

Е. И. ФРОЛОВ
М. А. АНЦЕВ
М. И. СМОЛЬКОВ
М. А. ФРОЛОВ

КОМПОЗИТНЫЕ ИЗДЕЛИЯ, СОСТОЯЩИЕ ИЗ КАРКАСА СО СТРУКТУРОЙ ТРЕХПЕРИОДИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ЗАПОЛНЕННОГО САМОУПЛОТНЯЮЩИМСЯ ЦЕМЕНТНЫМ РАСТВОРОМ

COMPOSITE PRODUCTS CONSISTING OF A FRAME WITH A STRUCTURE OF
THREE-PERIODIC SURFACES FILLED WITH SELF-SEALING CONCRETE MORTAR

В работе исследуется влияние содержания трехпериодических поверхностей (ТПП), напечатанных на 3D-принтере, как армирующего каркаса, заполненного самоуплотняющимся цементным раствором, на физико-механические свойства полученного композитного изделия. Раствор включает в себя метакраолин, микрокальцит и суперпластификатор для обеспечения текучести при фиксированном водоцементном отношении. Образцы подвергали испытаниям на прочность (сжатие и изгиб) на 28-е сутки твердения. Результаты показали, что использование ТПП в качестве каркаса увеличивает прочность на изгиб до 100 %. Полученные данные подтверждают перспективность дальнейших разработок таких композитных изделий для применения в строительной отрасли.

Ключевые слова: трехпериодические минимальные поверхности, самоуплотняющиеся растворы, аддитивные технологии, испытания на прочность

The paper examines the effect of the content of three-periodic surfaces (TPS) printed on a 3D-printer as a reinforcing frame filled with self-sealing cement mortar on the physico-mechanical properties of the resulting composite product. The solution includes - metakaolin, microcalcite and a superplasticizer to ensure fluidity at a fixed water-cement ratio. The samples were subjected to strength tests (compression and bending) on the 28th day of hardening. The results showed that using the TPS as a frame increases the bending strength by up to 100 %. The data obtained confirm the prospects for further development of such composite products for use in the construction industry.

Keywords: triple-periodic minimal surfaces, self-compacting mortars, additive technologies, triple-periodic minimal surfaces, strength testing

Введение

Использование инновационных структур, таких как трехпериодические минимальные поверхности (ТПМП), для создания пористых материалов и их интеграции с бетоном и растворами является актуальной задачей по нескольким причинам: сохранение экологии, повышение энергоэффективности, замена традиционных заполнителей, элементов армирования и улучшение физико-механических характеристик конструкций [1]. В последние годы в строительной отрасли наблюдается рост выбросов углекислого газа (CO_2), достигающий 37–39 % от общего объема антропогенных эмиссий, с прогнозом увеличения до 42 % к 2050 году без внедрения инноваций [2]. Но необходимо

подчеркнуть, что этого явно недостаточно, судя по тенденции роста CO_2 -выбросов в секторе и постоянно возрастающего объема строительных работ [3]. Десятки миллиардов тонн материалов ежегодно потребляются в строительстве, что приводит к истощению природных ресурсов и накоплению отходов. Переработка и оптимизация структур с использованием ТПМП может стать источником эффективных материалов для различных отраслей, включая строительство, где используемые пористые структуры позволяют снизить вес и повысить ряд физико-механических характеристик [4]. Таким образом, интеграция ТПМП в производство строительных материалов является наиболее перспективным и быстроразвивающимся направлением. Внедрение таких структур эко-

номит ресурсы, не нанося вреда окружающей среде, но надо понимать, что на начальных этапах разработки любой инновационный подход является достаточно затратным, а инвестиции имеют немалый срок окупаемости. Использование ТПМП-материалов уменьшает количество строительного материала, необходимого для конструкций, и сокращает добычу сырьевых компонентов, способствуя устойчивому развитию. Обоснованность дальнейшего развития ТПМП-структур состоит в том, что в целом по миру на инновационные пористые материалы в строительстве приходится менее 5 % от общего объема, в то время как традиционные методы доминируют, приводя к высоким энергозатратам. К сожалению, основным подходом остается использование плотных бетонов, что усиливает экологическую нагрузку [5]. В настоящее время применение ТПМП в строительной индустрии может стать перспективным направлением для создания уникальных композитных изделий с высокими характеристиками [6]. Подобные направления должны чаще применяться в строительной отрасли.

