

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ЯЧЕЙСТЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОМПОЗИТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ТЕПЛОТЕХНИКЕ

Соловьева О.В., Соловьев С.А., Шакурова Р.З.

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
solovyeva.ov@kgeu.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Ячеистые керамические материалы и композиты нашли применение во многих отраслях промышленности: энергетике, химической отрасли, строительстве, космонавтике. Благодаря высоким термомеханическим свойствам, стойкости к воздействию высоких температур и низкой плотности, ячеистые керамические материалы широко применяются в качестве теплообменников для рекуперации тепла отходящих газов газотурбинных двигателей, парогазовых установок, промышленных печей и т.д. Целью данной работы является обзор современных ячеистых керамических материалов и композитов, применяемых в теплотехнике, и имеющих различную структуру, свойства и химический состав. МЕТОДЫ. Проведен широкий обзор литературы, посвященной керамическим ячеистым материалам и композитам. Исследовалась как отечественная, так и зарубежная литература. РЕЗУЛЬТАТЫ. Проведен анализ ячеистых керамических материалов с регулярной (решетки) и случайной (пены) структурой. Проанализированы основные факторы, влияющие на свойства керамических пен и решеток. Также исследованы основные методы производства керамических материалов, выявлены их достоинства и недостатки. Проведен обзор современных композитных материалов на основе керамической матрицы, армированной углеродными нанотрубками, графеновыми нанопластинками, углеродными волокнами. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Свойства керамических ячеистых материалов, а также сферы их применения зависят от методов производства и структуры материала. Открытоячеистые пены нашли применение в качестве фильтров, теплообменников, в то время как закрытоячеистые пены используют в качестве тепловой изоляции. Области применения керамических решеток ограничиваются точностью, разрешением и размерами 3D-печати. Таким образом, совершенствование аддитивных технологий производства позволит улучшить характеристики керамических решеток и расширить области их применения.

Ключевые слова: керамика; ячеистый материал; керамическая пена; керамические решетки; рекуператор; композит.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10406, <https://rscf.ru/project/21-79-10406/>.

Для цитирования: Соловьева О.В., Соловьев С.А., Шакурова Р.З. Обзор современных керамических ячеистых материалов и композитов, применяемых в теплотехнике // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 1. С. 82-104. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-82-104.

REVIEW OF MODERN CERAMIC CELLULAR MATERIALS AND COMPOSITES USED IN HEAT ENGINEERING

OV. Soloveva, SA. Solovev, RZ. Shakurova

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
solovyeva.ov@kgeu.ru

Abstract: THE PURPOSE. Cellular ceramic materials and composites have found application in many industries: energy, chemical industry, construction, aerospace. Due to their high thermomechanical properties, resistance to high temperatures and low density, cellular ceramic materials are widely used as heat exchangers for heat recovery from exhaust gases of gas turbine engines, combined-cycle plants, industrial furnaces, etc. The purpose of this work is to review modern cellular ceramic materials and composites used in heat engineering and having different structure, properties and chemical composition. METHODS. We have carried out a broad review of the literature on ceramic cellular materials and composites. We studied both

domestic and foreign literature. **RESULTS.** The analysis of cellular ceramic materials with a regular (lattices) and random (foam) structure has been carried out. The main factors influencing the properties of ceramic foams and lattices are analyzed. Also, the main methods for the production of ceramic materials were studied, their advantages and disadvantages were revealed. A review of modern composite materials based on a ceramic matrix reinforced with carbon nanotubes, graphene nanoplates, and carbon fibers has been carried out. **CONCLUSION.** The properties of ceramic cellular materials, as well as their areas of application, depend on the production methods and the structure of the material. Open-cell foams are used as filters, heat exchangers, while closed-cell foams are used as thermal insulation. Applications for ceramic lattices are limited by the precision, resolution, and size of 3D printing. Thus, the improvement of additive manufacturing technologies will improve the characteristics of ceramic gratings and expand their areas of application.

Keywords: ceramics; cellular material; ceramic foam; ceramic lattices; recuperator; composite.

Acknowledgments: The research was funded by the Russian Science Foundation, grant number 21-79-10406, <https://rscf.ru/en/project/21-79-10406/>.

For citation: Soloveva OV, Solovev SA., Shakurova RZ. Review of modern ceramic cellular materials and composites used in heat engineering. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(1): 82-104. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-82-104.

Введение (Introduction and Literature Review)

Теплообменные аппараты активно используются во многих отраслях промышленности, таких как энергетика, химическая отрасль, пищевая отрасль, нефтепереработка, а также в сфере жилищно-коммунального хозяйства. Нефтяной кризис 1973 года выявил необходимость в энергосбережении и более эффективном использовании энергии. В связи с этим ученые начали разработку высокотемпературных теплообменников, которые использовались для рекуперации тепла в газотурбинных двигателях, системах рекуперации отработанного тепла, системах высокотемпературных топливных элементов и в аэрокосмической промышленности [1, 2]. В литературе высокотемпературные теплообменники описываются как работающие при значениях температуры от 500 до 2000 °С. Работа теплообменников в таких условиях сопровождается рядом проблем: ползучесть материала, снижение прочности с ростом температуры, высокая степень окисления, коррозия и тепловой удар. Большинство материалов, используемых для производства теплообменников (алюминий, медь, сталь) теряют свои тепловые и механические свойства при высоких температурах. В связи с этим для производства высокотемпературных теплообменников предпочтительно применять материалы, которые сохраняют прочность и не разрушаются под воздействием высоких температур. Одним из решений является применение металлических сплавов, однако эти сплавы имеют низкую теплопроводность, а для сохранения прочности при высоких температурах приходится увеличивать толщину стенок теплообменников. В свою очередь, это приводит к снижению эффективности теплообмена, увеличению потерь давления, повышению массы и стоимости теплообменника. Керамика имеет преимущество перед металлами, так как сохраняет прочность при высоких температурах, обладает коррозионной и химической стойкостью, а также сопротивлением ползучести [3]. Керамические теплообменники состоят, как правило, из карбида кремния (SiC), нитрида кремния (Si₃N₄), оксида алюминия (Al₂O₃) или диоксида циркония (ZrO₂). В таблице 1 приведены свойства различных керамических материалов. Благодаря высокой температуре разложения (в среднем 2500 °С) и термостойкости наиболее перспективным материалом является карбид кремния.

Таблица 1

Свойства керамических материалов [4, 5]

Свойство	SiC	SiC	Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	ZrO ₂
Плотность, кг/м ³	3100	2200-3200	3200	1900-3000	3900	3450-3990	3500-5900
Теплопроводность, Вт/м·К	125	12.6-200	30	7-43	29	13,8-43,2	0,9-2
Прочность на изгиб, МПа	—	205-540	—	305-900	—	250-382	400-900

Продолжение таблицы 1

Максимальная рабочая температура, °С	1700	–	1900	–	1500	–	–
Температура плавления, °С	2837	–	1900	–	2050	–	–
Коэффициент линейного расширения, 1/К	$4,6 \times 10^{-6}$	2,8- $4,2 \times 10^{-6}$	$3,5 \times 10^{-6}$	1,5- $3,6 \times 10^{-6}$	$7,1 \times 10^{-6}$	$4,5-8 \times 10^{-6}$	$7-9 \times 10^{-6}$

Конструктивно керамические рекуператоры могут быть пластинчатыми, трубчатыми или же пористыми. Последний вид рекуператоров обладает высокой эффективностью благодаря развитой площади поверхности теплообмена, низкой плотности и небольшому весу. Пористые керамические теплообменники, в свою очередь, имеют нерегулярную или регулярную структуру. Рекуператоры с нерегулярной структурой называют керамическими пенами, с регулярной структурой – решетками (Рисунок 1). Основными параметрами, характеризующими структуру пористой керамики, являются количество пор на дюйм (pores per inch – PPI), пористость, размер и форма ячейки. Перечисленные параметры оказывают значительное влияние на производительность и эффективность рекуператора. В данной статье представлен обзор пористых керамических материалов для рекуператоров, проведен анализ факторов, влияющих на их тепловые, гидравлические и механические свойства.

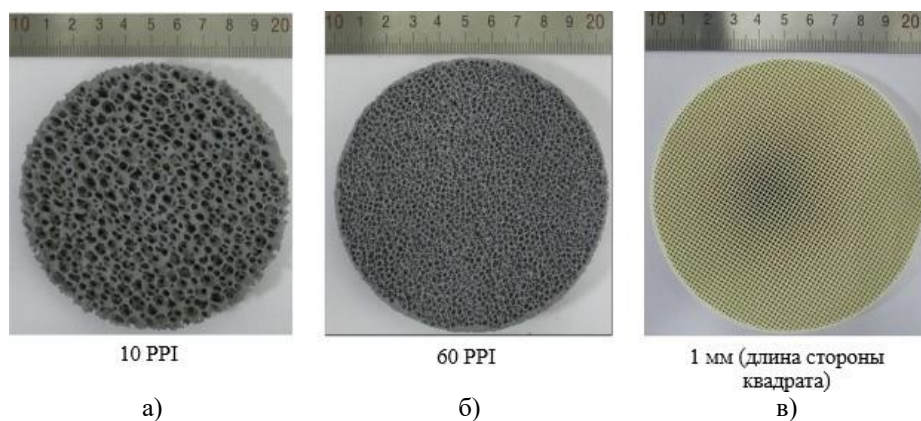


Рис. 1. Фотографии керамических пористых рекуператоров с различной структурой: а) пена с плотностью пор 10 PPI; б) пена с плотностью пор 60 PPI; в) решетка с квадратными ячейками стороной 1 мм [6].

Fig. 1. Photos of ceramic porous recuperators with different structure: a) foam with pore density 10 PPI; b) foam with pore density 60 PPI; v) grating with square cells 1 mm [6].

1. Керамические пены

Интерес к керамическим пенам в последние годы возрастает благодаря низкой плотности и высоким механическим, тепловым и акустическим свойствам. Керамические пены применяют в качестве теплообменников [7], фильтров [8], катализаторов [9], а также в аэрокосмической отрасли и медицине [10]. Свойства пенокерамики во многом зависят от структуры материала, а именно: от типа и размера ячеек, пористости, плотности ячеек и толщины перегородок. Контроль этих параметров позволяет производить керамические пены с характеристиками, необходимыми для конкретного приложения. Керамические пены с закрытыми ячейками используются в качестве тепловой изоляции, а пены с открытыми ячейками нашли применение в качестве фильтров расплавленных металлов, катализаторов и теплообменников.

Материалы и методы (Materials and methods)

Создание керамических пен с различной структурой и свойствами требует и различных методов производства. На сегодняшний день известны следующие методы получения керамических пен: репликация, частичное спекание, вспенивание, метод жертвенного шаблона и т.д. На рисунке 2 представлены четыре способа производства керамической пены и их основные приложения.

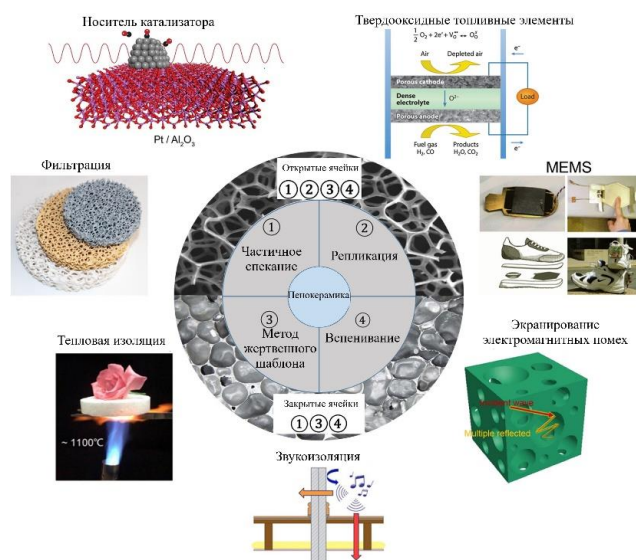


Рис. 2. Методы производства керамических пен и их применение [11].

Fig. 2. Methods of ceramic foam production and their application [11].

Метод частичного спекания является одним из наиболее простых для получения пористой керамики, так как для его реализации требуются более низкие температуры. Структура керамической пены, полученной данным методом, зависит от размера частиц исходного порошка, его количества и условий спекания (температура, давление). Например, увеличение давления формования и температуры спекания приводит к снижению пористости конечного образца, вместе с тем повышается его прочность. В таблице 2 приведены свойства образцов керамической пены, полученных при различных условиях спекания.

