

1 ФУНКЦИИ И СТРУКТУРА КЕРАМИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

«Точное литье» предполагает использование восковой модели (копии будущей отливки) и изготовление на ее основе керамической оболочки (КО), путем многократного поочередного окунания восковой модели в суспензию (силикатная связка и огнеупорный порошок-наполнитель), с последующей обсыпкой огнеупорным материалом и сушкой каждого слоя покрытия. При этом работа идет последовательно с суспензиями различной вязкости и различной величиной зерна используемого огнеупорного порошка.

Полученная с оптимальной толщиной КО обладает достаточной прочностью, что позволяет вытопить из нее восковую модель при помощи пара, горячей воды или методом «масса в массе». Свою предельную прочность и свойства, необходимые для заливки жидких металлов, КО получает в процессе сушки и последующего обжига. Основным компонентом процесса получения КО является высокотемпературное связующее.

Высокая термостойкость КО позволяет использовать их для заливки даже тугоплавких металлов, использовать в тонкостенном и прецизионном литье.

Изначально для этих целей применялся гидролизированный этилсиликат. Современные технологии точного литья широко применяют силикатный гидрозоль (диоксид кремния – кремнезоль). В обоих случаях связь образуется путем соединения частиц SiO_2 , которые склеиваются между собой с огнеупорными компонентами в процессе гелеобразования или конденсации.

Независимо от типа связки (спиртовой или водной) каждый слой покрытия должен быть тщательно высушен. Такая сушка приводит к достаточно высокой прочности КО, но еще не готова для заливки металла из-за оставшейся минерально-связанной влаги в частицах связующего вещества. Для этого необходим обжиг керамических форм.

2 МЕХАНИЗМ СВЯЗЫВАНИЯ

Все основные связки, используемые в точном литье, основаны на соединениях SiO_2 . При различных способах осуществления данного процесса, независимо от систем связки, используется высокомолекулярный аморфный диоксид кремния. На стадии конденсации и гелеобразования аморфные частицы образуют каркас и соединяются с наполнителем - компонентом, содержащимся в огнеупорной суспензии.

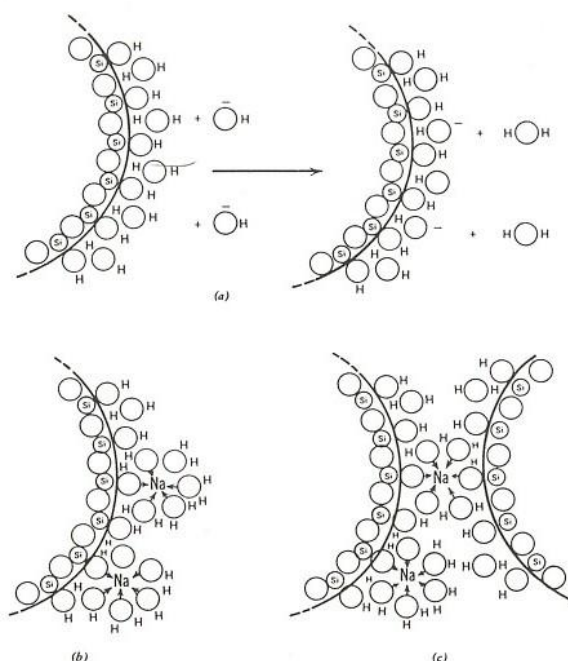


Рисунок 1 – Механизм связывания SiO_2 в водной системе.

При двух основных типах связующих механизм связки протекает по-разному, но в конечном итоге достигается одинаковая цель. В случае использования спиртового этилсиликата – происходит химическая реакция, а в случае водного связующего – протекает поверхностный физический процесс.

На рисунке 1 изображен механизм связывания SiO_2 в водной системе, на рисунке 2 – механизм роста частиц в кремнезоле.

