

DOI: 10.15593/2224-9982/2019.59.02

УДК 620.18

Ю.А. Кетов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

РАЗРАБОТКА СИНТАКТИЧЕСКОГО ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ ПОЛИЯЧЕИСТОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА

Для изготовления теплоизоляционных узлов аэрокосмических аппаратов находят широкое применение синтактические композиционные материалы, представляющие собой композицию полых жестких микросфер на полимерной связке. Единственным легким наполнителем для полимерных композиционных материалов на сегодняшний день являются микросферы, представляющие собой моноклетчатые полые сферы. Технические требования к ним как к наполнителям ПКМ основаны на высокой прочности, малом удельном весе и отсутствии открытой пористости. Полиакрилатные материалы, в отличие от моноклетчатых микросфер, могут быть получены из природного и техногенного сырья по сравнительно доступным технологиям, но имеют ряд ограничений по размеру получаемых гранул. Кроме того, закономерности и критерии оценки разрушения полиакрилатных материалов от действия механических нагрузок в процессе изготовления ПКМ недостаточно изучены, что сдерживает создание синтактических ПКМ на основе полиакрилатных материалов.

Рассмотрены результаты разрушения гранулированного полиакрилатного материала под одноосной нагрузкой, на основании выявленных закономерностей предложен и реализован на практике метод получения синтактических ПКМ с наполнителем из полиакрилатного силикатного гранулированного материала. Исследованы физико-механические и теплофизические характеристики получаемых синтактических ПКМ.

Приведены результаты исследований по получению полиакрилатного силикатного наполнителя с равномерной по объему структурой ячеек и предложены технические решения получения такого наполнителя с оптимальной себестоимостью и экологической чистотой.

Ключевые слова: синтактические композиционные материалы, гранулированный полиакрилатный наполнитель, физико-механические и теплофизические характеристики, силикатный ячеистый материал.

I.A. Ketov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

DEVELOPMENT OF A SYNTACTIC POLYMER MATERIAL WITH A POLY-CELLULAR GRANULAR FILLER

For the manufacture of thermal insulation units of aerospace engineering a syntactic composite materials are widely used. These materials are usually consist of hollow rigid microspheres in a composition with a polymer bond. The exclusive lightweight filler for polymer composite materials (PCM) recently are microspheres, which are monocellular hollow spheres. Technical requirements to them, as to PCM fillers, are based on high strength, low specific gravity and absence of open porosity. Polycellular silicate materials, unlike monocellular microspheres, can be obtained from natural and man-made raw materials by relatively affordable technologies, but have a number of restrictions on the size of the resulting granules. In addition, the regularities and criteria for assessing the destruction of polycellular silicate materials from the action of mechanical loads in the process of manufacturing PCM insufficiently studied, which constrains the creation of syntactic PCM based on polycellular materials.

The results of destruction of granulated polycellular material under uniaxial loading are considered. The method of syntactic PCM obtaining with filler from polycellular silicate granular material is proposed on the basis of the revealed regularities. This method was implemented in practice. The physicomechanical and thermophysical characteristics of the obtained syntactic PCM are investigated.

The results of preparation of a polycellular silicate aggregate with a uniform cell structure in volume are presented. Technical solutions for the production of such a filler with optimal cost and environmental cleanliness are proposed.

Keywords: syntactic composite materials, granulated poly-cellular filler, physical-mechanical and thermophysical characteristics, silicate cellular material.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) могут сочетать в себе высокие прочностные характеристики с теплоизоляционными [1, 2] и звукоизоляционными [3], поэтому находят широкое применение в аэрокосмической технике. Для обеспечения теплозащиты деталей и узлов аэрокосмических аппаратов широкое применение находят синтактические ПКМ [4, 5]. Синтактические ПКМ, состоящие из полимерной матрицы и полых стеклянных сфер, представляют собой одно из немногих решений для структур, удовлетворяющих как повышенным структурно-механическим, так и теплоизоляционным свойствам. Разработка синтактических пеноматериалов с высокими прочностными и теплоизоляционными свойствами затруднена, поскольку эти два свойства по своей сути противоположны друг другу. В результате крайне важно подобрать матрицу, наполнитель и условия приготовления, что приведет к приемлемым прочностным и тепловым свойствам [6].