Таблица 2.

Физические свойства керамических пен, полученных при различных условиях спекания

Материал	Условия спекания	Пористость, %	Размер ячеек, мкм
Al ₂ O ₃ [12]	Спекание без давления	20-40	—
Al ₂ O ₃ [13]	Искровое плазменное спекание	20-63	<1
Si ₃ N ₄ [14]	Спекание без давления	2-36	2-5
Si ₃ N ₄ [15]	Горячее прессование	16-54	—
SiC [16]	Спекание без давления	34-42	<1
SiC [17]	Искровое плазменное спекание	32-42	—
ZrB ₂ -SiC [18]	Горячее прессование	12-29	1,7-1,9
ZrB ₂ [19]	Искровое плазменное спекание	21-38	3

Температура спекания также оказывает влияние на структуру и свойства керамической пены. В работе [13] авторы исследовали физические и механические свойства керамической пены на основе оксида алюминия, изготовленной при температурах спекания от 1000 до 1200 °С. При неизменном давлении 10 МПа увеличение температуры спекания привело к снижению пористости пены с 63 до 20%, уменьшению площади поверхности с 80 до 4 м²/г и увеличению прочности на изгиб с 3 до 375 МПа.

Метод репликации полимерной пены, запатентованный Карлом Шварцвальдером и Артуром Сомерсом в 1963 году, получил широкое распространение благодаря возможности контролировать структуру пенокерамики [20]. Этот метод реализуется путем нанесения на полимерную пену керамической суспензии с последующим выжиганием полимерной пены в процессе спекания. В результате получается керамическая пена со структурой исходной полимерной пены. Свойства керамической пены, полученной методом репликации, зависят от вязкости суспензии и морфологии полимерной пены (плотность, размер и геометрия ячеек) [21]. В работе [22] Luyten и др. создали образцы керамической пены на основе образцов пенополиуретана с различной плотностью и размерами ячеек. Полученные керамические пены из оксида алюминия

повторяли структуру полимерных пен и имели те же значения размера ячеек, что и исходные образцы пенополиуретана.

В методе жертвенного шаблона создается негативная копия пены в виде, например, полых или плотных полимерных сфер. Размер, форма и положение шаблонного материала позволяет настроить пористость, размер пор и их распределение по размерам. В работе [23] авторы исследовали влияние типа шаблонного материала (полимерные или стеклоуглеродные сферы) на свойства пенокерамики. Результаты экспериментальных исследований показали, что увеличение размера сфер привело к уменьшению термического разложения образца и выхода летучих веществ. Керамические пены, изготовленные с использованием стеклоуглеродных сфер, показали меньшую прочность. Помимо материала сфер, на механические свойства пены оказало влияние скорость нагрева: повышение скорости нагрева привело к снижению плотности пены. Oset и др. [24] провели исследование влияния размера вспененных полимерных микросфер (12-40 мкм) на свойства керамической пены. Полученные образцы пен имели размеры пор от 13,2 до 42,6 мкм, при этом чем больше размер полимерной сферы, тем больший размер имели поры. Пены с меньшим размером ячеек показали более высокую прочность на сжатие. Авторы также оценили влияние количества микросфер, вводимых в суспензию, и пришли к выводу о том, что увеличение количества микросфер приводит к формированию пены с более высокой пористостью. Таким образом, материал сфер, их размер и количество оказывают влияние на характеристики керамической пены, изготовленной методом жертвенного шаблона. Тем не менее, у данного метода имеется существенный недостаток: удаление органического материала занимает много времени и может привести к деформации керамической пены.

Метод вспенивания подразумевает барботаж газа через суспензию с добавлением поверхностно-активных веществ. Данный метод, в отличие от репликации, позволяет производить пены с меньшей пористостью и преимущественно закрытыми ячейками. Керамические пены, произведенные методом вспенивания, имеют низкую проницаемость и высокую прочность. Свойства керамических пен в этом случае зависят от содержания поверхностно-активного вещества (ПАВ), количества твердых частиц в суспензии и условий пенообразования. Leng и др. [25] исследовали свойства нескольких образцов пенокерамики, изготовленных с различным содержанием твердых частиц. Результаты исследований показали, что уменьшение содержания твердых частиц приводит к увеличению пористости, размера ячеек и ухудшению механической прочности. Du и др. [26] исследовали влияние содержания ПАВ на характеристики керамической пены и выяснили, что увеличение содержания ПАВ приводит к повышению коэффициента расширения и улучшает гидрофобность пены. Таким образом, свойства керамической пены зависят от структуры. Структура, в свою очередь, определяется методом и условиями производства пены. Наибольшая эффективность применения керамической пены в конкретном приложении достигается путем выбора метода и оптимальных условий производства пены.

В таблице 3 представлены характеристики керамических пен, изготовленных различными способами. Анализируя данные, представленные в таблице, можно сделать вывод: пены, изготовленные путем прямого вспенивания или частичного спекания, имеют более низкую механическую прочность из-за открытой структуры.

Таблица 3

Характеристики керамических пен, полученных различными методами производства

Материал	Метод производства	Пористость, %	Размер ячеек, мкм	Плотность, кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа	Ссылка
Al ₂ O ₃	Прямое вспенивание	49-88	100-320	400	—	[27]
Al ₂ O ₃	Прямое вспенивание	93-97,5	500-3500	3900	—	[28]
SiC	Прямое вспенивание	36,8-51,4	70-110	1050-1390	28,3-58	[29]
Al ₂ O ₃	Прямое вспенивание	83-97	325-500	—	—	[30]
Al ₂ O ₃	Частичное спекание	79,9-88,7	—	—	0,2-6,7	[31]

Продолжение таблицы 3

Al ₂ O ₃	Частичное спекание	72,41-77,09	21,4-24,2	–	0,18-0,72	[32]
ZrB ₂	Репликация	>70	10-20	–	4,8	[33]
Al ₂ O ₃	Репликация	50-93	170-900	–	–	[34]
SiC	Репликация	84,3-85,9	–	–	0,06-1,933	[35]
SiC	Репликация	–	–	370-480	0,33-0,79	[36]
SiC	Репликация	–	2100-3200	290-650	0,32-1,59	[37]
SiC	Жертвенный шаблон	32-64	–	–	57-63	[38]
SiC	Жертвенный шаблон	15-60	7-31	–	100-700	[39]

Исследованию параметров, оказывающих влияние на тепловые, гидравлические и механические свойства пористых материалов, посвящено множество работ [40-44].

В зависимости от пористости, размера и геометрии ячеек, свойства керамической пены и эффективность её применения различны. Wu и др. [45] провели численные и экспериментальные исследования перепада давления в керамических пенах. Авторы исследовали характеристики пенокерамики до и после добавления дополнительных отверстий, которые были сделаны с целью снижения перепада давления. Результаты исследований показали, что перепад давления в образцах с дополнительными отверстиями снижается до 70%. В следующей работе Wu и др. [46] провели численные исследования влияния пористости и размера ячеек на тепловые свойства керамической пены. Пористость пен изменялась от 70 до 85,6%, размер ячеек от 1,4 до 2,8 мм, исследования проводились при скорости потока теплоносителя от 1 до 4 м/с. Результаты исследований показали, что увеличение размера ячейки приводит к снижению коэффициента теплопередачи. Повышение скорости теплоносителя, напротив, способствует повышению коэффициента теплопередачи. Изменение пористости в диапазоне 70-85% не оказало существенного влияния на теплопередачу. Patil и др. [47] провели экспериментальные исследования характеристик солнечного воздушного ресивера с пористыми керамическими поглотителями. Авторы исследовали влияние PPI на тепловой КПД ресивера. Результаты исследований показали, что пена с плотностью ячеек 10 PPI обеспечивает больший тепловой КПД (до 0,69), чем пены с 20 и 30 PPI, и обеспечивает более высокую температуру воздуха на выходе 1133 °С. Iasiello и др. [48] провели численные исследования теплообмена в функционально-градиентной пене. Пористость пены и размер ячеек увеличивались в направлении теплового потока. Результаты исследований показали, что функционально-градиентная керамическая пена с увеличением PPI и пористости в направлении теплового потока имеет лучшие тепловые характеристики, чем пены с однородной пористостью и PPI. Эффективность градиентных пен на 38-42% превысила эффективность пен с однородной структурой. В работе [49] авторы провели исследования перепада давления в пенокерамических катализаторах с различными значениями плотности ячеек и пришли к выводу, что повышение PPI приводит к увеличению перепада давления. В работе [50] Barreto и др. исследовали влияние пористости и размера ячеек на характеристики солнечного ресивера с керамической пеной. Результаты исследований показали, что максимальная эффективность ресивера достигается при оптимальном размере пор и значении пористости. При увеличении пористости пены оптимальный размер пор уменьшается: для керамической пены с пористостью 85% оптимальный размер пор составил 4,5 мм, для пены с пористостью 90% оптимальный размер пор – 3 мм.

Pusterla и др. [51] провели исследования влияния морфологии керамической пены на тепловые свойства. Авторы изменяли такие параметры, как угол наклона ячейки и пористость. Изменение пористости осуществляли путем увеличения/уменьшения толщины перегородок. Согласно результатам исследования, увеличение пористости пены приводит к значительному снижению теплопроводности. Увеличение угла наклона ячеек, наоборот, привело к повышению теплопроводности пены. Следует отметить, что влияние пористости на тепловые свойства будет различным для пен и решеток с разными морфологиями ячеек [52]. Похожее исследование провели Shahrzadi и др. [13] изучив характеристики объемно-центрированной кубической решетки с различной толщиной перегородок. Структура с перегородками большего диаметра показала наибольшее сопротивление потоку, т.е. наибольшие значения потерь давления 12 Па/м. Увеличение диаметра перегородок приводит к увеличению эффективной теплопроводности решетки

за счет повышения вклада теплопроводности твердой матрицы, несмотря на снижение вклада лучистого теплообмена и конвекции. Механические свойства теплообменника также улучшаются при увеличении диаметра перегородки.

Ну и др. [53] исследовали влияние плотности пор и пористости на коэффициент теплопередачи в керамических пенах. Результаты численных исследований показали, что коэффициент теплопередачи напрямую зависит от PPI и имеет обратную зависимость и от пористости пены. Потери давления ΔP увеличиваются с повышением PPI и уменьшаются с увеличением пористости, при этом ΔP более чувствителен к пористости, чем к PPI. Хи и др. [54] провели экспериментальные исследования конвективного теплообмена в пенокерамике. Авторы оценили влияние пористости, размера ячеек и длины теплообменника на тепловые свойства. Пористость образцов изменялась в диапазоне 75–85 %, плотность пор 30–60 PPI, длина 30–105 мм. Результаты исследований показали, что плотность пор оказывает существенное влияние на коэффициент теплопередачи: при увеличении с 30 до 60 PPI объемный коэффициент теплопередачи увеличился с $5 \cdot 10^4$ до $1,75 \cdot 10^5$ Вт/(м³К). Увеличение пористости пены, напротив, ведет к ухудшению теплопередачи. Увеличение длины образца с 30 до 105 мм привело к снижению объемного коэффициента теплопередачи с $2,5 \cdot 10^5$ до $0,8 \cdot 10^5$ Вт/(м³К). Кроме того, увеличение длины образца приводит к значительному повышению перепада давления [55].

Понимание взаимосвязи между структурой и свойствами пенокерамики, ее теплового и механического поведения, позволит существенно повысить эффективность данного материала в различных приложениях. Усовершенствование методов производства и обработки пенокерамики с целью улучшения свойств позволит в будущем значительно расширить область её применения.

2. Керамические решетки

С развитием аддитивных технологий появилась возможность создавать сложные керамические решетчатые структуры с контролируемой морфологией и свойствами. В отличие от пен, имеющих нерегулярную структуру, преимуществом решетчатых регулярных структур является более высокая механическая прочность. Процесс аддитивного производства керамических решеток можно разделить на четыре этапа: построение модели пористой среды, печать модели на 3D-принтере, промывка конечного материала с удалением подложки, термообработка материала с удалением связующей структуры и спеканием. На рисунке 3 представлены наиболее распространенные методы аддитивного производства.

