

Д. т. н. **В. Н. Соков**

ФГБОУ ВО НИУ «Московский государственный
строительный университет», Москва, Россия

УДК 666.792.22:544.022.535]:666.76-127

ЯЧЕИСТЫЙ ВИБРОПНЕВМОУПЛОТНЕННЫЙ КОРУНД. Часть 1. Особенности применения вибропрессования при получении высокопористых огнеупоров на основе сферически выгорающей добавки

Исследование сферически выгорающей добавки и метода вибропрессования глиноземо-пенополистирольных масс с низкой формовочной влажностью обеспечивает немедленную распалубку сырца, механизацию основных технологических переделов, ликвидацию обрезки и шлифования изделий. Рассмотрены особенности физико-механических процессов вибропрессования формовочных масс на легкодеформируемом пенополистироле, исходя из особенностей макро- и микроструктуры выгорающей добавки.

Ключевые слова: пенополистирол, вибропрессование, акустические свойства, вибрационная обработка, напряженно-деформированное состояние, сульфидно-спиртовая барда (с. с. б.).

ВВЕДЕНИЕ

С применением традиционных выгорающих добавок по разным причинам (низкой прочности изделий, трудности выжигания, неправильной формы зерен) невозможно создать огнеупорные изделия пористостью более 60 %. Поэтому этим способом получить химически чистый корундовый теплоизоляционный материал с низкой средней плотностью не удается — при удовлетворительной прочности изделия имеют минимальную среднюю плотность 1300 кг/м³. Для коренного улучшения технологии необходимо применить качественно новый в этой области технологический прием. В МГСУ разработаны основы новой технологии производства корундовой теплоизоляции*. Главными отличительными особенностями этой технологии являются:

- использование в качестве выгорающей (порообразующей) добавки зерен пенополистирола, что позволяет получать поры по форме близкими к сферической, регулировать с высо-

кой степенью точности размеры пор, общую пористость, а следовательно, изготавливать изделия с разными заданными свойствами;

- применение вибрационного способа формования изделий, позволяющего, с одной стороны, достигать высокой степени уплотнения формовочных масс, содержащих большое количество (до 80–85 об. %) легкодеформируемой выгорающей добавки и отличающихся небольшой формовочной влажностью, а с другой — значительно упрощающего процесс формования изделий, механизировав все основные технологические переделы.

Из полученного расчета возможной пористости керамических изделий при применении выгорающей добавки с зернами сферической (или близкой к ней) формы установлено, что в состав формовочной массы может входить до 80 об. % пенополистирола. Из этого следует, что такая смесь будет обладать весьма низкой средней плотностью. Следует учесть еще и то, что легкая упругая выгорающая добавка, образуя скелет в формируемой массе, ухудшает акустические свойства смеси, приводя к значительному затуханию вибрационных импульсов и, соответственно, к снижению эффективности вибрационной обработки. Следовательно, интенсивность вибрации должна быть значительной. Для выбранной оптимальной интенсивности можно подобрать значения основных параметров режима вибрирования: амплитуду и частоту колебаний. Однако это не значит, что можно варьировать этими величинами в любых пределах, следя только за тем, чтобы их совместная

* **Соков, В. Н.** Энергоэффективная скоростная технология получения высокотемпературных теплоизоляционных материалов: монография / В. Н. Соков. — 2-е изд. (эл.). — М. : МИСИ-МГСУ, 2017. — 329 с.



В. Н. Соков
E-mail: sersok_07@mail.ru

производная соответствовала требуемому значению интенсивности. Следует учитывать, что, вибрируя смесь, содержащую пенополистирол, нельзя беспредельно повышать частоту колебаний, поскольку высокочастотные колебания затухают в такой смеси сильнее и радиус их действия меньше, чем у низкочастотных.

Рассмотрим некоторые особенности физико-механических процессов виброуплотнения глиноземо-пенополистирольных смесей. Уменьшение внутреннего трения в таких смесях при вибрировании приводит к снижению взвешиваемой особенности огнеупорного теста, и под действием силы тяжести происходит движение частиц вниз, что ведет к более плотному расположению в массе составляющих. При этом движении некоторая часть адсорбированной на поверхности зерен воды вовлекается в остальную подвижную массу, обогащая ею керамическое тесто, в результате чего снижаются величина его начального сдвига и вязкость. Порог виброуплотнения, определяющийся предельным напряжением сдвига, радиусом и плотностью частиц, приводимых в движение, а также пластичностью, исследуемых смесей выше, чем у обычных.