Свойствами синтактических пен можно управлять, изменяя характеристики наполнителя – стеклянных микросфер и матрицы [7]. Варьирование этих двух параметров независимо позволяет разрабатывать синтактические пены с двумя или более свойствами, адаптированными одновременно. Такая возможность позволяет разрабатывать многофункциональные синтактические пены и адаптировать их свойства для широкого спектра применений.

Единственным легким наполнителем для синтактических ПКМ на сегодняшний день являются микросферы, представляющие собой моноячеистые полые сферы.

Микросферы представляют собой сыпучие мелкодисперсные порошки, состоящие из полых тонкостенных частиц сферической формы размером от 10 до 300 мкм и толщиной стенок от 1 до 4 мкм. Насыпная плотность обычно составляет 50 до 700 кг/м³. Материалом микросфер чаще является керамика, но известны микросферы из углерода и металла. Уникальное сочетание низкой плотности с малым размером частиц определяет высокую востребованность микросфер для создания композиционных материалов, особенно для аэрокосмической техники [8]. Наибольшее распространение получили микросферы, образующиеся в золе уноса тепловых электростанций [9]. Однако методы направленного синтеза синтетических микросфер недостаточно разработаны и не позволяют массово производить материал, а микросферы в золе уноса содержатся в незначительном количестве и их выход нестабилен.

Полиячеистые силикатные материалы, в отличие от моноячеистых микросфер, могут быть получены из природного и техногенного сырья по сравнительно доступным технологиям, но имеют ряд ограничений по размеру получаемых гранул. Кроме того, закономерности и критерии оценки разрушения полиячеистых силикатных материалов от действия механических нагрузок в процессе изготовления ПКМ недостаточно изучены, что сдерживает создание синтактических ПКМ на основе полиячеистых материалов.

Целями данного исследования являются разработка физико-химических и физико-механических процессов формирования синтактических ПКМ с гранулированным полиячеистым наполнителем на основе выявления закономерностей разрушения поверхностных слоев наполнителя при формировании ПКМ и разработка физико-химических процессов формирования гранулированного полиячеистого наполнителя.

Композиционные материалы получали из гранулированного пеностекла со связками из полиэфирной и полиуретановой двухкомпонентных смол прессованием в металлической форме при контролируемом давлении. В качестве материала матрицы использовали полиэфирную смолу (Butanox M-50) и полиуретановую смолу (POLYSYSTEM 40). Измерение коэффициента теплопроводности проводили на приборе ПИТ-2.1 при стационарном тепловом режиме по ГОСТ 7076.

Исследования прочностных характеристик полученных материалов проводили на оборудовании Центра коллективного пользования «Центр экспериментальной механики» Пермского национального исследовательского политехнического университета. Для проведения испытаний была выбрана универсальная электромеханическая система Instron 5982, имеющая высокоточный видеоэкстензометр (± 2 мкм) для измерения перемещений и высокоточный независи-

мый датчик нагрузки с уровнем ± 100 кН (точность измерения нагрузки 0,4 % от измеряемой величины в диапазоне от 1 до 100 % номинальной мощности датчика нагрузки; 0,5 % от измеряемой величины в диапазоне от 0,2 до 100 % номинальной мощности датчика нагрузки) для измерения усилий при сжатии. Скорость сжатия составляла 20 мм/мин (скорость деформирования $0,009 \text{ с}^{-1}$).

Для получения композиционных высоконаполненных материалов исходили из предположения, что гранулированное пеностекло разрушается под нагрузкой постепенно. Сжатие гранул в замкнутом объеме приводит к разрушению ячеек в местах контакта гранул и преобразованию формы гранул из сферической в многогранную, близкую к пентадодекаэдру. Для подтверждения этого предположения был проведен эксперимент по определению объемной деформации от удельной нагрузки. Зависимость напряжения сжатия, равного по модулю удельной нагрузке P , для гранул фракции 2,0–5,0 мм от объемной деформации представлена на рис. 1.