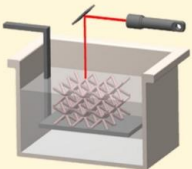
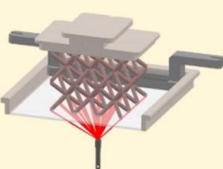
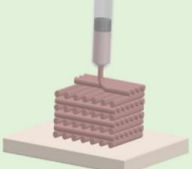
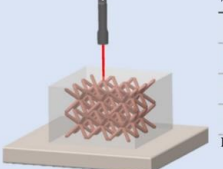
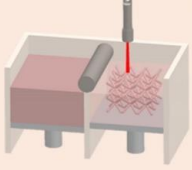
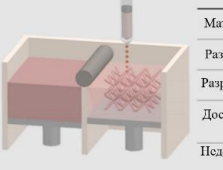
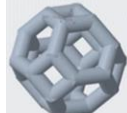
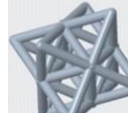
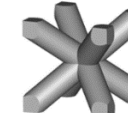
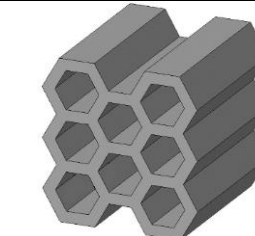
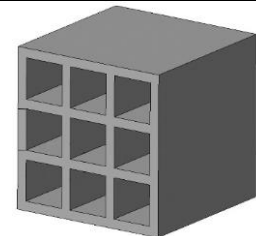
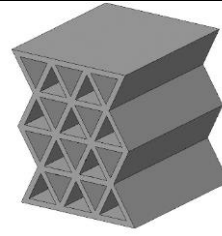
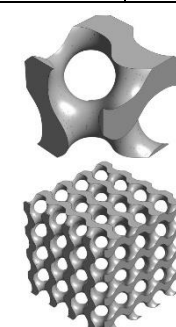
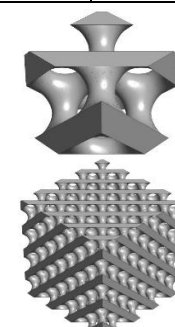
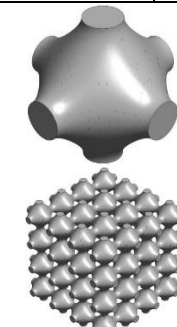
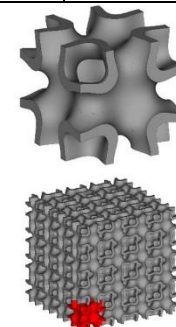
 Лазерная стереолитография (SLA) <table border="1"> <tr><td>Материалы:</td><td>Полимеры, керамика</td></tr> <tr><td>Размер печати:</td><td>В миллиметровом масштабе</td></tr> <tr><td>Разрешение печати:</td><td>10–50 мкм</td></tr> <tr><td>Достоинства:</td><td>Высокое разрешение</td></tr> <tr><td>Недостатки:</td><td>Низкая эффективность, высокий расход материала</td></tr> </table>	Материалы:	Полимеры, керамика	Размер печати:	В миллиметровом масштабе	Разрешение печати:	10–50 мкм	Достоинства:	Высокое разрешение	Недостатки:	Низкая эффективность, высокий расход материала	 Цифровая обработка света (DLP) <table border="1"> <tr><td>Материалы:</td><td>Полимеры, металлы, керамика</td></tr> <tr><td>Размер печати:</td><td>Печать в мм-см масштабе</td></tr> <tr><td>Разрешение печати:</td><td>10–30 мкм</td></tr> <tr><td>Достоинства:</td><td>Высокая точность, высокая эффективность</td></tr> <tr><td>Недостатки:</td><td>Загрязнение плазмой</td></tr> </table>	Материалы:	Полимеры, металлы, керамика	Размер печати:	Печать в мм-см масштабе	Разрешение печати:	10–30 мкм	Достоинства:	Высокая точность, высокая эффективность	Недостатки:	Загрязнение плазмой
Материалы:	Полимеры, керамика																				
Размер печати:	В миллиметровом масштабе																				
Разрешение печати:	10–50 мкм																				
Достоинства:	Высокое разрешение																				
Недостатки:	Низкая эффективность, высокий расход материала																				
Материалы:	Полимеры, металлы, керамика																				
Размер печати:	Печать в мм-см масштабе																				
Разрешение печати:	10–30 мкм																				
Достоинства:	Высокая точность, высокая эффективность																				
Недостатки:	Загрязнение плазмой																				
 Экструзия (EFF) <table border="1"> <tr><td>Материалы:</td><td>Полимеры, металлы, керамика</td></tr> <tr><td>Размер печати:</td><td>Печать в мм масштабе</td></tr> <tr><td>Разрешение печати:</td><td>Более 100 мкм</td></tr> <tr><td>Достоинства:</td><td>Без ограничений по материалам</td></tr> <tr><td>Недостатки:</td><td>Низкое разрешение печати, низкая эффективность</td></tr> </table>	Материалы:	Полимеры, металлы, керамика	Размер печати:	Печать в мм масштабе	Разрешение печати:	Более 100 мкм	Достоинства:	Без ограничений по материалам	Недостатки:	Низкое разрешение печати, низкая эффективность	 Двухфотонная литография (TPL) <table border="1"> <tr><td>Материалы:</td><td>Полимеры, керамика</td></tr> <tr><td>Размер печати:</td><td>Печать в масштабе мкм-мм</td></tr> <tr><td>Разрешение печати:</td><td>мкм</td></tr> <tr><td>Достоинства:</td><td>Высокая точность</td></tr> <tr><td>Недостатки:</td><td>Ограничения по материалу, низкая прочность, низкая эффективность</td></tr> </table>	Материалы:	Полимеры, керамика	Размер печати:	Печать в масштабе мкм-мм	Разрешение печати:	мкм	Достоинства:	Высокая точность	Недостатки:	Ограничения по материалу, низкая прочность, низкая эффективность
Материалы:	Полимеры, металлы, керамика																				
Размер печати:	Печать в мм масштабе																				
Разрешение печати:	Более 100 мкм																				
Достоинства:	Без ограничений по материалам																				
Недостатки:	Низкое разрешение печати, низкая эффективность																				
Материалы:	Полимеры, керамика																				
Размер печати:	Печать в масштабе мкм-мм																				
Разрешение печати:	мкм																				
Достоинства:	Высокая точность																				
Недостатки:	Ограничения по материалу, низкая прочность, низкая эффективность																				
 Селективное лазерное спекание (SLS)/ Селективное лазерное плавление (SLM) <table border="1"> <tr><td>Материалы:</td><td>Полимеры, металлы, керамика</td></tr> <tr><td>Размер печати:</td><td>Печать в масштабе см</td></tr> <tr><td>Разрешение печати:</td><td>мкм-мм</td></tr> <tr><td>Достоинства:</td><td>Высокая эффективность, изготовление деталей больших размеров</td></tr> <tr><td>Недостатки:</td><td>Низкая точность</td></tr> </table>	Материалы:	Полимеры, металлы, керамика	Размер печати:	Печать в масштабе см	Разрешение печати:	мкм-мм	Достоинства:	Высокая эффективность, изготовление деталей больших размеров	Недостатки:	Низкая точность	 Струйная печать (BJ) <table border="1"> <tr><td>Материалы:</td><td>Металлы, керамика</td></tr> <tr><td>Размер печати:</td><td>Печать в масштабе см</td></tr> <tr><td>Разрешение печати:</td><td>мкм-мм</td></tr> <tr><td>Достоинства:</td><td>Низкая цена, изготовление детали из нескольких материалов</td></tr> <tr><td>Недостатки:</td><td>Низкая точность, низкая эффективность</td></tr> </table>	Материалы:	Металлы, керамика	Размер печати:	Печать в масштабе см	Разрешение печати:	мкм-мм	Достоинства:	Низкая цена, изготовление детали из нескольких материалов	Недостатки:	Низкая точность, низкая эффективность
Материалы:	Полимеры, металлы, керамика																				
Размер печати:	Печать в масштабе см																				
Разрешение печати:	мкм-мм																				
Достоинства:	Высокая эффективность, изготовление деталей больших размеров																				
Недостатки:	Низкая точность																				
Материалы:	Металлы, керамика																				
Размер печати:	Печать в масштабе см																				
Разрешение печати:	мкм-мм																				
Достоинства:	Низкая цена, изготовление детали из нескольких материалов																				
Недостатки:	Низкая точность, низкая эффективность																				

Рис. 3. Методы аддитивного производства Fig. 3. Additive production methods [56].

Аддитивные технологии позволяют производить пористые керамические объекты различной структуры и геометрии, которые можно разделить на следующие категории:

решетки, сотовые структуры и трижды периодические минимальные поверхности (TPMS). В таблице 4 представлены примеры перечисленных структур.

Таблица 4.
Типы периодических керамических структур, получаемых с помощью аддитивных технологий

Структура	Примеры структур					
Решетки						
	Кубическая ячейка	Ячейка Кельвина [57]	Ячейка октет [57]	Объемно-центрированная кубическая ячейка [58]	Гране-центрированная кубическая ячейка [59]	
Соты						
	Гексагональная структура [60]	Квадратная структура [60]	Треугольная структура [60]			
Трижды периодические минимальные поверхности						
	Гироид [61]	Ромб [61]	Примитив [61]	IWP [62]		

Структура керамических решетчатых материалов оказывает значительное влияние на тепловые, гидравлические, механические и физические свойства. Влияние формы ячейки на теплообмен и перепад давления в керамической решетчатой структуре исследовали в работе [63]. Авторы численно и экспериментально оценили теплогидравлические свойства керамических решетчатых структур с крестообразной и ромбовидной ячейками. Результаты исследований показали, что ромбовидные решетки обеспечивают более высокую теплопередачу за счет извилистости потока. При площади поверхности аналогичной крестообразной решетке ромбовидные решетки обеспечивают на 38-45% более низкий перепад давления. Таким образом, керамические теплообменники с элементарной ячейкой в форме ромба имеют лучшие теплогидравлические свойства, чем теплообменники с простой крестообразной решеткой.

Wu и др. [64] провели численные исследования теплообмена в микроканальных теплообменниках с простой кубической, объемно-центрированной кубической (ОЦК) и гранецентрированной кубической (ГЦК) решетками. Результаты исследований показали, что структура ГЦК обеспечивает самые высокие значения температуры теплоносителя

на выходе и коэффициента теплоотдачи. При этом ГЦК при невысоких расходах (от $1 \cdot 10^{-5}$ до $2,75 \cdot 10^{-5}$ кг/с) создает больший перепад давления, чем структура простой кубической решетки. При более высоких значениях расхода потери давления в простой кубической решетке превосходят данный показатель у ГЦК. Однако структура ГЦК показала худшие механические характеристики, чем ОЦК. В связи с этим в приложениях, где предъявляются высокие требования как к тепловым, так и к механическим характеристикам, целесообразно применять микроканальные теплообменники со структурой объемно-центрированной решетки.

Relanconi и др. [65] провели численные и экспериментальные исследования лучистого теплообмена в керамических теплообменниках с упорядоченной геометрией. Авторы с помощью аддитивного производства создали три модели теплообменников с геометрией в виде: стандартной решетки (S) с постоянным размером ячеек; решетки с ячейками, увеличивающимися в радиальном направлении (RICS); решетки с ячейками, уменьшающимися в радиальном направлении (RDCS). Далее авторы испытали характеристики теплообменников при температурах от 773 до 973 К. Результаты исследований показали, что решетка RDCS обеспечивает самую высокую температуру (957 К) воздуха на выходе из канала, что более чем в 2 раза превышает температуру воздуха на выходе из пустого канала (466 К). Наименьшую температуру воздуха на выходе, т.е. и наименьшую производительность показала геометрия RICS.

В работе [66] авторы исследовали теплообмен через радиаторы различной геометрии (ромб и гироид), напечатанные на 3D-принтере. Результаты численных и экспериментальных исследований показали, что радиаторы с геометрией ячеек в виде гироида имеют более высокие значения потерь давления, но и более высокие значения коэффициента теплопередачи. Однако, согласно [61], ромбовидные решетки обладают более высокой прочностью. Похожее исследование провели Tang и др. [67], в котором создали трехмерные модели решетчатых структур с геометриями ячеек в виде ромба и гироида. Авторы исследовали конвективную теплопередачу через решетки численно и экспериментально. Результаты сравнивались с характеристиками ребристого теплообменника. Согласно результатам исследований, тепловые характеристики решетчатого теплообменника с ромбовидными ячейками на 84-205% превосходят характеристики оребренного теплообменника. Характеристики гироидной решетки на 55-136% превосходили характеристики оребренного теплообменника.

