. Из используемых в литейном производстве наиболее часто встречаются следующие функциональные группы:

–H (водородная);

–ОН (гидроксильная);

$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{—C} \\ \backslash \\ \text{H} \end{array}$ (альдегидная);

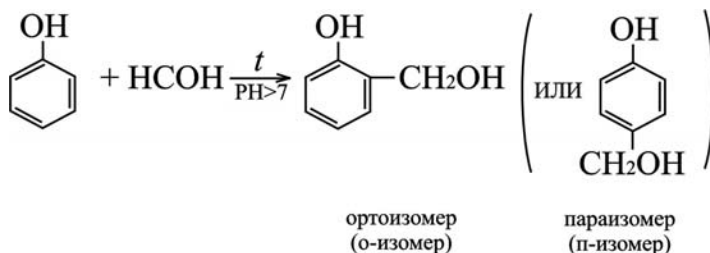
–C₆H₄ОН (фенольная);

=CH₂ (метиленовая);

–CH₂ОН (метилольная).

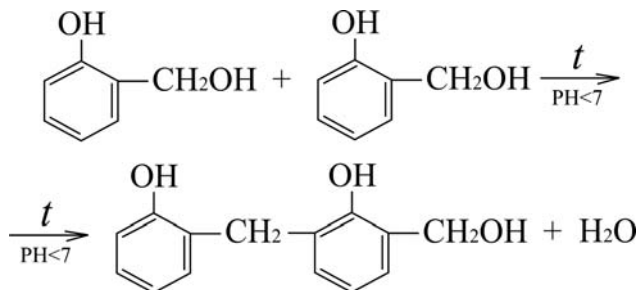
Последовательность процесса поликонденсации на примере фенолформальдегидной смолы упрощенно можно представить следующим образом.

При повышенной температуре (220–270 °С) или в основной среде (рН > 7) происходит взаимодействие между фенолом и формальдегидом с образованием ортоизомеров и параизомеров оксибензилового спирта:

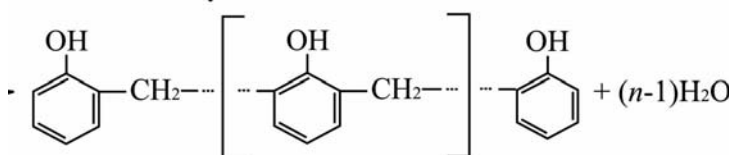


Далее метилольные группы одних молекул о-оксибензилового спирта в кислой среде или при повышенной температуре реагируют

с атомами водорода в ортоположении других молекул оксибензолового спирта:



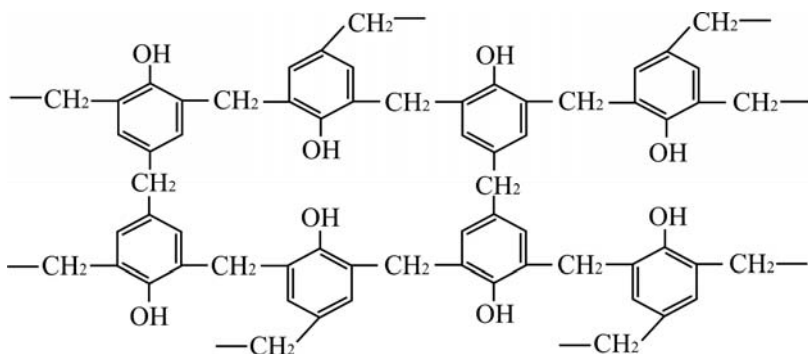
Образовавшиеся макромолекулы полиметиленафенола связывают друг с другом метиленовыми мостиками $\text{---CH}_2\text{---}$ благодаря взаимодействию атомов водорода ортоположения одних молекул с метиленовыми группами других. Результатом всех реакций является смола с линейной структурой в виде



В таких реакциях поликонденсации фенола и формальдегида, протекающих в данных условиях, различают три стадии: *резольную* (начальная стадия А), *резитольную* (промежуточная стадия В) и *резитную* (окончательная стадия С).