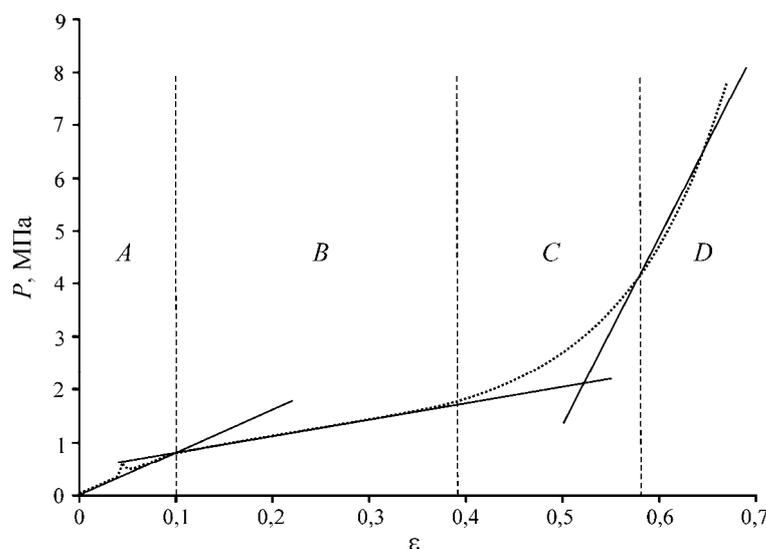


Рис. 1. Зависимость напряжения сжатия P для гранул фракции 2,0–5,0 мм от объемной деформации ε

На кривой можно выделить четыре участка, обозначенных на рис. 1 как A , B , C и D . Участки A , B и D аппроксимируются прямыми линиями с величиной квадратичной достоверности аппроксимации более 0,95. Участок C можно считать переходным. Наблюдаемый характер кривой можно объяснить различиями в механизме деформации гранул при росте нагрузки. Первый этап A связан с упругой деформацией гранул пеностекла как целых сферических изделий, плотно упакованных в замкнутом объеме цилиндра. При росте нагрузки на участке B происходит разрушение поверхностных ячеек гранул, центры гранул сближаются и свободное пространство между гранулами уменьшается, заполняясь обломками разрушенных поверхностных ячеек.

В дальнейшем на участке C в гранулах практически не остается неразрушенных ячеек и происходит хаотичное разрушение обломков материала, пока к началу участка D материал не представляет собой плотную упаковку из обломков стекла и не начинается упругая деформация этого слоя. Можно считать, что в пределах участка B нагрузка на слой обеспечивает такое разрушение поверхностного слоя гранул, что объем заполнен гранулами, сохраняющими ячеистую структуру. Исходя из этого определение нижнего и верхнего пределов удельной нагрузки участка B позволяет выявить условия изготовления композиционного материала с высокой долей заполнения объема ячеистым материалом.

В целом представленный вид кривых не характерен для сжатия гранул в цилиндре. Характерные зависимости «усилие – перемещение» при статическом сжатии гранул обычно пред-

ставляют собой равномерно увеличивающееся напряжение с падениями, обусловленными началом потери сплошности гранулы [10]. Вероятно, при сжатии пеностеклянная гранула ведет себя как упругое тело только на начальном этапе, а в дальнейшем деформируется за счет разрушения поверхностных ячеек без потери общей сплошности гранул. Гранула необратимо «сминается» окружающими ее гранулами.

В процессе изготовления композиционного материала очевидное влияние на свойства получаемого материала оказывает плотность упаковки наполнителя, регулируемая в описываемом случае давлением при формовании заготовки. В общем случае плотность упаковки сферических частиц в объеме хорошо изучена.

Задача получения композиционного материала с максимальной объемной долей наполнителя с математической точки зрения сводится к задаче плотной упаковки частиц наполнителя. В случае сферических частиц возможным решением является расчет доли сферических частиц в композиции с различными расчетными отношениями радиусов. Так, в статье [11] описаны результаты теоретических и экспериментальных исследований получения порошковых наполнителей с относительной плотностью более 0,5 путем корректировки фракционного состава. Для достижения указанной плотности был использован метод подбора фракционного состава порошка сферической формы корунда, основанный на известных теоретических моделях регулярной и случайной плотной упаковки полидисперсных сфер. Задача плотной упаковки монодисперсных регулярных частиц на практике требует 3D-механической вибрации для достижения приемлемых результатов [12].