Предельное напряжение сдвига в покоящейся глиноземо-пенополистирольной массе не преодолевается массой выгорающей добавки, имеющей гораздо меньшую среднюю плотность, чем глиноземистое тесто. Так, пенополистирол имеет среднюю насыпную плотность 20 кг/м^3 , а глиноземистое тесто $220\text{--}250 \text{ кг/м}^3$, поэтому он окажется взвешенным в этом тесте. Очевидно, оседание частиц пенополистирола может иметь место лишь в том случае, если в несколько раз уменьшить взвешивающую способность теста и, следовательно, величину предельного напряжения сдвига. Отсюда можно сделать вывод, что свежеприготовленная легкая глиноземо-пенополистирольная смесь должна вести себя и в процессе вибрирования иначе, чем обычная смесь. При вибрации любых смесей частицы ее движутся подобно газу. Относительное движение частиц и пересечение их траекторий создают возможность обмена импульсами, статическая равнодействующая которых препятствует внешнему давлению, собственному весу и силам сцепления частиц. Отсюда вывод: если внешнее давление, оказываемое на вибрируемую смесь, больше статической равнодействующей, то никакого эффекта от вибрации не будет. Таким образом, не всякий пригруз полезен. Например, если давление пригруза больше активного давления, то уплотнения не будет.

При формировании глиноземо-пенополистирольных смесей выбор давления пригруза важен еще и потому, что легкодеформируемая выгорающая добавка, обладая упругими свойствами, деформируется под действием сжима-

ющих усилий в момент формирования изделий, а затем после снятия усилий стремится восстановить свои первоначальные объем и форму, нарушая при этом сплошность структуры изделий образованием в них трещины. Естественно, что, подбирая давление пригруза, необходимо учитывать напряженно-деформированное состояние пенополистирола.

Рассмотрим некоторые закономерности деформирования пенополистирола под действием внешних нагрузок. В момент приложения нагрузки на зерна пенополистирола сначала произойдет мгновенная упругая деформация. Затем они испытывают запаздывающую деформацию или деформацию, развивающуюся во времени. Наконец, вслед за упруго-вязкой деформацией возникает и развивается во времени пластическая деформация. Если спустя некоторое время нагрузка снимается, мгновенно исчезает и упругая деформация. Далее постепенно исчезает запаздывающая деформация, а пластическая деформация остается необратимой.

Качественно законы образования и развития деформаций зерен пенополистирола от нагрузки могут быть объяснены, исходя из рассмотрения их структуры. В зерне пенополистирола различают макро- и микроструктуру. На основании микроскопических исследований установлено, что скелет макроструктуры зерна построен из стенок пор и представляет собой пространственную решетку. Заполнителем этого скелета является воздух. Скелет микроструктуры зерна построен из произвольно ориентированных цепеобразных макромолекул высокополимера, которые образуют тесно переплетающуюся достаточно жесткую пространственную сетку.

Структурным элементом зерна пенополистирола является пора. Пора имеет сферическую или эллиптическую форму, произвольно ориентированную в объеме тела. Стенки пор имеют форму пластинок с разной толщиной в средней части и у основания. Наибольшая толщина стенок наблюдается в зонах соединения со стенкой соседней поры. Таким образом, можно считать, что стенки пор, образующие пространственную решетку, представляют собой скелет макроструктуры, а заполнитель внутренней полости пор — воздух можно рассматривать как среду, заполняющую этот скелет. Внешняя нагрузка, прикладываемая к зерну пенополистирола, воспринимается как скелетом, так и заполнителем скелета. Скелет оказывает механическое сопротивление действующей на него нагрузке, а заполнитель — аэродинамическое сопротивление силовому воздействию.

Микроскопические исследования стенок пор показали, что надмолекулярная структура стенок построена из фибриллярных волокон, которые представляют собой пачки волоконцев, называемых фибриллами. Фибриллы состоят

из пачек макромолекул, полученных путем полимеризации основы пенопластов — полимера. Таким образом, скелет микроструктуры зерна пенополистирола составляют макромолекулы, образующие жесткие пространственные структуры. Заполнитель и скелет микроструктуры связаны друг с другом межмолекулярными силами взаимодействия и представляют собой единый комплекс, сопротивляющийся воздействию внешних сил.