В нашем случае, проведены исследования по использованию ТПМП-структуры, как армирующего каркаса для создания уникальных композитных изделий. А именно предварительно моделируемые для интеграции с бетонными смесями на стадии формирования, что позволит сократить расход сырьевого материала, при этом ожидаемо увеличив прочность готового композитного изделия на изгиб.

Материалы и методы

Метод генерации трёхпериодических поверхностей и новых пористых материалов на их основе

В работе [7] нами был предложен универсальный метод, предназначенный для генерации трёхпериодических поверхностей (ТПП) и их минимальных аналогов (ТПМП), который может быть применён к любой атомной сетке кристаллических структур, допускающей естественное разбиение на натуральный тайлинг. Атомные структуры некоторых кристаллов имеют конфигурации, схожие с лабиринтными сетками ТПП (например атомная решётка содалита) (рис. 1).

Атомная сетка такого кристалла декорирует соответствующую ТПП, а саму поверхность мы находим через построение разбиения, которое представляет собой разбиение кристаллического пространства на обобщённые многогранники (тайлы), заполняющие это пространство без промежутков и самопере-

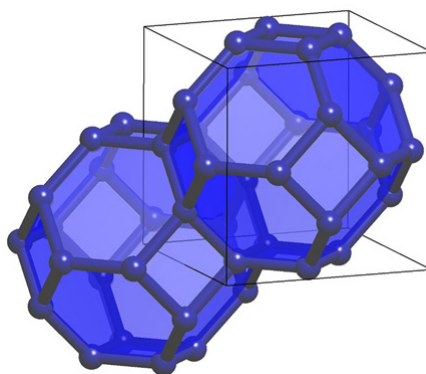


Рис. 1. Атомная структура (атомная сетка) кристалла содалит (SOD)

Fig. 1. Atomic structure (atomic network) of the sodalite (SOD) crystal

сечений. Грани тайлов образованы кольцами атомной сетки, поэтому тайлы могут быть как выпуклыми, так и невыпуклыми многогранниками и содержать двухкоординированные вершины. Из всех возможных разбиений на тайлинг можно выделить так называемый натуральный тайлинг [8], в котором тайлы минимальны, т. е. их нельзя разделить на меньшие многогранники.

Сам метод, предложенный в [9], схематически изображенный на рис. 2, представляет собой три шага:

1) *Генерация*: ТПП/ТПМП генерируются вычислительно с помощью ToposPro [10]. Используя ранее описанный подход и разбиение на натуральный тайлинг, генерация ТПП достигается путём удаления некоторых граней тайлинга при соблюдении трёх условий:

а) все вершины и ребра натурального тайлинга принадлежат ТПП (условие декорирования);

б) ребро сетки разделяется ровно двумя тайлами из натурального тайлинга (условие граней);

в) все ребра, сходящиеся в одной вершине, разделяются разными парами тайлов натурального тайлинга (условие вершин).

2) *Обработка*: модели ТПП подвергаются пространственной корректировке, сглаживанию и утолщению (рис. 3) с использованием алгоритмов Porous 3D [12], а итоговый результат, т. е. цифровой двойник пористого материала, экспортируется в формате «*.stl» для дальнейшего использования. Пространственная корректировка подразумевает алгоритм трансляции модели. Для симуляции бесконечности ТПП метод трансляции аналитически реализует параллельный перенос в прямоугольной системе координат, обеспечивая бесшовное соединение границ между соседними элементарными ячейками каркаса ТПП. Алгоритм сглаживания граней

сочетает метод Лапласа и метод оптимизации, минимизируя абсолютное значение разности между максимальным и минимальным значениями средней кривизны в каждой точке ТПП, что позволяет достичь сглаживания, подобного ТПМП. Алгоритм утолщения поверхности создаёт объёмные структуры путём смещения копии поверхности на заданную толщину.

3) *Валидация*: модель пористого материала изготавливается с помощью 3D-печати для последующего экспериментального исследования.