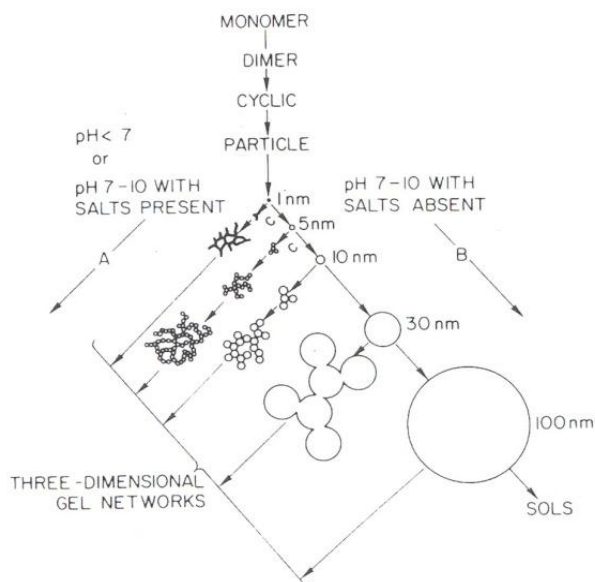


Рисунок 2 – Механизм роста частиц в кремнезоле.

Находящиеся в воде аморфные частицы SiO_2 имеют сферическую форму. Для использования в качестве связки в точном литье концентрация SiO_2 должна составлять от 22% до 30%, а размер частиц от 6 до 15 нм, что выбирается в зависимости от целей применения конечной суспензии.

Кремнезоль стабилизируется Na_2O , благодаря чему становится продуктом с долгим сроком хранения. Срок хранения водного связующего «АРМОСИЛ®» до 1 года, при условии соблюдения правил хранения. На рисунке 3 представлен график зависимости устойчивости исходного кремнезоля от pH и содержания солей.

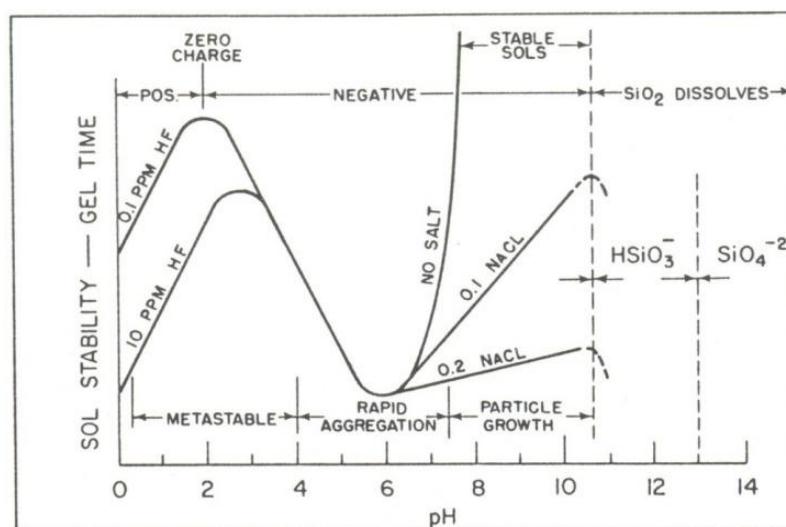


Рисунок 3 – График устойчивости кремнезолей от pH и содержания солей.

Затвердевание водных связующих систем происходит путем испарения воды и прогрессивной коагуляции частиц SiO_2 . В состоянии геля они закупоривают огнеупорные частицы, находящиеся в суспензии.

3 ИСПОЛЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

3.1 СВЯЗУЮЩИЕ

«АРМОСИЛ®» – готовые водные связующие, характеризуются высокой живучестью, стабильностью технологических свойств и отсутствием вредных испарений.

В таблице 1 представлены основные физико-химические показатели связующих «Армосил®».