Резол является жидким растворимым полимером со средней молекулярной массой до 1000. **Резитол** не плавится, но немного размягчается при температуре 120–150 °С, частично растворяется или набухает под действием растворителей. **Резит** – хрупкий, твердый неплавкий 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 А полимер приобретает линейное строение, на стадии В – двумерное, на стадии С – трехмерное пространственное, которое схематически можно представить следующим образом:



Как видно, в конечной структуре отвержденного полимера наблюдается существенное количество поперечных связей через метиленовые мостики $-CH_2-$, формирующих пространственную трехмерную структуру. Фенолформальдегидные смолы обладают повышенной термостойкостью (400–800 °С), поэтому их можно эффективно использовать при получении стальных и чугуновых отливок.

В качестве катализаторов или отвердителей ХТС наибольшее распространение получили 65–85%-й раствор ортофосфорной кислоты (H_3PO_4) и 65–80%-й раствор бензосульфокислоты (БСК). Ортофосфорная кислота применяется при отверждении карбамидоформальдегидных и карбамидофурановых смол, а БСК – для всех смол.

Иногда в ХТС, наряду с основными исходными материалами, применяют и специальные добавки, предназначенные для улучшения некоторых технологических свойств, например: увеличение живучести смеси, улучшение противопожарных свойств, податливости стержней, предотвращение образования подкорковой газовой пористости, просечек и др. В качестве таких добавок используют, например, соли трехвалентного железа, оксид железа, древесную муку, оксид алюминия, колчедановый огарок.

Количество связующего материала в составах ХТС колеблется в пределах 1,5–3,0 % (по массе), катализатора – 0,5–0,6 % от количества связующего материала, а добавки составляют 0,2–1,5 % (по массе).

Основной особенностью ХТС является обратная взаимосвязь скорости отверждения и живучести смеси. Поэтому процесс ее приготовления должен быть максимально кратковременным (3–30 с), после чего смесь следует немедленно использовать для изготовления форм и стержней. Наилучшим образом отвечают этим требованиям шнековые смесители непрерывного действия.

Порядок выполнения работы

Каждая группа студентов исследует два состава ХТС с различным содержанием связующего (соответственно 1,5 и 2,0 %; 2,5 и 3,0 %), образцы которых испытывают на прочность при сжатии через 15, 30, 45 и 60 мин твердения.

На приборе модели 4740 приготовить смесь и образцы для определения прочности на сжатие из ХТС следующего состава (масс.%): карбамидно-фурановый связующий материал – 2,5; 3,0 (сверх 100 %); катализатор твердения – 1,2 (сверх 100 %); формовочный песок – 100 %.

Образцы после 5-минутной выдержки извлечь из стержневого ящика и определить их прочность на сжатие через 15, 30, 45 и 60 мин твердения.

Результаты работы занести в табл. 10.2.

Таблица 10.2

Результаты исследования прочности ХТС, МПа

Время твердения, мин	Количество связующего, %			
	1,5	2,0	2,5	3,0
15				
30				
45				
60				

По результатам исследований построить графические зависимости изменения прочности ХТС от количества связующего материала и времени твердения.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Методика проведения работы.
5. Результаты работы.
6. Выводы.

Вопросы для самопроверки

1. Разновидности синтетических связующих материалов.
2. Сущность реакции поликонденсации.
3. Какие параметры влияют на процесс отверждения ХТС?
4. Что входит в состав ХТС?
5. Какие стадии проходят синтетически связующие в процессе отверждения и чем они характеризуются?
6. Приготовление ХТС: порядок ввода компонентов смеси; применяемое оборудование.
7. Как влияет количество связующего материала на прочностные характеристики ХТС?

Учебное издание

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Лабораторный практикум для студентов специальности
1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства»
дневной и заочной формы обучения

Составители:

КУКУЙ Давыд Михайлович
СКВОРЦОВ Валерий Александрович

Редактор *Т. Н. Микулик*

Компьютерная верстка *Ю. С. Кругловой*

Подписано в печать 02.09.2016. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 3,84. Уч.-изд. л. 3,00. Тираж 100. Заказ 588.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.