На основании этого метода из базы данных цеолитов (IZA) в работе [13] был выделен наиболее примечательный каркас CGF для дальнейшего использования как армирующего каркаса в композитном изделии.



Рис. 2. Разработанный метод для моделирования пористых материалов, впервые реализованный в работе [11]

Fig. 2. The developed method for modeling porous materials, first implemented in the work [11]

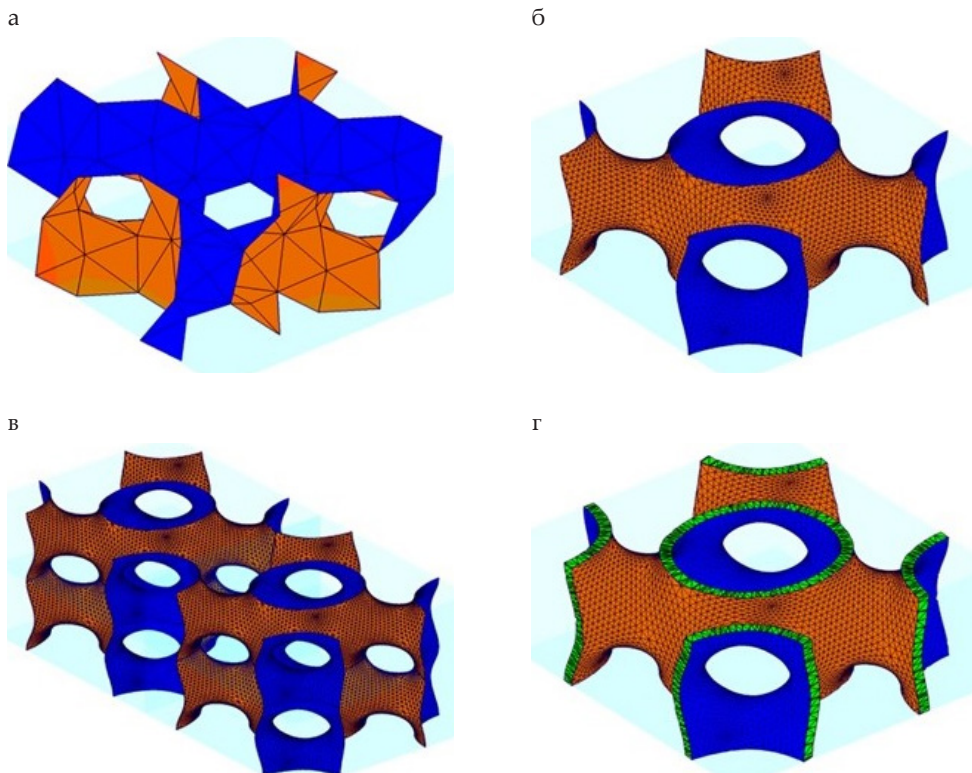


Рис. 3. Полученная ТПП из цеолита Co-Ga-P-5 (CGF) до и после обработки Porous 3D:
а – извлеченная ТПП; б – сглаженная ТПП;

в – транслированная сглаженная ТПП; г – утолщенная ТПП

Fig. 3. The obtained TPP from Co-Ga-P-5 zeolite (CGF) before and after Porous 3D treatment:
а – extracted TPP; б – smoothed TPP; в – translated smoothed TPP; г – thickened TPP

Изготовление композитного изделия

Для изготовления каркаса, представляющего собой пористый материал выбранной структуры (CGF), был использован репрезентативный объёмный элемент (РОЭ), который мог бы вписываться в куб размером 10×10×10 см и балочку размером 4×4×16 см, при этом толщина стенки составляла 2 мм. Далее РОЭ был транслирован по главным направлениям три раза и конвертирован в формат «*.stl». Печать проводилась на принтере Bambu Lab X1 Carbon 3D. Режим печати был следующий: $t_{\text{сопла}} = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{печати}} = 200\text{ мм/с}$, $h_{\text{слоя}} = 0,16\text{ мм/с}$. Материал печати был PLA+, этот пластик обладает высокими прочностными и долговечностными характеристиками по сравнению с его аналогами.