Таблица 1 – Основные физико-химические показатели связующих «Армосил®»

№	Наименование показателей	«Армосил®»					
		К	KS	AM	AM-1	RM	SR
1	Внешний вид	жидкость слабо-желтого или серого цвета без видимых механических примесей и включений					
2	Массовая доля диоксида кремния, % масс.	24-27	25-28	29-31	25-27	29-31	39-41
3	Плотность, г/см ³	1,168-1,182	1,168-1,189	1,196-1,21	1,170-1,180	1,196-1,21	1,296-1,310
4	pH, ед. pH	3,3-4,5	3,3-4,5	9,5-10,5	9,5-10,5	9,5-10,5	10-11
5	Кинематическая вязкость, не более, сСт	10	10	10	10	10	10
6	Краевой угол смачивания, не более, град.	45	45	45	45	45	45

Связующие для 1-го слоя:

«АРМОСИЛ®» **KS** – связующее, которое обеспечивает высокий класс чистоты поверхности литья, не требует последующей ее механической обработки. Снижает вероятность образования пригара. Совместимо с алюминатом кобальта. Может использоваться для монокристаллического литья, литья с направленной и равноосной кристаллизацией. Рекомендовано для литья жаропрочных – никелевых сплавов и сплавов с повышенной химической активностью.

«АРМОСИЛ®» **RM** – связующее, разработанное для повышения качества поверхности отливок. Рекомендовано при финишном удалении остатков КО методом гидроструйной обработки или выщелачиванием. Финишное удаление остатков КО методом пескоструйной или дробеметной установками увеличивает шероховатость поверхности отливок, в данном случае целесообразнее использовать связующее «АРМОСИЛ®» **AM**.

Связующие для 1-го и последующих слоев:

«АРМОСИЛ®» **К** – универсальное связующее, устойчивое к попаданию в него органических растворителей, кислот, солей. Обеспечивает высокий класс чистоты поверхности литья. Не устойчиво к водной вытопке. КО на его основе обладают пониженной прочностью, что облегчает отделение КО от отливки.

«АРМОСИЛ®» **AM** – универсальное связующее для литья деталей общего машиностроения с возможностью нанесения как первого слоя, так и последующих слоев. КО на его основе характеризуются повышенной прочностью, устойчивостью к водной вытопке. По чистоте поверхности и прочности получаемой КО, связующее «АРМОСИЛ®» **AM** удовлетворяет основным требованиям предъявляемым к точному литью.

«АРМОСИЛ®» **AM1** – связующее для литья деталей общего машиностроения с возможностью нанесения как первого слоя, так и последующих слоев. Формы на его основе характеризуются пониженной прочностью по отношению к «АРМОСИЛ®» **AM**, что облегчает отделение КО от отливки.

Связующее для последующих слоев

«АРМОСИЛ®» **SR** – связующее, разработанное для придания высоких прочностных характеристик КО, как в сыром, так и в прокаленном виде. Обеспечивает хорошее формирование слоя на острых краях. Суспензии на его основе обладают высокой седиментационной устойчивостью.

3.2 НАПОЛНИТЕЛИ В СУСПЕНЗИИ

Суспензия для формирования КО представляет собой смесь связывающей жидкости и огнеупорных наполнителей – порошков. С точки зрения поведения материалов под воздействием тепла, все зернистые составные части структуры оболочки (порошки и песок для присыпания) должны иметь одинаковые характеристики КТЛР (коэффициент термического линейного расширения). В таблицах 2 и 3 представлены приблизительные коэффициенты наполнения (Кн) для КО.

Таблица 2 – Приблизительные Кн для лицевых слоев КО.

Наполнитель	Связующее «Армосил®»					
	К	KS	AM	AM-1	RM	SR
Маршалит	1,7-2,0	-	1,6-1,8	1,7-2,0	1,7-1,9	1,5-1,7
Плавленый кварц	1,25-1,35	1,25-1,35	1,2-1,3	1,2-1,4	1,25-1,35	1,15-1,25
Электрокорунд М50/М5(7) 3 к 1	3,3-3,5	3,3-3,5	3,3-3,5	3,3-3,6	3,3-3,5	3,3-3,5
Концентрат дистен-силлиманитовый пылевидный (КДСП)	1,2-1,4	1,2-1,4	1,2-1,4	1,2-1,4	1,2-1,4	1,2-1,4

Таблица 3 – Приблизительные Кн для последующих слоев КО.