При воздействии на зерна пенополистирола сжимающей нагрузки в момент ее приложения она воспринимается как скелетом, так и его заполнителем. Ввиду малой вязкости заполнителя (воздух) скелета он мгновенно разгружается, и всю нагрузку воспринимает скелет. Стенки пор, являющиеся основным структурным элементом скелета макроструктуры, воспринимая нагрузку, мгновенно деформируются, т. е. имеет место мгновенная упругая деформация. Ее можно условно разделить на две составляющие: первая является следствием изменения среднего расстояния между центрами тяжести молекул, вторая связана с упругой потерей устойчивости некоторой части наиболее гибких стенок пор, что приводит к образованию дополнительной мгновенной упругой деформации.

Таким образом, при вибропрессовании глиноземо-пенополистирольных смесей должен существовать определенный уровень прессующего давления, способный вызвать в зернах пенополистирола лишь мгновенную упругую деформацию, которая не вызовет редеформацию, которая может нарушить сплошность сырца.

Для установления оптимальных технологических параметров производства корундовых легковесных изделий в части подготовки массы были проведены исследования, цель которых — определение порядка перемешивания компонентов шихты на свойства изделий. Смешиваемость зерен пенополистирола, характеризующихся средней плотностью $20\text{--}30\text{ кг/м}^3$, с зернами технического глинозема, средняя плотность которых составляет $350\text{--}370\text{ кг/м}^3$, зависит от ряда факторов, в первую очередь от степени увлажнения компонентов и порядка их загрузки в смесительный аппарат.

Предварительное исследование этого процесса показало, что в сухом состоянии смешать два рассматриваемых компонента не удается. Большая разница в средней плотности зерен пенополистирола и огнеупорного порошка приводит к неизбежному расслаиванию смеси (весь керамический компонент перемещается в нижнюю часть объема смеси). Введение сухого пенополистирола в увлажненную керамическую массу и получение удовлетворительной гомогенности смеси возможно лишь при весьма высоком водосодержании керамической массы ($\sim 40\%$), т. е. при образовании шликера. Это

противоречит задаче работы, так как в данном случае приходится переходить к технологии литья, недостатки которой очевидны. Кроме того, в этом случае наблюдается также расслоение смеси за счет всплывания зерен пенополистирола.

Можно предположить, что введение сухого керамического порошка в предварительно увлажненный пенополистирол при непрерывном перемешивании обеспечит получение достаточно однородной смеси. В этом случае частицы огнеупорного порошка будут прилипать к поверхности зерен пенополистирола, т. е. будет наблюдаться адсорбирование мелких частиц глинозема на увлажненной поверхности более крупных частиц пенополистирола подобно тому, как это происходит при минерализации пен. Жидкость, смачивающая поверхность зерен выгорающей добавки, будет являться адсорбирующим веществом.

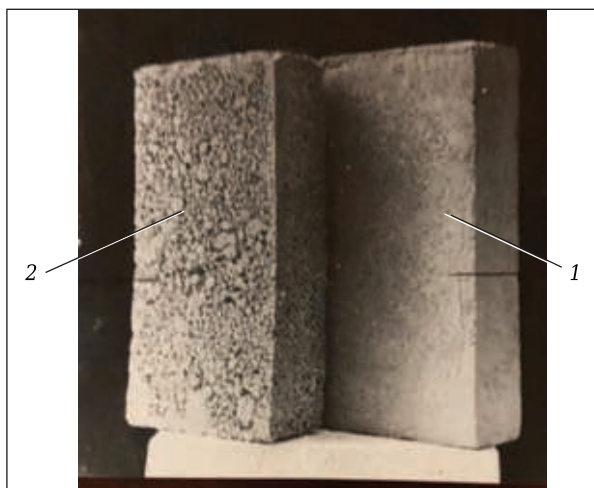
На основании этого предположения был применен следующий порядок приготовления смеси. Вспученный бисерный полистирол загружали в лопастной смеситель и во время перемешивания добавляли в него раствор сульфитно-спиртовой барды (с. с. б.). Раствор с. с. б. повышал адгезионную способность пенополистирола и являлся пластификатором. Затем в смеситель подавали огнеупорный компонент. Длительность перемешивания $8\text{--}10$ мин. При таком порядке перемешивания получалась жесткая связная масса, способная под воздействием вибропрессования компактно укладываться в форме.