Керамические теплообменники с геометрией ячейки в форме шестигранника (соты) имеют более высокие тепловые и механические характеристики по сравнению с теплообменниками других геометрий. Согласно результатам исследований [68], керамические теплообменники с сотовой структурой имеют более высокую прочность, чем керамические пены. В случае одноосной нагрузки структура с шестигранными ячейками имеет наибольшую прочность по сравнению со структурами, ячейки которых имеют форму куба, треугольной призмы, ромбододекаэдра или ячейки Кельвина [69, 70].

Yuan и др. [71] провели численные исследования теплообмена в керамических теплообменниках с квадратными и шестигранными ячейками. Авторы выяснили, что коэффициент рекуперации энергии имеет обратную зависимость от размера ячейки. При этом стоит отметить, что уменьшение размеров ячеек ведет к увеличению потерь давления. Теплообменник с квадратными ячейками показал более высокий коэффициент рекуперации, чем теплообменник с шестигранными ячейками. Похожее исследование тепловых и гидравлических свойств теплообменников с ячейками в форме шестигранника, квадрата, ромба и трапеции провели авторы работы [72]. Результаты численных исследований показали, что теплообменник с шестигранными ячейками обеспечивает наименьший перепад давления и относительно высокое число Нуссельта, несмотря на то, что сотовая структура имеет наименьшую площадь поверхности.

В работе [73] авторы исследовали влияние толщины теплообменника и длины стенки сотовых ячеек на тепловые и гидравлические характеристики. Авторы выяснили, что соты с большой длиной стенки обеспечивают хорошие тепловые свойства и низкие значения перепада давления. Также авторы отмечают, что для определенной длины стенки ячейки существует оптимальная толщина теплообменника, обеспечивающая наилучшие тепловые характеристики.

Ozsipahi и др. [74] провели численные исследования теплообмена и перепада давления в радиаторе с шестигранными ячейками. Авторы оценили влияние высоты ребра и продольного шага на тепловое сопротивление и перепад давления в радиаторе. Результаты исследований показали, что увеличение высоты ребра от 20 до 60 мм приводит к значительному снижению теплового сопротивления радиатора, потери

давления при этом возрастают. Увеличение продольного шага, напротив, повышает термическое сопротивление радиатора, т.е. ухудшает теплообмен, и снижает потери давления.

Параккоккинос и др. [75] провели численные исследования реактора охлаждения с шестиугольной сотовой геометрией ячеек. Авторы исследовали влияние радиуса и высоты ячейки на удельную мощность охлаждения и коэффициент полезного действия (КПД) реактора. Результаты исследований показали, что увеличение радиуса ячейки с 1 до 6 мм привело к уменьшению удельной мощности охлаждения с 218,8 до 80,4 Вт/(кг·с) и повышению КПД с 35,6 до 60,6 %. Высота ячейки также оказала влияние на характеристики реактора: увеличение высоты ячейки с 5 до 30 мм привело к уменьшению мощности охлаждения с 159,5 до 86,1 Вт/(кг·с). КПД реактора показал зависимость от толщины перегородки, и составил 59,9% при толщине перегородки 0,5 мм и 36,4% при 3 мм.

Аддитивные технологии позволяют производить керамические решетки сложной геометрии, преодолевая такие ограничения керамики, как обрабатываемость и формуемость. Однако аддитивные технологии не лишены недостатков, среди которых необходимо выделить низкую скорость производства и размер конечного продукта, который ограничивается размерами принтера. Кроме того, в процессе производства нередко появляются мелкие дефекты структуры, возникающие из-за неустойчивого сцепления между слоями материала. В процессе термообработки эти дефекты увеличиваются в размерах, и в последствии приводит к снижению прочности материала. Усовершенствование методов аддитивного производства позволит создавать керамические пористые материалы с регулярной структурой и улучшенными тепловыми и механическими свойствами.

Результаты (Results)

3. Композиты с керамической матрицей

Создание композитных материалов на основе керамической матрицы с повышенными характеристиками позволяет значительно расширить область применения ячеистой керамики. Как отмечалось ранее, керамика обладает высокой температуростойкостью, жаропрочностью и устойчивостью к воздействию окружающей среды. Однако вместе с тем керамические материалы подвержены тепловому удару и повреждаются при изготовлении и обслуживании. Одной из причин создания керамических матричных композитов является необходимость повышения жесткости керамики, сохраняя при этом высокую износостойкость, химическую инертность и другие привлекательные свойства керамики. Керамические матричные композиты нашли применение во многих отраслях промышленности (Рисунок 4).



Рис. 4. Области применения керамических матричных композитов [76].

Fig. 4. Applications of ceramic matrix composites [76].

Существует несколько способов производства матричных композитов, среди которых наибольшее распространение получили химическая инфильтрация из паровой или жидкой фазы, полимерная инфильтрация и пиролиз, а также горячее прессование

(Рисунок 5). В зависимости от метода и условий производства, а также от способа обработки материала, композит будет иметь различные свойства.

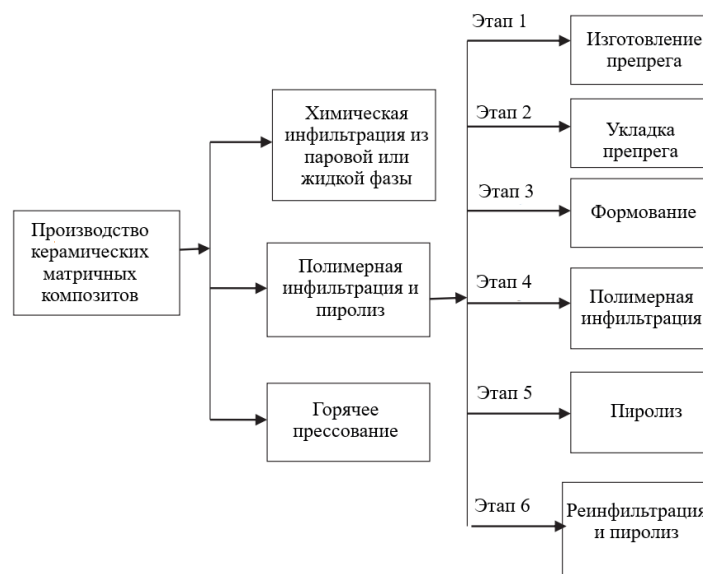


Рис. 5. Методы производства керамических матричных композитов [77].

Fig. 5. Methods of manufacturing ceramic matrix composites [77].

Одним из направлений в создании матричных композитов является добавление в материал матрицы полимера. Такие композиты сочетают в себе твердость, жесткость и износостойкость керамики и эластичность полимера. На свойства композита полимер/пенокерамика влияют морфология пенокерамики и физические свойства полимера. В работе [78] авторы исследовали механические свойства композита из ячеистой керамики (SiC и $\text{SiO}_2\cdot\text{ZrO}_2$) и эпоксивинилэфирной смолы. Плотность пор керамики варьировалась от 10 до 30 PPI. Результаты исследований показали, что увеличение плотности пор способствует повышению прочности композита на сжатие. Более того, композитные материалы показали в целом лучшие механические свойства, чем пены без полимерной пропитки. Помимо улучшенных механических свойств, композиты из полимеров и ячеистой керамики хорошо проявили себя в качестве антиэрозионного материала, повышая стойкость материалов к эрозии шлама [79].

Другим типом композитов на основе ячеистой керамики является нанесение различных покрытий на поверхность керамики. Например, композиты, получаемые путем нанесения микропористых адсорбентов (металлоорганических каркасов) на керамическую матрицу, активно применяются в системах аккумулирования тепла, в качестве катализаторов и т.д. [80, 81]. Свойства такого композита зависят от количества осажденного материала и морфологии пены. В свою очередь, количество осажденного материала также зависит от морфологии пены и её химического состава [82]. Активация поверхности пены путем щелочного травления и нанесением промежуточного покрытия из оксида алюминия позволяет повысить количество осаждаемых частиц и сформировать более однородный слой металлоорганического каркаса. Также щелочное травление позволяет снизить теплопроводность композитного материала. Эффективность осаждения частиц увеличивается при уменьшении размера пор исходного образца пенокерамики, что также оказывает влияние на свойства композита [83]. Керамические пены активно применяются в качестве микропористых катализаторов. Нанесение цеолитного покрытия на керамическую матрицу позволяет добиться расположения каталитических центров на поверхности катализатора, что исключает процесс внутрипоровой диффузии и нежелательное каталитическое влияние связующего вещества. Таким образом повышается каталитическая эффективность [84].

Матричные композиты нашли применение и в области аккумуляции тепловой энергии. Ячеистая керамика используется в качестве матрицы для систем хранения тепла с материалами с фазовым переходом (phase change material – PCM). Такие композиты являются одним из решений для высокотемпературного хранения тепловой энергии. Однако из-за низкой теплопроводности таких композитов, ученые стремятся к разработке матричных керамических композитов с более высокими тепловыми характеристиками. Liu и др. [85] разработали композит на основе пористой керамики из нитрида алюминия AlN и эвтектического PCM из NaCl/LiNO_3 . Композит характеризуется высокой теплопроводностью в диапазоне от 31,8 до 52,63 Вт/мК, при этом энтальпия фазового

перехода достигала 140-186 кДж/кг.

Сообщается о применении керамических композитов в современных интегрированных системах тепловой защиты зданий для замены традиционных металлических сэндвич-панелей с однородным изоляционным материалом. В работе [86] авторы исследуют высокие теплоизоляционные и механические свойства керамических многослойных композитов с градуированным изоляционным материалом. Авторы провели численные исследования теплообмена в композитах C/SiC с наполнителем из стекловолокна, глиноземного волокна или войлока из муллитового волокна. Результаты показали, что благодаря градуированному расположению тепловой изоляции достигается более низкая температура нижнего лицевого листа (130 °C), а благодаря пирамидальной и гофрированной структуре керамических сэндвич-панелей достигается высокая прочность на изгиб.

В аэрокосмической отрасли применение нашли сверхвысокотемпературные керамические матричные композиты (СВТМК) благодаря превосходным физическим и механическим характеристикам. Эти композиты применяют при строительстве ракет и гиперзвуковых транспортных средств, в частности, в соплах, на передних кромках летательного аппарата и в качестве компонента в двигателях. Сообщается, что в качестве СВТМК применяются карбиды, нитриды и бориды ранних переходных металлов [87]. Ввиду воздействия высоких температур на компоненты и обшивку ракет и гиперзвуковых летательных аппаратов, температура плавления СВТМК составляет около 2000 °C. Керамика, благодаря высокой температуростойкости и температуре плавления выше 1500 °C хорошо подходит для применения в аэрокосмической отрасли. Поскольку однофазные монокристаллические материалы очень восприимчивы к тепловому удару, требуется добавление второй фазы, которая повысит ударную вязкость без ухудшения других характеристик. Учеными были предприняты попытки использовать различные добавки к пенокерамике для повышения стойкости к окислению и улучшению термомеханических свойств. Одной из таких добавок являются углеродные нановолокна благодаря их высокой удельной прочности и жесткости, низкому коэффициенту теплового расширения (КТР) и термостойкостью. Характеристики СВТМК, армированного углеродным волокном, изучались в работе Rubio и др. [88]. Авторы измерили теплопроводность и коэффициент теплового расширения параллельно и перпендикулярно волокнам. Результаты исследований показали большие различия между КТР, измеренными вдоль и поперек волокон. Это связано с высокой анизотропией самих углеродных волокон. Такие же расхождения в значениях были получены и для теплопроводности. Тем не менее, СВТМК из диборидов гафния и циркония, армированные углеродным волокном, получили распространение в области гиперзвуковых транспортных средств благодаря температуре плавления, превышающей 2500 °C [89].

В ряде исследований сообщается об армировании керамических матриц графеновыми нанопластинами [90], углеродными нанотрубками [91], углеродным волокном [92], нитевидными нанокристаллами [93] и т.д. Ученые продолжают разрабатывать все новые виды керамических матричных композитов для применения в различных отраслях промышленности.