Наполнитель	Связующее «Армосил®»					
	К	KS	AM	AM-1	RM	SR
Маршалит	1,45-1,55	-	1,4-1,6	1,45-1,65	1,5-1,7	1,3-1,5
Плавленый кварц	1,05-1,15	-	1,0-1,1	1,1-1,1	1,05-1,15	0,95-1,15
Электрокорунд М50/М5(7) 3 к 1	2,8-3,1	-	2,8-3,1	2,85-3,2	2,8-3,1	2,8-3,1
КДСП	0,9-1,2	-	0,9-1,2	0,9-1,2	0,9-1,2	0,9-1,2

При переводе производства КО с этилсиликатного связующего на водное «АРМОСИЛ®» огнеупорные материалы не изменяются. Однако если на производстве при работе с этилсиликатным связующим использовался маршалит прокаленный, то при работе с водным связующим «АРМОСИЛ®» рекомендуем использовать маршалит непрокаленный. При прочих одинаковых показателях, использование непрокаленного маршалита значительно повышает прочность керамических оболочек до и после прокалики, улучшается качество поверхности, повышается экономия энергоресурсов и трудозатрат.

3.3 ОБСЫПОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ

Для создания керамической формы, отвечающей требованиям как чистоты поверхности литья, так и ее прочности от одного слоя покрытия к другому слою, увеличивают размер зерна обсыпки. Материал обсыпки обычно совпадает с наполнителем суспензии. Однако в случае использования наполнителя суспензии КДСП, в качестве обсыпочного материала используют электрокорунд. Если наполнителем суспензии является маршалит, то в качестве обсыпочного материала можно использовать шамот.

Рекомендуется следующий гранулометрический состав:

- первичный слой 0,1 – 0,2 мм;
- последующие слои 0,3 – 0,5 мм.

Для получения максимально гомогенной структуры оболочки важное значение имеет обеспечение полного, равномерного нанесения суспензии и огнеупорного обсыпочного материала. Только таким образом можно создать единый и прочный композит. Важно отметить, что материал для

обсыпки должен иметь одинаковый размер частиц. Чрезмерно мелкие частички будут связываться с суспензией не пропорционально и нарушат оптимальную, равномерную толщину керамического слоя.

4 ИЗГОТОВЛЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

4.1 ПРИГОТОВЛЕНИЕ СУСПЕНЗИИ НА ОСНОВЕ ВОДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО «АРМОСИЛ®»

Для изготовления керамической оболочки связующее «АРМОСИЛ®» интенсивно смешивается с огнеупорными порошками до состояния суспензии. Выбранная марка «АРМОСИЛ®» и огнеупорные материалы варьируются в зависимости от слоя нанесения суспензии, а также в зависимости от металла, для которого предназначается данная форма.

В бак для приготовления суспензии загружается расчетное количество связующего «АРМОСИЛ®», при включенной мешалке, порциями засыпается наполнитель, до достижения желаемой вязкости суспензии. Частички порошка должны быть в диапазоне от 2 до 60 микрон.

Для 1-го слоя вязкость суспензии должна быть в пределах от 50 – 90 секунд (по ВЗ-4).

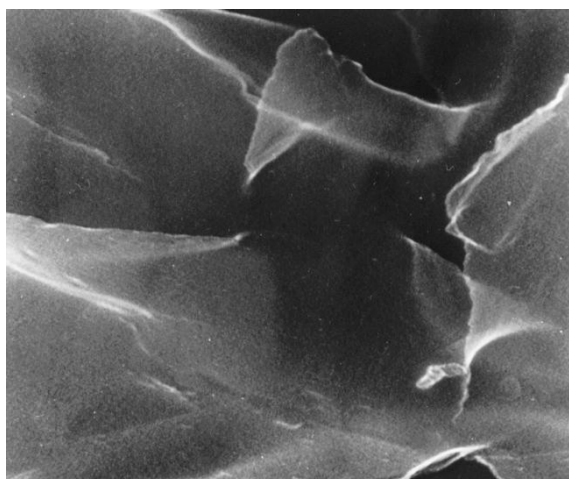
Для 2-го и последующих слоев – 30 – 45 секунд (по ВЗ-4).