Результатом выявленного механизма разрушения полиячеистого гранулированного материала является снижение кажущейся плотности слоя гранул при сжатии без разрушения ячейки структуры основного объема материала. На границе между гранулами по мере сжатия слоя ячеистого материала уменьшается свободный объем, и пространство между гранулами заполняется обломками ячеек, разрушенных в местах контакта гранул. Ввиду этого если изначально ячеистые гранулы покрыты слоем материала матрицы, то при сжатии слоя происходит уменьшение свободного пространства между гранулами и формирование трехмерной сетки матрицы с расположенными в ней зернами наполнителя, приобретающими форму додекаэдров. Обломки ячеек в местах контакта исходных сферических гранул входят при этом в структуру матрицы. В результате доля объема наполнителя может существенно превышать характерные для сферического наполнителя 60–70 об. %.

В результате появляется возможность формировать прессованием высоконаполненные композиционные материалы с необычно высоким содержанием наполнителя в виде гранулированного полиячеистого силикатного материала, что позволяет изготавливать материал с низкой кажущейся плотностью.

Основными требованиями к полиячеистому наполнителю в этом случае являются равномерное распределение размеров ячеек по глубине гранулы, невысокая плотность и высокая прочность материала. Исходя из этого собственно материалом следует рассмотреть плавный силикат. Образование полиячеистой структуры в этом случае возможно вследствие газообразования внутри расплавленной стеклообразной матрицы. По такому механизму получают пеностекло и пенокерамика.

Однако в процессе сушки сырцовых гранул происходит массоперенос растворенного силиката натрия, используемого в качестве связки, к поверхности гранул, поэтому следует ожидать повышенной концентрации Na^+ в наружном слое гранул. Неравномерность распределения компонентов по толщине гранулы должна приводить, в свою очередь, к недопустимости разрушения гранул и неоднородности гранул, возникающей в процессе термообработки.

С другой стороны, для предотвращения миграции раствора силиката в процессе сушки предложено использовать эффект золь-гель перехода и отверждения исходной композиции [13]. Для предотвращения миграции Na^+ к поверхности сырцовых гранул к исходному дисперсному стеклу было добавлено 0,2 мас. % силикагеля, чтобы вызвать гелеобразование в процессе суш-

ки. В этом случае распределение Na^+ по толщине гранулы оказывается равномерным и полученный после термообработки продукт имеет равномерную по глубине структуру ячеек.

Термообработку гранул проводили в муфельной печи, а не во вращающейся, для предотвращения сжатия внешнего слоя получаемого термопластичного материала. Готовые пористые гранулы разрезали и исследовали методом оптической микроскопии средний диаметр ячеек в зависимости от расстояния до поверхности гранулы.

Полученные результаты представлены на рис. 2. В образце, полученном по обычной технологии гранулирования порошка стекла с добавлением раствора жидкого стекла, во внешнем слое готовой гранулы, вблизи поверхности, находятся крупные ячейки, в 2–2,5 раза превышающие размер ячеек внутри гранулы.

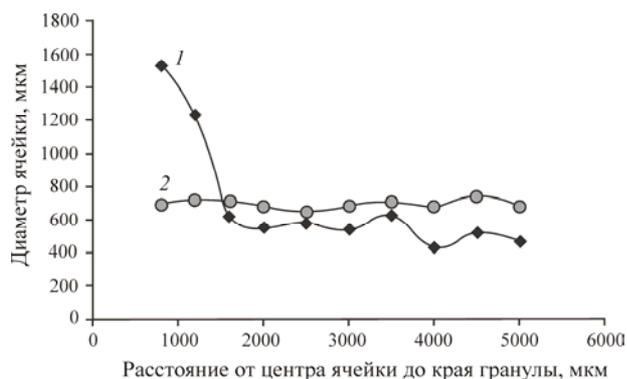


Рис. 2. Средний диаметр ячеек в зависимости от расстояния до поверхности гранулы: 1 – образец при возможности миграции раствора силиката в сырцовой грануле; 2 – сырцовая гранула получена при гелеобразовании раствора силиката