Заключение

Керамические ячеистые материалы широко применяются в качестве теплообменников во многих отраслях промышленности, что обусловлено их стойкостью к воздействию высоких температур, развитой площадью поверхности и малым весом. В данной статье представлен обзор современных ячеистых керамических материалов, имеющих периодическую и случайную структуру, различный химический состав, а также обзор керамических материалов, синтезированных различными методами. Проанализированы научные работы, посвященные исследованию влияния структуры и химического состава на теплофизические свойства керамических ячеистых теплообменников с целью повысить эффективность их применения в каждом конкретном приложении.

В первом разделе приведен обзор керамических пористых материалов со случайной структурой – керамических пен. Проанализированы основные методы производства керамических пен: частичное спекание, репликация, метод жертвенного шаблона и вспенивание. Методы частичного спекания и репликации позволяют производить керамические пены с открытой ячеистой структурой, обладающие хорошими тепловыми свойствами и вместе с тем имеющими невысокую механическую прочность. Такие керамические пены нашли применение в качестве фильтров расплавленных металлов, носителей катализатора, теплообменников и т.д. Высокотемпературные теплообменники из керамических пен обладают развитой площадью поверхности, благодаря чему обеспечивают большой тепловой поток, в отличие, например, от пластинчатых теплообменников схожего размера. Методы жертвенного шаблона и

вспенивания позволяют производить керамические пены с закрытоячеистой структурой, обладающие высокой термостойкостью и прочностью.

Во втором разделе приведен обзор керамических ячеистых материалов с периодической структурой – керамических решеток. Методы аддитивного производства позволяют производить керамические ячеистые теплообменники с контролируемой структурой и свойствами. Таким образом, появляется возможность создавать теплообменники со свойствами, необходимыми для применения в определенной технологической системе. Исследованы методы аддитивного производства керамических решеток, а именно лазерная стереолитография, цифровая обработка света, экструзия, двухфотонная литография, селективное лазерное плавление, струйная печать. Выявлены достоинства и недостатки перечисленных методов. Современные аддитивные технологии нуждаются в повышении точности печати и в возможности печатать крупные детали. Проведен анализ влияния структуры керамических решеток на физические, тепловые и механические свойства. Основными параметрами, оказывающими влияние на свойства решеток, являются размер и форма ячеек, пористость.

В третьем разделе представлены основные виды композитов с керамической матрицей. Для улучшения характеристик керамических ячеистых материалов в них добавляют углеродные волокна, графеновые нанопластины, углеродные нанотрубки. Керамические композиты нашли применение в аэрокосмической промышленности, медицине, энергетике и автомобильной отрасли. Композиты с керамической матрицей обладают высокой температуростойкостью и активно применяются в системах тепловой защиты.

Литература

1. Jouhara H., Khordehgah N., Almahmoud S., Delpech B., Chauhan A., Tassou S. A. Waste heat recovery technologies and applications // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2018. Vol. 6, pp. 268-289.
2. Zhang C., Gümmer V. High temperature heat exchangers for recuperated rotorcraft powerplants // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 154, pp. 548-561.
3. Sommers A., Wang Q., Han X., T'Joel C., Park Y., Jacobi A. Ceramics and ceramic matrix composites for heat exchangers in advanced thermal systems—A review // *Applied Thermal Engineering*. 2010. Vol. 30, N11-12, pp. 1277-1291.
4. Smyth R. The use of high temperature heat exchangers to increase power plant thermal efficiency // *IECEC-97 Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference* (Cat. No. 97CH6203). IEEE. 1997. Vol. 3, pp. 1690-1695.
5. Liu H. C., Tsuru H., Cooper A. G., Prinz F. B. Rapid prototyping methods of silicon carbide micro heat exchangers // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2005. Vol. 219, N7, pp. 525-538.
6. Dai H., Lin B., Ji K., Wang C., Li Q., Zheng Y., Wang K. Combustion characteristics of low-concentration coal mine methane in ceramic foam burner with embedded alumina pellets // *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 90, pp. 489-498.
7. Xu Z., Lu Y., Wang B., Zhao L., Xiao Y. Experimental study on the off-design performances of a micro humid air turbine cycle: Thermodynamics, emissions and heat exchange // *Energy*. 2021. Vol. 219, pp. 119660.
8. Zhou W., Wu P., Zhang L., Zhu D., Zhao X., Cai Y. Heavy metal ions and particulate pollutants can be effectively removed by a gravity-driven ceramic foam filter optimized by carbon nanotube implantation // *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 421, pp. 126721.
9. Shumilov V., Kirilin A., Tokarev A., Boden S., Schubert M., Hampel U., Hupa, L., Salmin, T., Murzin D. Y. Preparation of γ -Al₂O₃/ α -Al₂O₃ ceramic foams as catalyst carriers via the replica technique // *Catalysis Today*. 2022. Vol. 383, pp. 64-73.
10. Rainer A., Giannitelli S. M., Abbruzzese F., Traversa E., Licoccia S., Trombetta M. Fabrication of bioactive glass–ceramic foams mimicking human bone portions for regenerative medicine // *Acta Biomaterialia*. 2008. Vol. 4, N2, pp. 362-369.
11. Chen Y., Wang N., Ola O., Xia Y., Zhu Y. Porous ceramics: Light in weight but heavy in energy and environment technologies // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2021. Vol. 143, pp. 100589.
12. Hardy D., Green D. J. Mechanical properties of a partially sintered alumina // *Journal of the European Ceramic Society*. 1995. Vol. 15, N8, pp. 769-775.
13. Chakravarty D., Ramesh H., Rao T. N. High strength porous alumina by spark plasma sintering // *Journal of the European Ceramic Society*. 2009. Vol. 29, N8, pp. 1361-1369.
14. Diaz A., Hampshire S., Yang J. F., Ohji T., Kanzaki S. Comparison of mechanical properties of silicon nitrides with controlled porosities produced by different fabrication routes // *Journal of the American Ceramic Society*. 2005. Vol. 88, N3, pp. 698-706.

15. Ohji T. Microstructural design and mechanical properties of porous silicon nitride ceramics //Materials Science and Engineering: A. 2008. Vol. 498, N1-2, pp. 5-11.
16. Fukushima M. Microstructural control of macroporous silicon carbide //Journal of the Ceramic Society of Japan. 2013. Vol. 121, N1410, pp. 162-168.
17. Hotta M., Kita H., Matsuura H., Enomoto N., Hojo J. Pore-size control in porous SiC ceramics prepared by spark plasma sintering //Journal of the Ceramic Society of Japan. 2012. Vol. 120, N1402, pp. 243-247.
18. Jin X., Zhang X., Han J., Hu P., He R. Thermal shock behavior of porous ZrB₂-SiC ceramics //Materials Science and Engineering: A. 2013. Vol. 588, pp. 175-180.
19. Yuan H., Li J., Shen Q., Zhang L. Preparation and thermal conductivity characterization of ZrB₂ porous ceramics fabricated by spark plasma sintering //International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2013. Vol. 36, pp. 225-231.
20. Karl S., Somers A. V. Method of making porous ceramic articles : пат. 3090094 CIIA. 1963.
21. Soy U., Demir A. Fabrication and optimization of boron carbide foams by polymeric sponge replication //Emerging Materials Research. 2020. Vol. 9, N2, pp. 388-395.
22. Luyten J., Thijs I., Vandermeulen W., Mullens S., Wallaey B., Mortelmans R. Strong ceramic foams from polyurethane templates //Advances in applied ceramics. 2005. Vol. 104, N1, pp. 4-8.
23. Hooshmand S., Nordin J., Akhtar F. Porous alumina ceramics by gel casting: Effect of type of sacrificial template on the properties //International Journal of Ceramic Engineering & Science. 2019. Vol. 1, N2, pp. 77-84.
24. Ciurans Oset M., Nordin J., Akhtar F. Processing of macroporous alumina ceramics using pre-expanded polymer microspheres as sacrificial template //Ceramics. 2018. Vol. 1, N2, pp. 329-342.
25. Leng Q., Yao D., Xia Y., Liang H., Zeng Y. P Microstructure and permeability of porous zirconia ceramic foams prepared via direct foaming with mixed surfactants //Journal of the European Ceramic Society. 2022. Vol. 42, N16, pp. 7528-7537.
26. Du Z., Yao D., Xia Y., Zuo K., Yin J., Liang H., Zeng Y. P. The high porosity silicon nitride foams prepared by the direct foaming method //Ceramics International. 2019. Vol. 45, N2, pp. 2124-2130.
27. Gregorová E., Pabst W., Uhlířová T., Nečina V., Veselý M., Sedlářová I. Processing, microstructure and elastic properties of mullite-based ceramic foams prepared by direct foaming with wheat flour //Journal of the European Ceramic Society. 2016. Vol. 36, N1, pp. 109-120.
28. Barg S., Soltmann C., Andrad M., Koch D., Grathwohl G. Cellular ceramics by direct foaming of emulsified ceramic powder suspensions //Journal of the American Ceramic Society. 2008. Vol. 91, N9, pp. 2823-2829.
29. Axinte S. M., Paunescu L., Dragoescu M. F. Silicon carbide ceramic foam produced by direct microwave heating //Revista de Tehnologii Neconventionale. 2020. Vol. 24, N2, pp. 45-51.
30. Pradhan M., Bhargava P. Effect of Additives on Ceramic Foam Microstructure Processed by Direct Foaming of Aqueous Slurries //Transactions of the Indian Ceramic Society. 2004. Vol. 63, N3, pp. 151-154.
31. Chen A. N., Li M., Xu J., Lou C. H., Wu J. M., Cheng L. J., Shi Y. S., Li C. H. High-porosity mullite ceramic foams prepared by selective laser sintering using fly ash hollow spheres as raw materials //Journal of the European Ceramic Society. 2018. Vol. 38, N13, pp. 4553-4559.
32. Liu S. S., Li M., Wu J. M., Chen A. N., Shi Y. S., Li C. H. Preparation of high-porosity Al₂O₃ ceramic foams via selective laser sintering of Al₂O₃ poly-hollow microspheres //Ceramics International. 2020. Vol. 46, N4, pp. 4240-4247.
33. Medri V., Mazzocchi M., Bellosi A. ZrB₂-based sponges and lightweight devices //International Journal of Applied Ceramic Technology. 2011. Vol. 8, N4, pp. 815-823.
34. Innocentini M. D., Sepulveda P., Salvini V. R., Pandolfelli V. C., Coury J. R. Permeability and structure of cellular ceramics: a comparison between two preparation techniques //Journal of the American Ceramic Society. 1998. Vol. 81, N12, pp. 3349-3352.
35. Soy U., Demir A., Caliskan F. Effect of bentonite addition on fabrication of reticulated porous SiC ceramics for liquid metal infiltration //Ceramics International. 2011. Vol. 37, N1, pp. 15-19.
36. Yao X., Tan S., Zhang X., Huang Z., Jiang D. Low-temperature sintering of SiC reticulated porous ceramics with MgO-Al₂O₃-SiO₂ additives as sintering aids //Journal of materials science. 2007. Vol. 42, pp. 4960-4966.
37. Yao X., Tan S., Huang Z., Jiang D. Effect of recoating slurry viscosity on the properties of reticulated porous silicon carbide ceramics //Ceramics International. 2006. Vol. 32,

N2, pp. 137-142.

38. Chae S. H., Kim Y. W., Song I. H., Kim H. D., Narisawa M. Porosity control of porous silicon carbide ceramics //Journal of the European Ceramic Society. 2009. Vol. 29, N13, pp. 2867-2872.

39. Eom J. H., Kim Y. W. Effect of template size on microstructure and strength of porous silicon carbide ceramics //Journal of the Ceramic Society of Japan. 2008. Vol. 116, N1358, pp. 1159-1163.

40. Soloveva O., Solovev S., Talipova A., Sagdieva T., Golubev Y. Study of heat transfer in a heat exchanger with porous granules for use in transport //Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 63, pp. 1205-1210.

41. Soloveva O., Solovev S., Talipova A., Shakurova R., Sabirova J. Study of the heat transfer efficiency of spring elements for use in transport //Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 63, pp. 1007-1014.

42. Solovev S. A., Soloveva O. V., Akhmetova I. G., Vankov Y. V., Paluku D. L. Numerical simulation of heat and mass transfer in an open-cell foam catalyst on example of the acetylene hydrogenation reaction //ChemEngineering. 2022. Vol. 6, N1, pp. 11.