Желательная частота вращения крыльчатой мешалки – 900 – 1500 об/мин, время перемешивания – не менее 240 минут, при частоте вращения мешалки от 1500 – 3500 об/мин, время приготовления суспензии уменьшается до 120 минут.

Готовность суспензии существенно зависит от оптимальной интенсивности и продолжительности перемешивания смеси.

На рисунке 4 представлены фотографии с применением электронного микроскопа (увеличение составляет 10 000) приготовленных суспензий. На первом фото суспензия перемешивалась 4 часа – система практически гомогенная, с хорошими связями. На втором фото суспензия перемешивалась 1 час – система неоднородная, без образования прочных связей. Соответственно, перемешивание должно быть как можно более продолжительным для достижения однородной, гомогенной системы.

Фотография 1 – Хорошее перемешивание.



Фотография 2 – Недостаточное перемешивание.

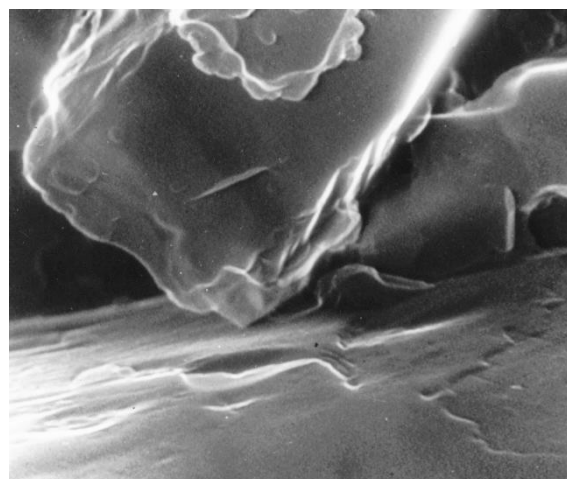


Рисунок 4 – Влияние времени перемешивания суспензии на ее качество (сравнительные фотографии).

После перемешивания, перед использованием, суспензия должна отстояться в течение 15-20 минут для достижения стабильной вязкости и удаления воздуха. Для поддержания однородности суспензии ее необходимо периодически перемешивать с определенной скоростью, чтобы исключить осаждение наполнителя.

При использовании «Армосил» АМ, RM, SR, при необходимости увеличения прочности получаемой керамической оболочки, во время приготовления суспензии можно вводить этилсиликат (ЭС) в количестве 5 – 15% от массы связующего, порошок АСД-4.

4.2 ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЯ КЕРАМИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Модельный блок рекомендуется обезжиривать перед окунанием в суспензию для достижения наилучшего смачивания. Обезжиривание можно производить в водном растворе сульфанола, в моющем средстве, либо протирая блоки спиртом. Перед нанесением 1-го слоя покрытия поверхность блоков должна быть высушена.

Последовательность технологических операций по формированию оболочки на поверхности модельного блока:

1. Модельный блок медленно погружают в огнеупорную суспензию под углом $30^\circ - 40^\circ$ относительно его вертикальной оси и, не извлекая из суспензии, поворачивают вокруг оси на 180° .

2. Через 3 – 10 секунд с момента погружения, блок извлекают из суспензии и, в течение 5 – 20 секунд, медленно поворачивая вокруг своей оси под наклоном, дают стечь излишкам суспензии с его поверхности. Это необходимо для полноценного смачивания восковой модели с тем, чтобы удалить возможно захваченные частички воздуха.

3. Блок со всех сторон обсыпают зернистым материалом соответствующей фракции, после чего с торца его литниковой чаши, с помощью ножа или специального приспособления, удаляют нанесенный слой огнеупорного покрытия. Высокая прочность керамической оболочки достигается в результате равномерного нанесения обсыпочно материала на модель, поэтому необходимо обеспечить оптимальное перемещение модели при одновременном интенсивном потоке обсыпочно материала.