После обсушки образцов необходимо было подобрать самоуплотняющийся раствор. На начальном этапе приготовления смеси применялся суперпластификатор на основе эфиров поликарбоксилата и полиарила для достижения требуемой подвижности смеси (класс А2). Однако при увеличении дозировки добавки наблюдалось расслоение смеси, при этом необходимая подвижность не была достигнута, для этого было принято решение ввести микрокальцит и метаколин для сохранения однородности и прочности смеси. Микрокальцит был введён в состав для предотвращения расслоения смеси, которое наблюдалось на начальных этапах испытаний при использовании суперпластификатора. Дозировка микрокальцита в 44,39 % от массы цемента была определена на основе экспериментальных данных, демонстрирующих оптимальное соотношение между снижением расслоения и сохранением удобоукладываемости смеси. Микрокальцит благодаря своей высокой удельной поверхности и мелкодисперсной структуре улучшает реологические свойства раствора, обеспечивая равномерное распределение частиц и снижая водоотделение. Выбор указанной дозировки основывался на балансе между технологическими характеристиками смеси и экономической целесообразностью, так как дальнейшее увеличение содержания микрокальцита могло привести к повышению расхода связующего и пластификатора [14]. Суперпластификатор на основе эфиров поликарбоксилата и полиарила был добавлен для достижения подвижности смеси класса А2, необходимой для эффективного заполнения пор в каркасе размером 4 мм в 3D-печатных образцах. Дозировка 0,8 % от массы цемента была установлена экспериментально как оптимальная, обеспечивающая требуемую текучесть без риска расслоения смеси. Меньшие дозировки (менее 0,8 %) не позво-

ляли достичь необходимой подвижности, в то время как более высокие дозировки (выше 1 %) вызывали сегрегацию компонентов, что подтверждалось результатами пробных замесов. Таким образом, выбранное процентное содержание суперпластификатора обеспечивало баланс между реологическими свойствами и стабильностью смеси. Метаколин (5 % от массы цемента) был введён в состав для повышения прочностных характеристик смеси. Выбранная дозировка была определена на основе анализа литературных данных и экспериментальных исследований, показывающих, что метаколин в данном количестве эффективно способствует формированию плотной микроструктуры цементного камня за счёт пуццолановой реакции. Увеличение содержания метаколлина выше 5 % могло привести к снижению подвижности смеси и увеличению водопотребности, что нежелательно для технологического процесса. Меньшие дозировки (менее 5 %) не обеспечивали значимого прироста прочности, что делало их недостаточно эффективными [15].

Состав:

1. Цемент AKKERMANN Цем I 52,5Н – **642,0 г.**
2. Песок строительный – **1046,0 г.**
3. Микрокальцит – **285,0 г.**
4. Суперпластификатор MasterGlenium 808 PAV – **5,1 г.**
5. Метаколин – **32,1 г.**
6. Вода – **293 мл.**

Результаты

Для объективной оценки возможности использования структур ТПП в качестве армирующих каркасов и получения композитного изделия был осуществлен ряд экспериментальных исследований. Основной целью работы было изучение основных физико-механических характеристик полученных изделий для оценки возможности использования подобных каркасов в строительстве.

Для этого были изготовлены пробные образцы в виде балочек (40×40×160 мм) и кубов (с ребром 100×100×100 мм). Образцы испытывали на 28-е сутки твердения, проходящего в нормальных условиях.

Испытания по определению прочности при сжатии и изгибе выполнялись на гидравлическом прессе ИП-100М-авто и БИ-1000-1 (ГОСТ 28840-90 «Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб»). На рис. 4 приведены графики зависимости роста деформации образцов балочек от увеличивающейся нагрузки до момента разрушения. По графикам видно, что деформация образцов с каркасов больше в 8 раз (1,6 мм в отличие от 0,2 мм для

контрольных образцов) и нагружаемая сила до разрушения образцов с каркасом тоже больше более чем в два раза. Необходимо отметить, что характер зависимости для полученного композиционного изделия не прямолинейный, что безусловно характеризует синергический эффект при сопротивлении возрастающей нагрузки. Таким образом, было проведено по три измерения для

каждого типа образцов и рассчитаны значения по пределу прочности на изгиб (табл. 1).
На рис. 5 представлен образец балочки с каркасом после испытания на изгиб и локальные места его разрушения, из которых видно, что они проходят по зонам соприкосновения каркаса и затвердевшего цементного раствора. В аналогичной последовательности получали данные при испытании на сжатие. Так,