43. Соловьева О. В., Соловьев С. А., Талипова А. Р. Исследование влияния пористости волокнистого материала на значение энергетической эффективности //Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №. 1. С. 53.

44. Соловьева О. В., Соловьев С. А., Ваньков Ю. В., Ахметова И. Г., Шакурова Р. З., Талипова А. Р. Исследование влияния геометрии высокопористого ячеистого материала на значение энергетической эффективности //Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. №. 3. С. 55-69.

45. Wu Z., Caliot C., Bai F., Flamant G., Wang Z., Zhang J., Tian C. Experimental and numerical studies of the pressure drop in ceramic foams for volumetric solar receiver applications //Applied Energy. 2010. Vol. 87, N2, pp. 504-513.

46. Wu Z., Caliot C., Flamant G., Wang Z. Numerical simulation of convective heat transfer between air flow and ceramic foams to optimise volumetric solar air receiver performances //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011. Vol. 54, N7-8, pp. 1527-1537.

47. Patil V. R., Kiener F., Grylka A., Steinfeld A. Experimental testing of a solar air cavity-receiver with reticulated porous ceramic absorbers for thermal processing at above 1000 C //Solar Energy. 2021. Vol. 214, pp. 72-85.

48. Iasiello M., Bianco N., Chiu W. K., Naso V. The effects of variable porosity and cell size on the thermal performance of functionally-graded foams //International Journal of Thermal Sciences. 2021. Vol. 160, pp. 106696.

49. Richardson J. T., Peng Y., Remue D. Properties of ceramic foam catalyst supports: pressure drop //Applied Catalysis A: General. 2000. Vol. 204, N1, pp. 19-32.

50. Barreto G., Canhoto P., Collares-Pereira M. Parametric analysis and optimisation of porous volumetric solar receivers made of open-cell SiC ceramic foam //Energy. 2020. Vol. 200, pp. 117476.

51. Pusterla S., Ortona A., D'Angelo C., Barbato M. The influence of cell morphology on the effective thermal conductivity of reticulated ceramic foams //Journal of Porous Materials. 2012. Vol. 19, N3, pp. 307-315.

52. Yeranee K., Rao Y. A Review of Recent Investigations on Flow and Heat Transfer Enhancement in Cooling Channels Embedded with Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS) //Energies. 2022. Vol. 15, N23, pp. 8994.

53. Hu C., Sun M., Xie Z., Yang L., Song Y., Tang D., Zhao J. Numerical simulation on the forced convection heat transfer of porous medium for turbine engine heat exchanger applications //Applied Thermal Engineering. 2020. Vol. 180, pp. 115845.

54. Xu S., Wu Z., Lu H., Yang L. Experimental Study of the Convective Heat Transfer and Local Thermal Equilibrium in Ceramic Foam //Processes. 2020. Vol. 8, N11, pp. 1490.

55. You Y., Huang H., Shao G., Hu J., Xu X., Luo X. A three-dimensional numerical model of unsteady flow and heat transfer in ceramic honeycomb regenerator //Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 108, pp. 1243-1250.

56. Zhang X., Zhang K., Zhang L., Wang W., Li Y., He R. Additive manufacturing of cellular ceramic structures: From structure to structure-function integration //Materials & Design. 2022. pp. 110470.

57. Arshad A. B., Nazir A., Jeng J. Y. The effect of fillets and crossbars on mechanical properties of lattice structures fabricated using additive manufacturing //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 111, pp. 931-943.

58. Zhao M., Liu F., Fu G., Zhang D. Z., Zhang T., Zhou H. Improved mechanical properties and energy absorption of BCC lattice structures with triply periodic minimal surfaces

fabricated by SLM //Materials. 2018. Vol. 11, N12, pp. 2411.

59. Sereshk M. R. V., Triplett K., St John C., Martin, K., Gorin S., Avery A., Byer E., Conner S. P., Arash S. T., Shamsaei N. A Computational and Experimental Investigation into Mechanical Characterizations of Strut-Based Lattice Structures //2019 International Solid Freeform Fabrication Symposium. University of Texas at Austin, 2019.

60. Nazir A., Arshad A. B., Lin S. C., Jeng J. Y. Mechanical Performance of Lightweight-Designed Honeycomb Structures Fabricated Using Multijet Fusion Additive Manufacturing Technology //3D Printing and Additive Manufacturing. 2022. Vol. 9, N4, pp. 311-325.

61. Maskery I., Sturm L., Aremu A. O., Panesar A., Williams C. B., Tuck C. J., Wildman R. D., Ashcroft I. A., Hague R. J. Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer additive manufacturing //Polymer. 2018. Vol. 152, pp. 62-71.

62. AlMahri S., Santiago R., Lee D. W., Ramos H., Alabdouli H., Alteneiji M., guan Z., Cantwell W., Alves M. Evaluation of the dynamic response of triply periodic minimal surfaces subjected to high strain-rate compression //Additive Manufacturing. 2021. Vol. 46, pp. 102220.

63. Kovacev N., Li S., Zeraati-Rezaei S., Hemida H., Tsolakis A., Essa K. Effects of the internal structures of monolith ceramic substrates on thermal and hydraulic properties: additive manufacturing, numerical modelling and experimental testing //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 112, pp. 1115-1132.

64. Wu Y., Zhi C., Wang Z., Chen Y., Wang C., Chen Q., Tan G., Ming T. Enhanced thermal and mechanical performance of 3D architected micro-channel heat exchangers //Heliyon. 2023.

65. Pelanconi M., Barbato M., Zavattoni S., Vignoles G. L., Ortona A. Thermal design, optimization and additive manufacturing of ceramic regular structures to maximize the radiative heat transfer //Materials & Design. 2019. Vol. 163, pp. 107539.

66. Khalil M., Ali M. I. H., Khan K. A., Al-Rub R. A. Forced convection heat transfer in heat sinks with topologies based on triply periodic minimal surfaces //Case Studies in Thermal Engineering. 2022. Vol. 38, pp. 102313.

67. Tang W., Zhou H., Zeng Y., Yan M., Jiang C., Yang P., Li Q., Li Z., Fu J., Huang Y., Zhao Y. Analysis on the convective heat transfer process and performance evaluation of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) based on Diamond, Gyroid and Iwp //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2023. Vol. 201, pp. 123642.

68. Maurath J., Willenbacher N. 3D printing of open-porous cellular ceramics with high specific strength //Journal of the European Ceramic Society. 2017. T. 37. №. 15. C. 4833-4842.

69. Ševeček O., Papšík R., Majer Z., Kotoul M. Influence of the cell geometry on the tensile strength of open-cell ceramic foams //Procedia Structural Integrity. 2019. Vol. 23, pp. 553-558.

70. Hegazi H. A., Mokhtar A. H. Optimum Design of Hexagonal Cellular Structures Under Thermal and Mechanical Loads. 2020. Vol. 9, N6, pp. IJERTV9IS060813

71. Yuan F., Wang H., Zhou P., Xu A., He D. Heat transfer performances of honeycomb regenerators with square or hexagon cell opening //Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 125, pp. 790-798.

72. Wen T., Tian J., Lu T. J., Queheillalt D. T., Wadley H. N. G. Forced convection in metallic honeycomb structures //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2006. Vol. 49, N19-20, pp. 3313-3324.

73. Liu H., Yu Q. N., Zhang Z. C., Qu Z. G., Wang C. Z Two-equation method for heat transfer efficiency in metal honeycombs: An analytical solution //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 97, pp. 201-210.

74. Ozsipahi M., Subasi A., Gunes H., Sahin B. Numerical investigation of hydraulic and thermal performance of a honeycomb heat sink //International Journal of Thermal Sciences. 2018. Vol. 134, pp. 500-506.

75. Papakokkinos G., Castro J., Oliet C., Oliva A. Computational investigation of the hexagonal honeycomb adsorption reactor for cooling applications //Applied Thermal Engineering. 2022. Vol. 202, pp. 117807.

76. Radhika N., Sathish M. A review on Si-based ceramic matrix composites and their infiltration based techniques //Silicon. 2022. Vol. 14, N16, pp. 10141-10171.

77. Dhanasekar S., Ganesan A. T., Rani T. L., Vinjamuri V. K., Rao M. N., Shankar E., Dharamvir P., Kumar S., Golie W. M. A Comprehensive Study of Ceramic Matrix Composites for Space Applications //Advances in Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 2022.

78. de Salazar J. G., Barrena M. I., Morales G., Matesanz L., Merino N. Compression strength and wear resistance of ceramic foams-polymer composites //Materials Letters. 2006. – Vol. 60, N13-14, pp. 1687-1692.

79. Ren Z. H., Jin P., Cao X. M., Zheng Y. G., Zhang J. S. Mechanical properties and

slurry erosion resistance of SiC ceramic foam/epoxy co-continuous phase composite //Composites Science and Technology. 2015. Vol. 107, pp. 129-136.

80. Han N., Yao Z., Ye H., Zhang C., Liang P., Sun H., wang S., Liu S Efficient removal of organic pollutants by ceramic hollow fibre supported composite catalyst //Sustainable Materials and Technologies. 2019. Vol. 20, pp. e00108.

81. Qiu L., Yan K., Feng Y., Liu X., Zhang X. Bionic hierarchical porous aluminum nitride ceramic composite phase change material with excellent heat transfer and storage performance //Composites Communications. 2021. Vol. 27, pp. 100892.

82. Betke U., Proemmel S., Rannabauer S., Lieb A., Scheffler M., Scheffler F. Silane functionalized open-celled ceramic foams as support structure in metal organic framework composite materials //Microporous and Mesoporous Materials. 2017. Vol. 239, pp. 209-220.

83. Betke U., Proemmel S., Eggebrecht J. G., Rannabauer S., Lieb A., Scheffler, M., Scheffler F. Micro-Macroporous Composite Materials: SiC Ceramic Foams Functionalized With the Metal Organic Framework HKUST-1 //Chemie Ingenieur Technik. 2016. Vol. 88, N3, pp. 264-273.

84. Scheffler F., Zampieri A., Schwieger W., Zeschky J., Scheffler M., Greil P. Zeolite covered polymer derived ceramic foams: novel hierarchical pore systems for sorption and catalysis //Advances in applied ceramics. 2005. Vol. 104, N1, pp. 43-48.

85. Liu X., Wang H., Xu Q., Luo Q., Song Y., Tian Y., Chen M., Xuan Y., Jin Y., Jua Y., Li Y., Ding, Y. High thermal conductivity and high energy density compatible latent heat thermal energy storage enabled by porous AlN ceramics composites //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 175, pp. 121405.

86. Wang X., Wei K., Tao Y., Yang X., Zhou H., He R., Fang D. Thermal protection system integrating graded insulation materials and multilayer ceramic matrix composite cellular sandwich panels //Composite Structures. 2019. Vol. 209, pp. 523-534.

87. Binner J., Porter M., Baker B., Zou J., Venkatachalam V., Diaz V. R., D'Angio A., Ramanujam P., Zhang T., Murthy T. S. R. C. Selection, processing, properties and applications of ultra-high temperature ceramic matrix composites, UHTCMCs—a review //International Materials Reviews. 2020. Vol. 65, N7, pp. 389-444.

88. Rubio V., Ramanujam P., Cousinet S., LePage G., Ackerman T., Hussain A., Brown P., Dutremonte I., Binner J. Thermal properties and performance of carbon fiber-based ultra-high temperature ceramic matrix composites (Cf-UHTCMCs) //Journal of the American Ceramic Society. 2020. T. 103. №. 6. C. 3788-3796.

89. Bull J. D., Rasky D. J., Karika J. C. Stability characterization of diboride composites under high velocity atmospheric flight conditions //Proceedings of advancements in synthesis and processes. 1992.

90. Nieto A., Bisht A., Lahiri D., Zhang C., Agarwal A. Graphene reinforced metal and ceramic matrix composites: a review //International Materials Reviews. 2017. Vol. 62, N5, pp. 241-302.

91. Cho J., Boccaccini A. R., Shaffer M. S. P. Ceramic matrix composites containing carbon nanotubes //Journal of Materials Science. 2009. Vol. 44, pp. 1934-1951.

92. Arai Y., Inoue R., Goto K., Kogo Y. Carbon fiber reinforced ultra-high temperature ceramic matrix composites: A review //Ceramics International. 2019. Vol. 45, N12, pp. 14481-14489.