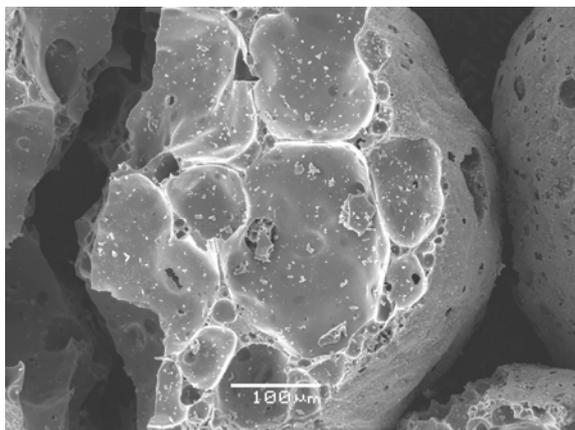


Рис. 3. Микрофотография скола пористой гранулы

способствующих снижению температуры плавления. Так, на рис. 3 представлено фото скола гранулы, на котором отчетливо видно равномерное распределение размеров ячеек по глубине гранулы.

В результате подавления процесса массопереноса ионов Na^+ в гранулах сырца при сушке появляется возможность получать равномерный по глубине ячеистый материал, как показано на рис. 4.

Эффект может быть объяснен понижением вязкости расплава стекла в термопластичном состоянии вследствие повышенной концентрации Na^+ в поверхностном слое сырцовой гранулы. Этого явления не наблюдается у готовых гранул пеностекла, полученных по методу, предотвращающему миграцию раствора в сырцовой грануле при сушке.

Можно заключить, что стандартное приготовление сырцовых гранул для производства пористого силикатного наполнителя из порошка стекла и раствора жидкого стекла приводит к неравномерному распределению компонентов связки по толщине сырцовой гранулы, что связано с явлениями массопереноса в готовом пористом теле. Это явление приводит к таким негативным практическим последствиям, как невысокая прочность сырцовых гранул, недопустимость их дробления для уменьшения фракции и неравномерность размеров ячеек по глубине в готовой пористой грануле.

Для предотвращения этих негативных явлений процесс массопереноса при сушке гранул может быть подавлен осуществлением золь-гель перехода, основой для которого могут быть соединения, вызывающие гелирование, в частности аморфный оксид кремния. Полученные сырцовые гранулы отличаются равномерным распределением компонентов, в том числе и ионов Na^+ , спо-

Перспективы применения полиячеистого гранулированного наполнителя для производства синтактических ПКМ обусловлены также возможностью применения в качестве сырья для изготовления такого наполнителя отходов стекла как компонента твердых коммунальных отходов, что не только решает экологическую проблему вторичного использования стеклобоя, но и существенно снижает стоимость производимого продукта [14].

Для изготовления композиционных материалов из полученных полиячеистых гранул и полимерной матрицы были выбраны два типа полимеров – полиэфир и полиуретан. Образцы получали смешением пеностеклянных гранул фракции 0,85–1,4 с полимером и прессованием полученной композиции при заданном давлении объемного сжатия. Для сравнения были изготовлены контрольные образцы из чистых полимеров методом заливки в формы: E0 из чистого полиэфира и U0 из чистого полиуретана. Условия приготовления образцов и полученные характеристики представлены в таблице.