Таблица 1. Характеристика образцов балочек и значения предела прочности на изгиб
Table 1. Characteristics of samples beams and values of bending strength

Образцы		Длина×Ширина×Высота, см	Масса, г	R _{изг.} , МПа	R _{изг. ср.} , МПа
Контрольные	№1	16,1×4,0×4,0	599	6,5	7,4
	№2	16,2×4,1×3,9	599	7,6	
	№3	16,2×3,9×4,0	597	8,2	
С каркасом	№1	16,1×4,0×4,0	540	18,1	15,1
	№2	16,1×4,1×4,1	536	11,7	
	№3	16,1×4,0×4,1	538	15,4	

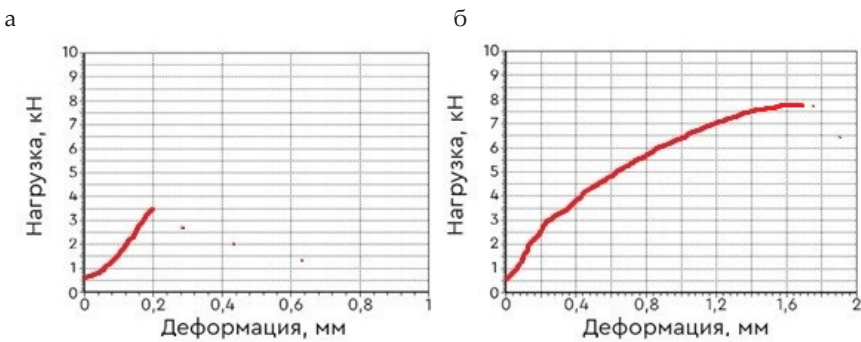


Рис. 4. Графики хода нагружения с фиксацией деформации до разрушения при испытании на изгиб: а – контрольный образец; б – образец с каркасом
Fig. 4. Graphs of the loading course with fixation of deformation to fracture during bending testing: а – control sample; б – sample with a frame

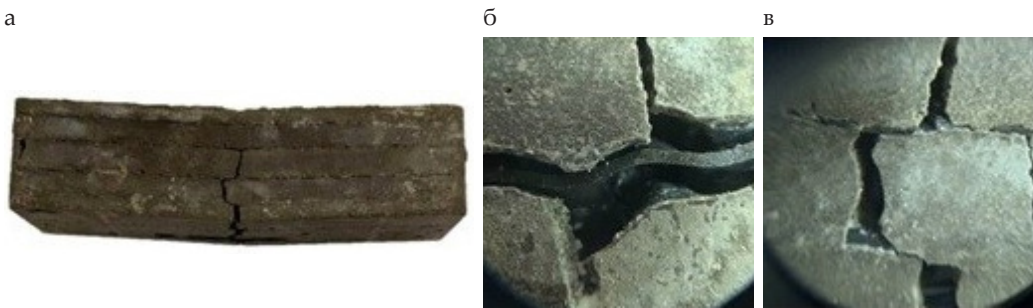


Рис. 5. Образец с каркасом после испытания и его увеличенные фрагменты:
а – образец после испытания на изгиб; б – стык ребра каркаса с растворной матрицей;
в – место разрушения без наличия открытого ребра каркаса
Fig. 5. The sample with the frame after the test and its enlarged fragments:
а – sample after bending test; б – joint of the frame rib with the mortar matrix;
в – place of destruction without the presence of an open rib frame

на рис. 6 приведены графики хода нагружения кубов с одновременной регистрацией происходящей деформации по вертикальной оси нагружения. Здесь необходимо пояснение, что на применяемом прессе, который позволяет регистрировать данные по нагружению и происходящей при этом деформации, максимальная нагрузка ограничена 100 кН. В связи с этим при испытании сжатия на прочность разрушения образцов не наблюдается. Также обнаружили некорректно подготовленный образец (на стадии изготовления это понять было сложно): сама структура каркаса была чуть выше уровня плоскостей затвердевшего бетона. Это сказалось на ходе кривой (рис. 6, б): при нагрузке до 10 кН, помимо основной деформации композита, происходила деформация выпирающих частей каркаса. Преждевременные воздействия отдельно на каркас практически наверняка снизили итоговое значение предела прочности при сжатии за счет неизбежного отслоения бетонной матрицы от CGF-структуры каркаса.