93. Lv X., Ye F., Cheng L., Zhang L. Novel processing strategy and challenges on whisker-reinforced ceramic matrix composites //Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2022. pp. 106974.

Авторы публикации

Соловьева Ольга Викторовна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» (ЭОС), заведующая научно-исследовательской лабораторией «Разработка энергоэффективных теплообменников» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Соловьев Сергей Анатольевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Инженерная кибернетика» (ИК) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Шакурова Розалина Зуфаровна – аспирант кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» (ЭОС).

References

1. Jouhara H., Khordehghah N., Almahmoud S., Delpech B., Chauhan A., Tassou S. A. Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2018; 6:268-289. doi: 10.1016/j.tsep.2018.04.017
2. Zhang C., Gümmer V. High temperature heat exchangers for recuperated rotorcraft powerplants. *Applied Thermal Engineering*. 2019;154:548-561. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.119
3. Sommers A., Wang Q., Han X., T'Joel C., Park Y., Jacobi A. Ceramics and ceramic matrix composites for heat exchangers in advanced thermal systems—A review. *Applied Thermal Engineering*. 2010; 30(11-12):1277-1291. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.02.018
4. Smyth R. The use of high temperature heat exchangers to increase power plant thermal efficiency. *IECEC-97 Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (Cat. No. 97CH6203)*. IEEE. 1997; 3:1690-1695. doi: 10.1109/IECEC.1997.656676
5. Liu H. C., Tsuru H., Cooper A. G., Prinz F. B. Rapid prototyping methods of silicon carbide micro heat exchangers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2005; 219(7):525-538. doi: 10.1243/095440505X32463
6. Dai H., Lin B., Ji K., Wang C., Li Q., Zheng Y., Wang K. Combustion characteristics of low-concentration coal mine methane in ceramic foam burner with embedded alumina pellets. *Applied Thermal Engineering*. 2015;90: 489-498. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.07.029
7. Xu Z., Lu Y., Wang B., Zhao L., Xiao Y. Experimental study on the off-design performances of a micro humid air turbine cycle: Thermodynamics, emissions and heat exchange. *Energy*. 2021;219:119660. doi: 10.1016/j.energy.2020.119660
8. Zhou W., Wu P., Zhang L., Zhu D., Zhao X., Cai Y. Heavy metal ions and particulate pollutants can be effectively removed by a gravity-driven ceramic foam filter optimized by carbon nanotube implantation. *Journal of Hazardous Materials*. 2022;421:126721. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126721
9. Shumilov V., Kirilin A., Tokarev A., Boden S., Schubert M., Hampel U., Hupa, L., Salmin, T., Murzin D. Y. Preparation of γ -Al₂O₃/ α -Al₂O₃ ceramic foams as catalyst carriers via the replica technique. *Catalysis Today*. 2022;383:64-73. doi: 10.1016/j.cattod.2020.09.019
10. Rainer A., Giannitelli S. M., Abbruzzese F., Traversa E., Licoccia S., Trombetta M. Fabrication of bioactive glass–ceramic foams mimicking human bone portions for regenerative medicine. *Acta Biomaterialia*. 2008;4(2):362-369. doi: 10.1016/j.actbio.2007.08.007
11. Chen Y., Wang N., Ola O., Xia Y., Zhu Y. Porous ceramics: Light in weight but heavy in energy and environment technologies. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2021;143:100589. doi: /10.1016/j.mser.2020.100589
12. Hardy D., Green D. J. Mechanical properties of a partially sintered alumina. *Journal of the European Ceramic Society*. 1995; 15(8):769-775. doi: 10.1016/0955-2219(95)00045-V
13. Chakravarty D., Ramesh H., Rao T. N. High strength porous alumina by spark plasma sintering. *Journal of the European Ceramic Society*. 2009; 29(8):1361-1369. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2008.08.021
14. Diaz A., Hampshire S., Yang J. F., Ohji T., Kanzaki S. Comparison of mechanical properties of silicon nitrides with controlled porosities produced by different fabrication routes. *Journal of the American Ceramic Society*. 2005; 88(3):698-706. doi: 10.1111/j.1551-2916.2005.00132.x
15. Ohji T. Microstructural design and mechanical properties of porous silicon nitride ceramics. *Materials Science and Engineering: A*. 2008;498(1-2):5-11. doi: 10.1016/j.msea.2007.09.104
16. Fukushima M. Microstructural control of macroporous silicon carbide. *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2013;121(1410):162-168. doi: 10.2109/jcersj2.121.162
17. Hotta M., Kita H., Matsuura H., Enomoto N., Hojo J. Pore-size control in porous SiC ceramics prepared by spark plasma sintering. *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2012; 120(1402):243-247. doi: 10.2109/jcersj2.120.243
18. Jin X., Zhang X., Han J., Hu P., He R. Thermal shock behavior of porous ZrB₂–SiC ceramics. *Materials Science and Engineering: A*. 2013; 588: 175-180. doi: 10.1016/j.msea.2013.09.046
19. Yuan H., Li J., Shen Q., Zhang L. Preparation and thermal conductivity characterization of ZrB₂ porous ceramics fabricated by spark plasma sintering. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2013; 36:225-231. doi: 10.1016/j.jrmhm.2012.09.003
20. Karl S., Somers A. V. Method of making porous ceramic articles : pat. 3090094 CIIA. 1963.
21. Soy U., Demir A. Fabrication and optimization of boron carbide foams by polymeric sponge replication. *Emerging Materials Research*. 2020; 9(2):388-395. doi:

10.1680/jemmr.20.00046

22. Luyten J., Thijs I., Vandermeulen W., Mullens S., Wallaey B., Mortelmans R. Strong ceramic foams from polyurethane templates. *Advances in applied ceramics*. 2005; 104(1):4-8. doi: 10.1179/174367605225010990

23. Hooshmand S., Nordin J., Akhtar F. Porous alumina ceramics by gel casting: Effect of type of sacrificial template on the properties. *International Journal of Ceramic Engineering & Science*. 2019; 1(2):77-84. doi: 10.1002/ces2.10013

24. Ciurans Oset M., Nordin J., Akhtar F. Processing of macroporous alumina ceramics using pre-expanded polymer microspheres as sacrificial template. *Ceramics*. 2018; 1(2):329-342. doi: 10.3390/ceramics1020026

25. Leng Q., Yao D., Xia Y., Liang H., Zeng Y. P. Microstructure and permeability of porous zirconia ceramic foams prepared via direct foaming with mixed surfactants. *Journal of the European Ceramic Society*. 2022; 42(16):7528-7537. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2022.08.060

26. Du Z., Yao D., Xia Y., Zuo K., Yin J., Liang H., Zeng Y. P. The high porosity silicon nitride foams prepared by the direct foaming method. *Ceramics International*. 2019; 45(2):2124-2130. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.10.118

27. Gregorová E., Pabst W., Uhlířová T., Nečina V., Veselý M., Sedlářová I. Processing, microstructure and elastic properties of mullite-based ceramic foams prepared by direct foaming with wheat flour. *Journal of the European Ceramic Society*. 2016; 36(1): 109-120. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2015.09.028

28. Barg S., Soltmann C., Andrad M., Koch D., Grathwohl G. Cellular ceramics by direct foaming of emulsified ceramic powder suspensions. *Journal of the American Ceramic Society*. 2008; 91(9): 2823-2829. doi: 10.1111/j.1551-2916.2008.02553.x

29. Axinte S. M., Paunescu L., Dragoescu M. F. Silicon carbide ceramic foam produced by direct microwave heating. *Revista de Tehnologii Neconventionale*. 2020; 24(2): 45-51.

30. Pradhan M., Bhargava P. Effect of Additives on Ceramic Foam Microstructure Processed by Direct Foaming of Aqueous Slurries. *Transactions of the Indian Ceramic Society*. 2004; 63(3): 151-154. doi: 10.1080/0371750X.2004.11012153

31. Chen A. N., Li M., Xu J., Lou C. H., Wu J. M., Cheng L. J., Shi Y. S., Li C. H. High-porosity mullite ceramic foams prepared by selective laser sintering using fly ash hollow spheres as raw materials. *Journal of the European Ceramic Society*. 2018; 38(13):4553-4559. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.05.031

32. Liu S. S., Li M., Wu J. M., Chen A. N., Shi Y. S., Li C. H. Preparation of high-porosity Al₂O₃ ceramic foams via selective laser sintering of Al₂O₃ poly-hollow microspheres. *Ceramics International*. 2020; 46(4): 4240-4247. doi: 10.1016/j.ceramint.2019.10.144

33. Medri V., Mazzocchi M., Bellosi A. ZrB₂-based sponges and lightweight devices. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2011;8(4): 815-823. doi: 10.1111/j.1744-7402.2010.02512.x

34. Innocentini M. D., Sepulveda P., Salvini V. R., Pandolfelli V. C., Coury J. R. Permeability and structure of cellular ceramics: a comparison between two preparation techniques. *Journal of the American Ceramic Society*. 1998;81(12): 3349-3352. doi: 10.1111/j.1151-2916.1998.tb02782.x

35. Soy U., Demir A., Caliskan F. Effect of bentonite addition on fabrication of reticulated porous SiC ceramics for liquid metal infiltration. *Ceramics International*. 2011;37(1):5-19. doi: 10.1016/j.ceramint.2010.07.028

36. Yao X., Tan S., Zhang X., Huang Z., Jiang D. Low-temperature sintering of SiC reticulated porous ceramics with MgO–Al₂O₃–SiO₂ additives as sintering aids. *Journal of materials science*. 2007;42: 4960-4966. doi: 10.1007/s10853-006-0473-1

37. Yao X., Tan S., Huang Z., Jiang D. Effect of recoating slurry viscosity on the properties of reticulated porous silicon carbide ceramics. *Ceramics International*. 2006;32(2):137-142. doi: 10.1016/j.ceramint.2005.01.008

38. Chae S. H., Kim Y. W., Song I. H., Kim H. D., Narisawa M. Porosity control of porous silicon carbide ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 2009;29(13):2872. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2009.03.027

39. Eom J. H., Kim Y. W. Effect of template size on microstructure and strength of porous silicon carbide ceramics. *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2008;116(1358):1159-1163. doi: 10.2109/jcersj2.116.1159

40. Soloveva O., Solovev S., Talipova A., Sagdieva T., Golubev Y. Study of heat transfer in a heat exchanger with porous granules for use in transport. *Transportation Research Procedia*. 2022;63: 1205-1210. doi: 10.1016/j.trpro.2022.06.126

41. Soloveva O., Solovev S., Talipova A., Shakurova R., Sabirova J. Study of the heat transfer efficiency of spring elements for use in transport. *Transportation Research Procedia*. 2022;63:1007-1014. doi: 10.1016/j.trpro.2022.06.100