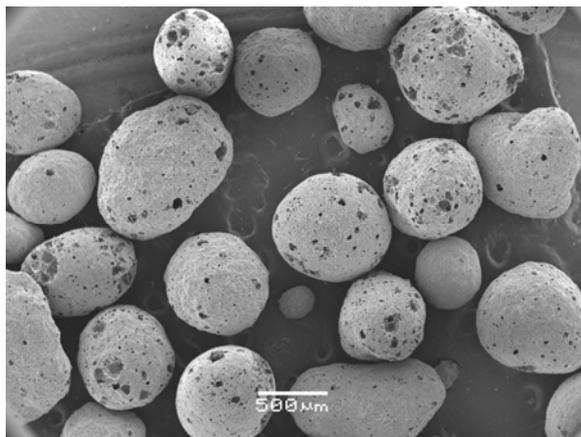


Рис. 4. Микрофотография гранулированного полиячеистого материала

Условия приготовления и свойства полученных композиционных материалов

Образец	Материал матрицы	Массовая доля матрицы от массы наполнителя	Нагрузка прессования, МПа	Плотность готового материала, кг/м ³	Объемная доля наполнителя, об. %	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
e02	Полиэфир	0,15	2,9	477	93,5	0,101
e03	Полиэфир	0,15	4,8	611	91,7	0,129
e04	Полиэфир	0,15	6,7	682	90,7	0,148
u02	Полиуретан	0,15	2,9	498	93,0	0,103
u03	Полиуретан	0,15	4,8	633	91,1	0,134
u04	Полиуретан	0,15	6,7	734	89,6	0,159
E0	Полиэфир	Чистый полимер	–	1105	0	–
U0	Полиуретан	Чистый полимер	–	1061	0	–

Полученные композиционные материалы характеризуются низкой плотностью и высокими теплоизоляционными свойствами, что позволяет рекомендовать их для облегчения конструкций и теплоизоляции, однако свойствами, определяющими области применения, являются механические характеристики. Очевидно, увеличение давления объемного сжатия при изготовлении образцов приводит к сближению центров гранул при одновременном разрушении периферийных ячеек, что сопровождается ростом кажущейся плотности при неизменном массовом соотношении материалов матрицы и наполнителя. При этом объемная доля наполнителя может достигать величины порядка 90 об. %, что невозможно для моноячеистых сферических наполнителей.

В свою очередь, рост кажущейся плотности ведет к увеличению предела прочности полученного композиционного материала, что можно наблюдать на рис. 5 для полиэфирной матрицы.

Наблюдаемое разрушение ПКМ под воздействием нагрузки аналогично для синтактических пен с наполнителем из микросфер [15]. Ввиду этого можно предположить, что замена за-

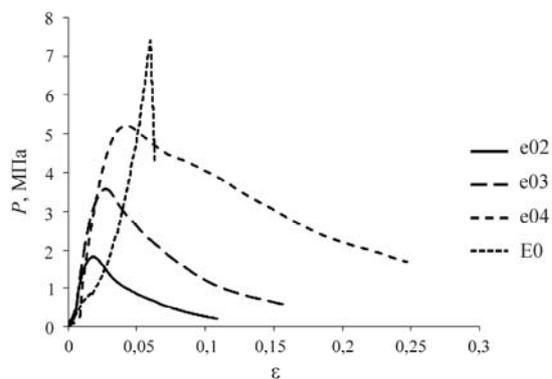


Рис. 5. Зависимости напряжений сжатия от деформаций для композиционных материалов с полиэфирной матрицей

Во всех случаях происходит хрупкое разрушение композиционного материала, даже если полиуретановая матрица обладает пластичными свойствами. Такой характер разрушения может быть объяснен незначительной долей материала матрицы в общем объеме композиционного материала. По сути, деформированные в процессе приготовления пеностеклянные гранулы контактируют друг с другом не только в местах точечных контактов сфер, а по площадкам, образовавшимся при деформации гранул в процессе приготовления.

При этом материал матрицы существенно влияет на величину предельной объемной деформации композиционного материала. В приведенных примерах композиционные материалы с примерно одинаковой плотностью около 700 кг/м^3 в случае полиэфирной матрицы имеют предельную объемную деформацию в 0,05, а для полиуретановой матрицы соответствующее значение почти в 20 раз выше и находится около 0,9.

Исходя из вышеописанных свойств композиционных материалов с полиячеистым гранулированным наполнителем можно предположить наиболее перспективное применение таких материалов для решения задач снижения массы конструкций и создания теплоизоляционных изделий. Конкретное решение для различных вариантов применения композиционных материалов может быть предложено в соответствии со свойствами различных матриц.

Таким образом, замена полых микросфер на полиячеистый силикатный наполнитель открывает новые возможности по созданию синтактических ПКМ не только при существенном снижении стоимости, но и с повышенным объемным содержанием наполнителя, достигающим 90 об. %, что невозможно для микросфер. Дополнительным преимуществом в пользу применения гранулированного полиячеистого силикатного наполнителя для создания синтактических ПКМ служит его экологическая безопасность.