Таким образом, выбранный порядок приготовления смеси и способ обработки зерен пенополистирола раствором с. с. б. позволил получить прочный свежесформованный сырец, обеспечивающий его немедленную распалубку. Следующим этапом исследований требовалось экспериментально установить границы эффективности добавки гидрофильного пластификатора (с. с. б.). При малых добавках обычно преобладает эффект пептизации, приводящий к увеличению прочности структуры за счет роста числа свободных частиц в единице объема. При больших добавках преобладающим оказывается снижение прочности структуры из-за блокировки контактов частиц глинозема.

Плотность раствора с. с. б. изменяли от 1009 до 1150 кг/м^3 . Результаты показали, что для пластификатора существует оптимальный интервал плотности ($1010\text{--}1015\text{ кг/м}^3$), нарушение которого приводит к ухудшению механических свойств изделий. Очевидно, эту закономерность можно объяснить следующим образом. Известно, что прочность сформованного сырца складывается из двух составляющих: сил прилипания и сил трения между компонентами шихты. Раствор с. с. б. увеличивает силы прилипания за счет своей склеивающей способности и обе-

спечивает таким образом упрочнение сырца. Однако с. с. б. плотностью 1015 кг/м^3 уменьшает силы трения частиц смеси за счет блокирования зон контакта компонентов, и прочность сырца снижается. Уменьшение прочности сырца при введении раствора с. с. б. плотностью менее 1010 кг/м^3 происходит за счет снижения сил прилипания. Согласованное действие каждой из составляющей соответствует максимальной прочности сырца.

При введении избыточного количества добавки (плотность раствора с. с. б. более 1090 кг/м^3) наблюдалось комкование массы при перемеши-



Образцы, полученные с разной плотностью раствора с. с. б.: 1 — 1012 кг/м^3 ; 2 — 1100 кг/м^3

вании, в результате чего сформованный сырец имел рыхлую структуру (см. рисунок).

Методом вибропрессования можно двояким образом уплотнять изделия: последовательным приложением вибрации и статического давления (кратковременного или длительного) и одновременно приложением вибрации и давления. Следует также уяснить, какая составляющая вибропрессования (динамическая или статическая) является основной уплотняющей силой.

Исходя из того, что в составе исследуемой смеси содержится большое количество легко деформирующихся частиц (более 80 % по объему), обладающих упругим последствием, установлено, что давление, прикладываемое к смеси в процессе вибрирования, необходимо рассматривать как средство повышения эффективности вибрационного воздействия на керамическую смесь. Создание прессующего усилия достигалось при помощи пригруза, причем необходимо было применить такой пригруз, который, не отрываясь от поверхности, поджимал бы уплотненную массу на всем протяжении виброуплотнения, устраняя ее встряхивание. В противном случае возможно расслоение смеси вследствие большого различия в плотности зерен пенополистирола и основного материала. Хотя уплотняющей статической нагрузке при формировании отводится вспомогательная роль, порядок ее приложения к смеси весьма существен. ■

Получено 20.05.21
© В. Н. Соков, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



13-я международная конференция «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология» (CFPMST 2021)

25–27 октября 2021 г.
г. Троицк, Россия

НАУЧНАЯ ПРОГРАММА:

- последние достижения в области синтеза алмазов
- методы исследования и компьютерного моделирования структуры и свойств алмазов и новых форм углерода (наноалмазов, фуллеренов, нанотрубок, онионов, карбинов, графенов и др.)
- углеродсодержащие композиты функционального и конструкционного назначения, перспективы создания и применения в разных областях
- новые физические и химические подходы при создании углеродных материалов, изучение взаимосвязи структуры и свойств, применение в биологии и медицине
- сорбционные и каталитические свойства углеродных, в том числе наноструктурированных, материалов
- методы синтеза наноструктурированных углеродных материалов

www.ruscarbon.org/2021