42. Solovev S. A., Soloveva O. V., Akhmetova I. G., Vankov Y. V., Paluku D. L. Numerical simulation of heat and mass transfer in an open-cell foam catalyst on example of the acetylene hydrogenation reaction. *ChemEngineering*. 2022;6(1):11. doi: 10.3390/chemengineering6010011
43. Soloveva O., Solovev S., Talipova A. Issledovanie vliyaniya poristosti voloknistogo materiala na znachenie energeticheskoy effektivnosti. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2022;14(1):53.
44. Soloveva O., Solovev S., Vankov Y., Akhmetova I., Shakurova R., Talipova A. Issledovanie vliyaniya geometrii vysokoporistogo yacheistogo materiala na znachenie energeticheskoy effektivnosti. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(3):55-69. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-3-55-65
45. Wu Z., Caliot C., Bai F., Flamant G., Wang Z., Zhang J., Tian C. Experimental and numerical studies of the pressure drop in ceramic foams for volumetric solar receiver applications. *Applied Energy*. 2010;87(2): 504-513. doi: 10.1016/j.apenergy.2009.08.009
46. Wu Z., Caliot C., Flamant G., Wang Z. Numerical simulation of convective heat transfer between air flow and ceramic foams to optimise volumetric solar air receiver performances. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011;54(7-8):1527-1537. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.11.037
47. Patil V. R., Kiener F., Grylka A., Steinfeld A. Experimental testing of a solar air cavity-receiver with reticulated porous ceramic absorbers for thermal processing at above 1000 C. *Solar Energy*. 2021;214:72-85. doi: 10.1016/j.solener.2020.11.045
48. Iasiello M., Bianco N., Chiu W. K., Naso V. The effects of variable porosity and cell size on the thermal performance of functionally-graded foams. *International Journal of Thermal Sciences*. 2021;160:106696. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106696
49. Richardson J. T., Peng Y., Remue D. Properties of ceramic foam catalyst supports: pressure drop. *Applied Catalysis A: General*. 2000;204(1):19-32. doi: 10.1016/S0926-860X(00)00508-1
50. Barreto G., Canhoto P., Collares-Pereira M. Parametric analysis and optimisation of porous volumetric solar receivers made of open-cell SiC ceramic foam. *Energy*. 2020;200:117476. doi: 10.1016/j.energy.2020.117476
51. Pusterla S., Ortona A., D'Angelo C., Barbato M. The influence of cell morphology on the effective thermal conductivity of reticulated ceramic foams. *Journal of Porous Materials*. 2012;19(3):307-315. doi: 10.1007/s10934-011-9477-6
52. Yeranev K., Rao Y. A Review of Recent Investigations on Flow and Heat Transfer Enhancement in Cooling Channels Embedded with Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS). *Energies*. 2022;15(23):8994. doi: 10.3390/en15238994
53. Hu C., Sun M., Xie Z., Yang L., Song Y., Tang D., Zhao J. Numerical simulation on the forced convection heat transfer of porous medium for turbine engine heat exchanger applications. *Applied Thermal Engineering*. 2020;180:115845. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115845
54. Xu S., Wu Z., Lu H., Yang L. Experimental Study of the Convective Heat Transfer and Local Thermal Equilibrium in Ceramic Foam. *Processes*. 2020;8(11):490. doi: 10.3390/pr8111490
55. You Y., Huang H., Shao G., Hu J., Xu X., Luo X. A three-dimensional numerical model of unsteady flow and heat transfer in ceramic honeycomb regenerator. *Applied Thermal Engineering*. 2016;108:1243-1250. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.08.035
56. Zhang X., Zhang K., Zhang L., Wang W., Li Y., He R. Additive manufacturing of cellular ceramic structures: From structure to structure-function integration. *Materials & Design*. 2022;110470. doi: 10.1016/j.matdes.2022.110470
57. Arshad A. B., Nazir A., Jeng J. Y. The effect of fillets and crossbars on mechanical properties of lattice structures fabricated using additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020;111:931-943. doi: 10.1007/s00170-020-06034-x
58. Zhao M., Liu F., Fu G., Zhang D. Z., Zhang T., Zhou H. Improved mechanical properties and energy absorption of BCC lattice structures with triply periodic minimal surfaces fabricated by SLM. *Materials*. 2018;11(12):C. 2411. doi: 10.3390/ma11122411
59. Sereshk M. R. V., Triplett K., St John C., Martin, K., Gorin S., Avery A., Byer E., Conner S. P., Arash S. T., Shamsaei N. A Computational and Experimental Investigation into Mechanical Characterizations of Strut-Based Lattice Structures. *2019 International Solid Freeform Fabrication Symposium. University of Texas at Austin*. 2019. doi: 10.26153/tsw/17472
60. Nazir A., Arshad A. B., Lin S. C., Jeng J. Y. Mechanical Performance of Lightweight-Designed Honeycomb Structures Fabricated Using Multijet Fusion Additive Manufacturing Technology. *3D Printing and Additive Manufacturing*. 2022;9(4):311-325. doi: 10.1089/3dp.2021.0004

61. 2Maskery I., Sturm L., Aremu A. O., Panesar A., Williams C. B., Tuck C. J., Wildman R. D., Ashcroft I. A., Hague R. J. Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer additive manufacturing. *Polymer*. 2018;152:62-71. doi: 10.1016/j.polymer.2017.11.049
62. AlMahri S., Santiago R., Lee D. W., Ramos H., Alabdouli H., Alteneiji M., guan Z., Cantwell W., Alves M. Evaluation of the dynamic response of triply periodic minimal surfaces subjected to high strain-rate compression. *Additive Manufacturing*. 2021;46:102220. doi: 10.1016/j.addma.2021.102220
63. Kovacev N., Li S., Zeraati-Rezaei S., Hemida H., Tsolakis A., Essa K. Effects of the internal structures of monolithic ceramic substrates on thermal and hydraulic properties: additive manufacturing, numerical modelling and experimental testing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;112:1115-1132. doi: 10.1007/s00170-020-06493-2
64. Wu Y., Zhi C., Wang Z., Chen Y., Wang C., Chen Q., Tan G., Ming T. Enhanced thermal and mechanical performance of 3D architected micro-channel heat exchangers. *Heliyon*. 2023. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13902
65. Pelanconi M., Barbato M., Zavattoni S., Vignoles G. L., Ortona A. Thermal design, optimization and additive manufacturing of ceramic regular structures to maximize the radiative heat transfer. *Materials & Design*. 2019;163:107539. doi: 10.1016/j.matdes.2018.107539
66. Khalil M., Ali M. I. H., Khan K. A., Al-Rub R. A. Forced convection heat transfer in heat sinks with topologies based on triply periodic minimal surfaces. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022;38:102313. doi: 10.1016/j.csite.2022.102313
67. Tang W., Zhou H., Zeng Y., Yan M., Jiang C., Yang P., Li Q., Li Z., Fu J., Huang Y., Zhao Y. Analysis on the convective heat transfer process and performance evaluation of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) based on Diamond, Gyroid and Iwp //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2023. T. 201. C. 123642. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123642
68. Maurath J., Willenbacher N. 3D printing of open-porous cellular ceramics with high specific strength. *Journal of the European Ceramic Society*. 2017;37(15):4833-4842. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.06.001
69. Ševeček O., Papsík R., Majer Z., Kotoul M. Influence of the cell geometry on the tensile strength of open-cell ceramic foams. *Procedia Structural Integrity*. 2019;23:553-558. doi: 10.1016/j.prostr.2020.01.144
70. Hegazi H. A., Mokhtar A. H. Optimum Design of Hexagonal Cellular Structures Under Thermal and Mechanical Loads. 2020;9(6):IJERTV9IS060813
71. Yuan F., Wang H., Zhou P., Xu A., He D. Heat transfer performances of honeycomb regenerators with square or hexagon cell opening. *Applied Thermal Engineering*. 2017;125:798. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.079
72. Wen T., Tian J., Lu T. J., Queheillalt D. T., Wadley H. N. G. Forced convection in metallic honeycomb structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006;49(19-20):3313-3324. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.03.024
73. Liu H., Yu Q. N., Zhang Z. C., Qu Z. G., Wang C. Z Two-equation method for heat transfer efficiency in metal honeycombs: An analytical solution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016;97:201-210. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.020
74. Ozsipahi M., Subasi A., Gunes H., Sahin B. Numerical investigation of hydraulic and thermal performance of a honeycomb heat sink. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018;134:500-506. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.034
75. Papakokkinos G., Castro J., Oliet C., Oliva A. Computational investigation of the hexagonal honeycomb adsorption reactor for cooling applications. *Applied Thermal Engineering*. 2022;202:117807. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117807
76. Radhika N., Sathish M. A review on Si-based ceramic matrix composites and their infiltration based techniques. *Silicon*. 2022;14(16):10141-10171. doi: 10.1007/s12633-022-01763-y
77. Dhanasekar S., Ganesan A. T., Rani T. L., Vinjamuri V. K., Rao M. N., Shankar E., Dharamvir P., Kumar S., Golie W. M. A Comprehensive Study of Ceramic Matrix Composites for Space Applications. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022. doi: 10.1155/2022/6160591
78. de Salazar J. G., Barrena M. I., Morales G., Matesanz L., Merino N. Compression strength and wear resistance of ceramic foams-polymer composites. *Materials Letters*. 2006;60(13-14):687-1692. doi: 10.1016/j.matlet.2005.11.092
79. Ren Z. H., Jin P., Cao X. M., Zheng Y. G., Zhang J. S. Mechanical properties and slurry erosion resistance of SiC ceramic foam/epoxy co-continuous phase composite. *Composites Science and Technology*. 2015;107:129-136. doi: 10.1016/j.compscitech.2014.12.012

80. Han N., Yao Z., Ye H., Zhang C., Liang P., Sun H., wang S., Liu S. Efficient removal of organic pollutants by ceramic hollow fibre supported composite catalyst. *Sustainable Materials and Technologies*. 2019;20:e00108. doi: 10.1016/j.susmat.2019.e00108
81. Qiu L., Yan K., Feng Y., Liu X., Zhang X. Bionic hierarchical porous aluminum nitride ceramic composite phase change material with excellent heat transfer and storage performance. *Composites Communications*. 2021;27:00892. doi: 10.1016/j.coco.2021.100892
82. Betke U., Proemmel S., Rannabauer S., Lieb A., Scheffler M., Scheffler F. Silane functionalized open-celled ceramic foams as support structure in metal organic framework composite materials. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2017;239:220. doi: 10.1016/j.micromeso.2016.10.011
83. Betke U., Proemmel S., Eggebrecht J. G., Rannabauer S., Lieb A., Scheffler M., Scheffler F. Micro-Macroporous Composite Materials: SiC Ceramic Foams Functionalized With the Metal Organic Framework HKUST-1. *Chemie Ingenieur Technik*. 2016;88(3):64-273. doi: 10.1002/cite.201500141
84. Scheffler F., Zampieri A., Schwieger W., Zeschky J., Scheffler M., Greil P. Zeolite covered polymer derived ceramic foams: novel hierarchical pore systems for sorption and catalysis. *Advances in applied ceramics*. 2005;104(1):43-48. doi: 10.1179/174367605225011016
85. Liu X., Wang H., Xu Q., Luo Q., Song Y., Tian Y., Chen M., Xuan Y., Jin Y., Jua Y., Li Y., Ding, Y. High thermal conductivity and high energy density compatible latent heat thermal energy storage enabled by porous AlN ceramics composites. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021;175:21405. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121405
86. Wang X., Wei K., Tao Y., Yang X., Zhou H., He R., Fang D. Thermal protection system integrating graded insulation materials and multilayer ceramic matrix composite cellular sandwich panels. *Composite Structures*. 2019;209:523-534. doi: 10.1016/j.compstruct.2018.11.004
87. Binner J., Porter M., Baker B., Zou J., Venkatachalam V., Diaz V. R., D'Angio A., Ramanujam P., Zhang T., Murthy T. S. R. C. Selection, processing, properties and applications of ultra-high temperature ceramic matrix composites, UHTCMCs—a review. *International Materials Reviews*. 2020;65(7):89-444. doi: 10.1080/09506608.2019.1652006
88. Rubio V., Ramanujam P., Cousinet S., LePage G., Ackerman T., Hussain A., Brown P., Dutremonte I., Binner J. Thermal properties and performance of carbon fiber-based ultra-high temperature ceramic matrix composites (Cf-UHTCMCs). *Journal of the American Ceramic Society*. 2020;103(6):3788-3796. doi: 10.1111/jace.17043
89. Bull J. D., Rasky D. J., Karika J. C. Stability characterization of diboride composites under high velocity atmospheric flight conditions. *Proceedings of advancements in synthesis and processes*. 1992.
90. Nieto A., Bisht A., Lahiri D., Zhang C., Agarwal A. Graphene reinforced metal and ceramic matrix composites: a review. *International Materials Reviews*. 2017;62(5):41-302. doi: 10.1080/09506608.2016.1219481
91. Cho J., Boccaccini A. R., Shaffer M. S. P. Ceramic matrix composites containing carbon nanotubes. *Journal of Materials Science*. 2009;44:1934-1951. doi: 10.1007/s10853-009-3262-9
92. Arai Y., Inoue R., Goto K., Kogo Y. Carbon fiber reinforced ultra-high temperature ceramic matrix composites: A review. *Ceramics International*. 2019;45(2):14481-14489. doi: 10.1016/j.ceramint.2019.05.065
93. Lv X., Ye F., Cheng L., Zhang L. Novel processing strategy and challenges on whisker-reinforced ceramic matrix composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2022;106974. doi: 10.1016/j.compositesa.2022.106974

Authors of the publication

Olga V. Soloveva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Sergei A. Solovov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Rozalina Z. Shakurova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 27.02.2023г.

Отредактировано 09.03.2023г.

Принято 09.03.2023г.