В табл. 2 приведены геометрические размеры кубов для серии контрольных образцов и образцов с каркасом. По среднему значению прочности на сжатие видно его снижение, что, с одной

стороны, ожидаемо, так как монолитный образец должен быть более устойчив к подобным видам нагрузки. А с другой – остается вопрос, какой вклад внесла недостаточная корректность при изготовлении образцов с выпирающим каркасом.

Стоит отметить тот факт, что масса образцов с каркасом становится меньше в среднем на 10 % (аналогично наблюдается и для образцов в виде балочек, см. табл. 1). Это логично, так как часть композита представлена пластиковым каркасом, который по плотности значительно легче цементной составляющей. Этот момент очень важен при учете получаемых конструкций, и соответственно, массы будущих строений, а следовательно, общей нагрузки на фундамент.

На рис. 7 представлен образец куба с каркасом после испытания на сжатие и локальные места его разрушения, из которых видно, что разрушения носят смешанный характер: частично по зонам соприкосновения каркаса и затвердевшего цементного раствора, частично наблюдаются повреждения самого каркаса. На рис. 8 показана полнота заполнения каркаса самоуплотняющимся цементным раствором на образце в виде куба.

Заключение

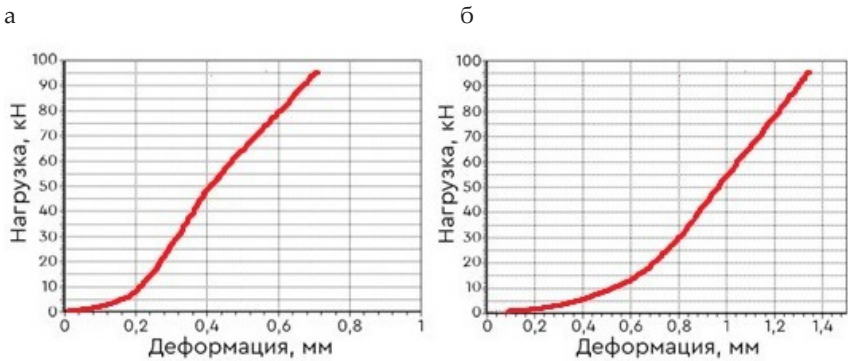


Рис. 6. Графики хода нагружения до 95 кН с фиксацией деформации при испытании на сжатие: а – контрольный образец; б – образец с каркасом
Fig. 6. Graphs of loading progress up to 95 kN with strain fixation during compression testing: а – control sample; б – sample with a frame

Таблица 2. Характеристика образцов кубов и значения предела прочности на сжатие
Table 2. Characteristics of samples cubes and values of compressive strength

Образцы		Длина×Ширина×Высота, см	Масса, г	R _{сж.} , МПа	R _{сж. ср.} , МПа
Контрольные	№1	10,0×10,2×9,8	2262	60,6	63,3
	№2	10,1×10,0×9,9	2272	70,4	
	№3	10,1×10,2×9,8	2276	58,9	
С каркасом	№1	10,0×10,0×10,0	2032	46,3	44,6
	№2	10,0×10,1×10,1	2064	42,5	
	№3	10,0×10,0×10,1	2040	44,9	