Нанесение обсыпочно материала может происходить двумя разными способами. Метод применения флюидизатора, предполагает использование «квази-жидкого» состояния слоя песка при подаче его воздухом снизу (вихретоковые установки). Альтернативным методом нанесения является «разбрызгивание», равномерное осыпание модели песком. Оба метода имеют технологические преимущества и недостатки.

В флюидизаторе существует большая опасность предпочтительного использования наиболее мелких частиц, так как при вертикальном потоке воздуха они попадают на поверхность песка и будут первыми нанесены на влажную поверхность формы. Преимущество данного метода в том, что песок в квази-жидком состоянии проникает в труднодоступные пустоты. Слишком долгое нахождение формы в флюидизаторе приводит к «спахиванию» только что нанесенного обсыпочно материала с поверхности потоком воздуха. Статистически определено, что в флюидизаторе может быть достигнута только небольшая прочность керамической оболочки.

Метод разбрызгивания-посыпания приводит к равномерному распределению обсыпочно материала с одинаковым размером частиц. Для этого необходимо оптимально вращать и поворачивать модель (особенно важно при геометрически сложной конструкции модели для достижения обсыпки всех точек поверхности).

4.3 СУШКА

Помимо состава и состояния связующей суспензии большое значение для свойств керамической оболочковой формы имеет способ сушки.

В отличие от спиртовой системы, в случае применения водного связующего под маркой «АРМОСИЛ®» процесс затвердевания происходит исключительно физическим способом без химического «ускорения» – за счет испарения воды. В водной системе необходимо испариться большому количеству жидкости – 72 – 78 % объема, следовательно, необходимо уделить особое внимание организации и планированию процесса сушки каждого слоя покрытия для получения качественной КО. Для сушки КО рекомендуем использовать помещения с температурой 22 – 25 °С и относительной влажностью 40 % с интенсивной вентиляцией.

Для того чтобы генерировать высокий градиент диффузии в связующем веществе необходим ускоренный воздухообмен. Совершенная технология сушки происходит при скорости потока воздуха

около 8 м/сек. Эти условия реализуют в закрытых камерах или каналах (туннелях). В начале сушки влажность непосредственно на пограничном слое за счет выброса воды поднимается до 90 %, чтобы затем асимптотически приблизиться к нормальным условиям, т.е. 35 – 40 %. Спад этой кривой уменьшается с увеличением скорости потока воздуха, когда водная масса непрерывно удаляется из камеры за счет правильно подобранной мощности сушилки.

Коагуляция коллоидов SiO₂ приводит к необходимой прочности оболочки. Этот процесс регулируется свойствами самих коллоидов (поверхностного натяжения) и внешних воздействий, таких как: температура емкости с суспензией и возможные будущие колебания температуры самой суспензии.

Практические рекомендации по сушке слоев КО

После нанесения каждого слоя блоки подвергаются естественно-принудительной сушке. Оптимальные параметры в помещении (камере) сушки:

1. Температура 23 – 28 °С.
2. Влажность не более 50%.
3. Принудительный обдув. Рекомендуемая скорость обдува 4 – 8 м/сек.

Время высыхания 1-го слоя (в зависимости от габаритов и конфигурации модельного блока) составляет от 30 минут до 4 часов. Последующие слои высыхают за 2 – 8 часов.

Скорость сушки напрямую зависит от микроклимата и наличия циркуляции воздуха в сушильной камере. Кроме того, в условиях принудительной сушки прочность оболочки выше по сравнению с естественной сушкой на воздухе.

При формировании КО, полностью выполненной на основе водного связующего «АРМОСИЛ®», после нанесения последнего слоя необходимо провести операцию окончательной сушки, которая занимает 12 – 24 часа, для удаления остаточной влаги из оболочки.

При работе с водным связующим не наблюдается «пересушивание» КО, что исключает образование трещин при длительном хранении модельных блоков с нанесенной на них оболочкой (со второго и последующих слоев).