Библиографический список

1. Шайдурова Г.И., Васильев И.Л., Карманова Л.И. Разработка и подтверждение работоспособности ремонтного состава для наружного теплозащитного покрытия // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 36. – С. 49–63.
2. Kulesa A.T., Robinson M.J. Analytical study of structural thermal insulating syntactic foams // Composite Struct. – 2015. – Vol. 119. – P. 551–558.
3. Захаров А.Г., Аношкин А.Н., Копьев В.Ф. Исследование новых видов наполнителей из полимерных композиционных материалов для многослойных звукопоглощающих конструкций // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 51. – С. 95–103.
4. Nikhil Gupta, Eyassu Woldeesenbet Hygrothermal studies on syntactic foams and compressive strength determination // Composite Struct. – 2003. – No. 61(4). – P. 311–320.

5. Merve Ozkutlu, Cerag Dilek, Goknur Bayram Effects of hollow glass microsphere density and surface modification on the mechanical and thermal properties of poly(methyl methacrylate) syntactic foams // *Composite Struct.* – 2018. – No. 202. – P. 545–550.
6. Applications of polymer matrix syntactic foams / Nikhil Gupta, Steven E. Zeltmann, Vasanth Chakravarthy Shunmugasamy, Dinesh Pinisetty // *JOM.* – 2014. – Vol. 66, no. 2. – P. 245–254.
7. Giancarlo C. Righini glassy microspheres for energy applications // *Micromachines.* – 2018. – No. 9(8). – P. 379–390.
8. Композиционные материалы с использованием полых микросфер / Е.Ю. Аристова, В.А. Денисова, В.С. Дрожжин, М.Д. Куваев, С.А. Куликов, Н.В. Максимова, И.В. Пикулин, Г.А. Потемкин, С.А. Редюшев, Г.Ю. Самсонов, Ю.В. Скорочкин // *Авиационные материалы и технологии.* – 2018. – Т. 50, № 1. – С. 52–57.
9. Процессы образования и основные свойства полых алюмосиликатных микросфер в золах уноса тепловых электростанций / В.С. Дрожжин, М.Д. Куваев, И.В. Пикулин [и др.] // *Химия твердого топлива.* – 2008. – № 2. – С. 53–66.
10. Гавриленко С.Л., Шилько С.В. Анализ прочности сферических гранул методами механик и контактного взаимодействия // *Механика машин, механизмов и материалов.* – 2014. – Т. 27, № 2. – С. 56–59.
11. Smirnov A., Ponomarev S., Vasin A. Dense packing of poly-fractional powder of ceramic materials // *Int. Conf. on Modern Trends in Manuf. Techn. and Equipment 2018: Materials Today Proc.* – 2019. – Vol. 11, part 1. – P. 504–509.
12. DEM dynamic simulation of tetrahedral particle packing under 3D mechanical vibration / B. Zhao, X. An, Y. Wang, Q. Qian, X. Yang, X. Sun // *Powder Techn.* – 2017. – No. 317. – P. 171–180.
13. Вайсман Я.И., Кетов Ю.А. Массоперенос раствора силиката при сушке сырцовых гранул в технологии гранулированного пеностекла // *Строительные материалы.* – 2015. – № 1. – С. 27–29.
14. Кетов П.А., Кетов Ю.А. Ресурсный потенциал отходов стекла – компонента ТКО как основа для выбора экономически обоснованной технологии их переработки // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика.* – 2018. – № 4. – С. 47–57.
15. The compressive properties of expandable microspheres/epoxy foams / Lijun Wang, Xu Yang, Jing Zhang, Chun Zhang, Li He // *Composites. Part B. Engineering.* – 2014. – No. 56. – P. 724–732.