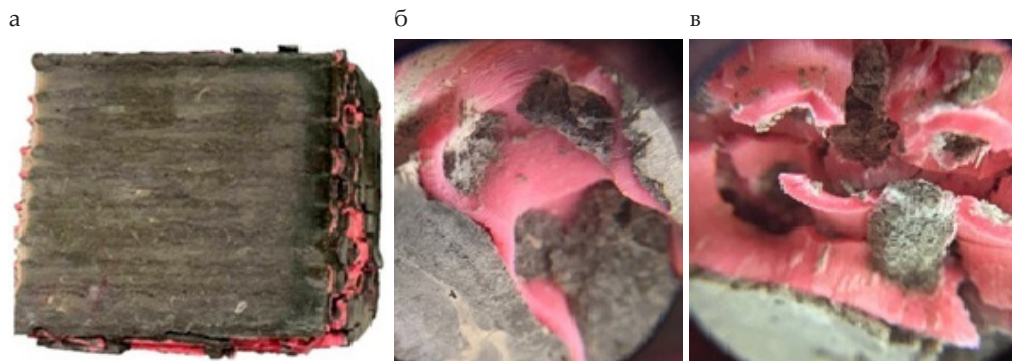


Рис. 7. Образец с каркасом после испытания на сжатие и его фрагменты:
а – образец после испытания на сжатие; б – снимок сделан перпендикулярно направлению основных каналов; в – снимок сделан в направлении основных каналов
Fig. 7. Sample with a frame after compression testing and its fragments: a – sample after compression testing; б – the picture was taken perpendicular to the direction of the main channels; в – the picture was taken in the direction of the main channels

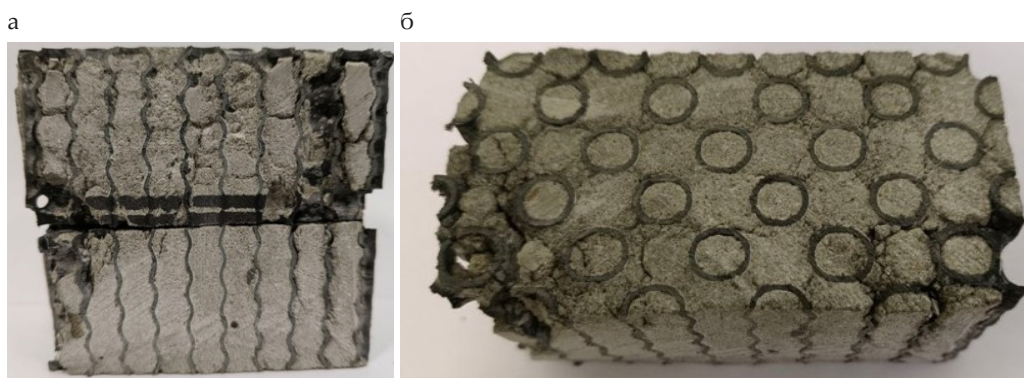


Рис. 8. Внутреннее наполнение ТПП-каркаса самоуплотняющимся цементным раствором в твердом состоянии (взят образец, который подвергался разрушению при определении прочности на сжатие):
а – по направлению заливки, вертикально; б – в горизонтальной плоскости, т. е. перпендикулярно заливке раствора
Fig. 8. Internal filling of the TPS-frame with self-sealing concrete mortar in a solid state (a sample was taken that was subjected to destruction during the determination of compressive strength):
а – in the direction of pouring, vertically; б – in the horizontal plane, i.e. perpendicular to the pouring solution

В исследовании была проведена оценка физико-механических характеристик композитных изделий на основе пластиковых каркасов с ТПП, заполненных самоуплотняющимся раствором. Каркасы ТПП были изготовлены методом 3D-печати. Экспериментальные образцы в форме кубов и балочек подверглись испытаниям на прочность при сжатии и изгибе с целью сравнения их с контрольными образцами без каркасов.

Полученные результаты демонстрируют увеличение значений предельной прочности на изгиб более чем на 100 % с ТПП-каркасом в сравнении с контрольными образцами. Это указывает на потенциал трехпериодичных поверхностей в повышенной устойчивости к изгибающим нагрузкам, что может быть обу-

словлено оптимизированным распределением напряжений в композитном изделии за счет геометрии структур ТПП. Однако наблюдается снижение прочности на сжатие, которое на данном этапе не является однозначным по значениям и необходимо проводить дополнительные исследования с корректировками на стадии изготовления композитных изделий в виде кубов.

Особый интерес вызывает уменьшение массы композитного изделия в среднем на 10 % для всех видов образцов. Подобное недостижимо для более близкого аналога к нашей разработке, а именно железобетонных изделий с металлической арматурой.