4.4 ФОРМИРОВАНИЕ ПОСЛЕДУЮЩИХ СЛОЕВ КЕРАМИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

При нанесении последующих слоев покрытия (погружение блока в суспензию примерно на 5 секунд) необходимо достичь полного проникновения суспензии между частичками песка на поверхности керамической формы. Нанесение последующего слоя огнеупорного покрытия производят после полного высыхания предыдущего слоя покрытия, повторяя вышеописанные технологические операции.

После окунания блока в суспензию все части модельного блока должны быть покрыты суспензией равномерно, без подтеков. Необходимо соблюдать время нахождения блока в баке не более 10 секунд.

После нанесения каждого последующего слоя необходимо произвести сушку по вышеуказанным рекомендациям.

Многослойные оболочковые формы могут быть изготовлены как полностью на основе связующего «АРМОСИЛ®», так и в сочетании с этилсиликатными и жидкостекольными связующими.

4.5 ВЫПЛАВКА

Важно, чтобы перед вытопкой КО была абсолютно сухой, для того чтобы процесс связывания между коллоидами носил необратимый характер. В противном случае, наличие влаги приведет к нарушению этого процесса и разрушению КО.

После окончательной сушки необходимо удалить модельный состав из полости КО. При работе с водным связующим рекомендуется использование бойлерклава – нагрев блоков паром под давлением ($t > 140$ °С). Также возможно удаление модельного состава в его расплаве – метод «масса в массе» – в

данном случае форма пропитывается модельным составом и упрочняется. При отсутствии замешенного воздуха в модельном составе, температура выплавления должна быть как минимум на 50 °С выше чем температура каплепадения, для того чтобы «термошоком» расплавить модельный состав (примерно 0,1 мм), прилегающий к стенкам керамической формы. В противном случае возможно растрескивание керамической формы под действием расширяющейся модельной массы. Так же можно использовать выплавку в горячей воде при температуре не менее 95 °С, но не доводя воду до кипения. В этом случае форма только изнутри пропитывается модельным составом, а снаружи – водой, в результате прочность форм снижается. При водной вытопке одним из условий является наличие воздуха в модельной массе. При использовании модельного состава ПС (смесь парафина и стеариновой кислоты) при вытопке на керамических оболочках не наблюдается растрескивание, даже при отсутствии воздуха в смеси модельного состава. Это связано с низкой температурой каплепадения – 48 °С. В случае использования модельного воскового состава (МВС), наличие воздуха в смеси модельного состава обязательно, т.к. температура каплепадения составляет 79 – 88 °С, в зависимости от марки модельного состава. Количество воздуха в модельной массе должно составлять от 18% до 30%. Способ выплавления моделей в воде требует значительного запаса прочности оболочек, которое для водных связующих достигается за счет увеличения времени сушки, количества слоев и марки связующих «Армосил®»

Не допускается медленный нагрев оболочковой керамики с модельной массой, т.к. модельная масса успевает прогреться и расшириться до подтопления, что может вызвать растрескивание керамической формы.

4.6 ОБЖИГ

Последним этапом при производстве керамических форм является процесс обжига. Он должен выполнять несколько функций:

1) Удаление (выгорание) остатков восковой модели. Неудаленные остатки восковой модели могут привести к браку литья.

2) Удаление остатков влаги (дегидрация). Время и температура, необходимые для полного высыхания КО, часто недооцениваются. Последние частички влаги испаряются лишь при температуре около 800 °С. Такая температура в связи с низкой теплопроводностью керамики достигает даже труднодоступные места, а также поверхности, на которые тепловое излучение воздействует с определенным запозданием. Из-за данного эффекта водные системы на данном этапе требуют большего внимания, чем спиртовые.

Рекомендуется применение высоких температур (около 950 °С) в течение не менее 1 часа.

3) Предварительный нагрев до температуры подходящей для литья. После обжига КО температуру можно опустить до комнатной и вновь разогреть непосредственно перед заливкой металла.