References

1. Shaidurova G.I., Vasilev I.L., Karmanova L.I. Razrabotka i podtverzhdenie rabotosposobnosti remontnogo sostava dlya naruzhnogo teplozashchitnogo pokrytiya [Development and confirmation of serviceability of repair composition for external heat protection coating]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2014, no. 36, pp. 49-63.
2. Kulesa A.T., Robinson M.J. Analytical study of structural thermal insulating syntactic foams. *Composite Structures*, 2015, 119, pp. 551-558.
3. Zakharov A.G., Anoshkin A.N., Kopev V.F. Issledovanie novykh vidov zapolnitelei iz polimernykh kompozitsionnykh materialov dlya mnogoslainnykh zvukopogloshchayushchikh konstruksii [Investigation of new types of fillers from polymer composite materials for multilayer sound-absorbing structures]. // *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2017, no. 51, pp. 95-103.
4. Nikhil Gupta, Eyassu Woldeesenbet Hygrothermal studies on syntactic foams and compressive strength determination. *Composite Structures*, 2003, 61(4), pp. 311-320.
5. Merve Ozkutlu, Cerag Dilek, Goknur Bayram Effects of hollow glass microsphere density and surface modification on the mechanical and thermal properties of poly(methyl methacrylate) syntactic foams. *Composite Structures*, 2018, 202, pp. 545-550.
6. Nikhil Gupta, Steven E. Zeltmann, Vasanth Chakravarthy Shunmugasamy, Dinesh Pinisetty Applications of Polymer Matrix Syntactic Foams. *JOM*, 2014, vol. 66, no. 2, pp. 245-254.
7. Giancarlo C. Righini Glassy Microspheres for Energy Applications. *Micromachines*, 2018, no. 9(8), pp. 379-390.
8. Aristova E.Yu., Denisova V.A., Drozhzhin V.S., Kuvaev M.D., Kulikov S.A., Maksimova N.V., Pikulin I.V., Potemkin G.A., Redyushev S.A., Samsonov G.Yu., Skorochkin Yu.V. Kompozitsionnye materialy s ispol'zovaniem polykh mikrosfer [Hollow microsphere composites]. *Aviation materials and technologies*, 2018, vol. 50, no. 1, pp. 52-57.

9. Drozhzhin V.S., Kuvaev M.D., Pikulin I.V. Protsessy obrazovaniya i osnovnye svoistva polykh alyu-mosilikatnykh mikrosfer v zolakh unosa teplovykh elektrostantsii [Formation processes and main properties of hollow aluminosilicate microspheres in fly ash of thermal power plants]. Chemistry of solid fuel, 2008, no. 2, pp. 53-66.

10. Gavrilenko S.L., Shil'ko S.V. Analiz prochnosti sfericheskikh granul metodami mekhanik i kontaktного vzaimodeistviya [Analysis of strength of spherical granules by mechanics and contact interaction methods]. Mechanics of machines, mechanisms and materials, 2014, vol. 27, no. 2, pp. 56-59.

11. Smirnov A., Ponomarev S., Vasin A. Dense Packing of Poly-Fractional Powder of Ceramic Materials. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2018: Materials Today Processing, 2019, Vol. 11, part 1, pp. 504-509.

12. Zhao B., An X., Wang Y., Qian Q., Yang X., Sun X. DEM dynamic simulation of tetrahedral particle packing under 3D mechanical vibration, Powder Technology, 2017, no. 317, pp. 171-180.

13. Vaisman Ya.I., Ketov Yu.A. Massoprenos rastvora silikata pri sushke syrsovykh granul v tekhnologii granulirovannogo penostekla [Mass transfer of silicate solution during drying of cheese granules in granulated foamed glass technology]. Construction materials, 2015, no. 1, pp. 27-29.

14. Ketov P.A., Ketov Yu.A. Resursnyi potentsial otkhodov stekla – komponenta TKO, kak osnova dlya vybora ekonomicheski obosnovannoi tekhnologii ikh pererabotki [Resource potential of waste glass - a component of solid wastes, as a basis for selection of economically sound technology of their processing]. PNRPU Bulletin. Urban development, 2018, no. 4, pp. 47-57.

15. Lijun Wang, Xu Yang, Jing Zhang, Chun Zhang, Li He. The compressive properties of expandable microspheres/epoxy foams. Composites Part B: Engineering, 2014, 56, pp. 724-732.

Об авторе

Кетов Юрий Александрович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Охрана окружающей среды» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: ketov1992@list.ru).

About the author

Iurii A. Ketov (Perm, Russian Federation) – PhD Student of Environmental Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ketov1992@list.ru).

Получено 29.10.2019