Авторы обратили внимание на механизм разрушения, который преимущественно ло-

кализуется на границе соприкосновения пластикового каркаса и затвердевшего цементного раствора. Это указывает на недостаточную величину адгезии между структурными элементами композитного изделия, что в свою очередь вызвано различиями в поверхностных свойствах материалов, является причиной разрушения образцов в настоящее время. Поэтому дальнейшие исследования будут связаны с изучением адгезии, включая анализ поверхностной энергии и возможное применение адгезионных промоторов, необходимых для предотвращения преждевременного отслоения и как результат разрушения образцов. Также в будущих работах планируется изучение альтернативных типов ТПП-каркасов и варьирования растворной части композитного изделия с целью баланса механических характеристик и расширения сферы применения разрабатываемого нами композиционного изделия.

В целом, совмещение 3D-печатных пластиковых каркасов с трехпериодичными поверхностями и самоуплотняющегося цементного раствора в единое композиционное изделие открывает перспективы для создания высокопрочных строительных материалов со сниженным весом, подходящих для различного применения, в частности для сейсмостойких конструкций.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-23-00123, <https://rscf.ru/project/25-23-00123>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. «Design, fabrication and analysis of triply periodic minimal surface concrete units». Journal of Building Engineering. 2024. V. 98. Art. 111286. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.111286.
2. Building Materials and the Climate: Constructing a New Future. United Nations Environment Programme. Nairobi: United Nations Environment Programme. 2023. 48 p.
3. CO₂ Emissions. Global Energy Review 2025 / International Energy Agency (IEA). Paris: IEA. 2025.
4. Wiesenhuetter S., Goertzen T., Vakaliuk I., Curbach M., Scheerer S., Niemeyer A.C., Noennig J.R. Triply Periodic Minimal Surfaces – A Novel Design Approach for Lightweight CRC Structures. Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland. 2023. P. 1449–1458. DOI: 10.1007/978-3-031-32511-3_148.
5. Jianping Shi, Liya Zhu, Lan Li, Zongan Li, Jiquan Yang & Xingsong Wang. TPMS-based method for modeling porous scaffolds for bionic bone tissue engineering. Scientific Reports. 2018. V. 8. Art. 7395. DOI: 10.1038/s41598-018-25750-9.
6. Skoratko A., Szatkiewicz T., Katzer J., Jagoda M. Mechanical properties of mortar beams reinforced by

gyroid 3D printed plastic spatial elements. Cement and Concrete Composites. 2022. V. 134. Art. 104809. P. 1–11.

7. Smolkov M.I., Blatova O.A., Krutov A.F., Blatov V.A. Generating triply periodic surfaces from crystal structures: the tiling approach and its application to zeolites. Acta Crystallogr A Found Adv. 2022. Vo. 78(4). P. 327–336. DOI: 10.1107/S2053273322004545.

8. Blatov V.A., Delgado-Friedrichs O., O’Keeffe M., Proserpio D.M. Three-periodic nets and tilings: natural tilings for nets. Acta Crystallogr A. 2007. V. 63(5). P. 418–425. DOI: 10.1107/S0108767307038287.

9. Eremin A.V., Frolov M.A., Krutov A.F., Smolkov M.I., Shulga A.S., Bragin D.M., Popov A.I., Blatov V.A. Mechanical properties of porous materials based on new triply periodic and minimal surfaces. Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2024. V. 31(29). P. 11320–11336. DOI: 10.1080/15376494.2024.2303724.

10. Blatov V.A., Shevchenko A.P., Proserpio D.M. Applied Topological Analysis of Crystal Structures with the Program Package ToposPro. Cryst Growth Des. 2014. V. 14(7). P. 3576–3586. DOI: 10.1021/cg500498k.

11. Eremin A.V., Frolov M.A., Krutov A.F., Smolkov M.I., Shulga A.S., Bragin D.M., Popov A.I., Blatov V.A. Mechanical properties of porous materials based on new triply periodic and minimal surfaces. Mechanics of Advanced Materials and Structures. V. 31(29). P. 11320–11336. DOI: 10.1080/15376494.2024.2303724.

12. Porous 3D, Samara, Russia: SCTMS [Электронный ресурс]. URL: <https://p3d.topcryst.com/software/> (дата обращения: 15.09.2025).

13. Frolov M.A., Smolkov M.I., Krutov A.F., Burchakov A.V., Blatov V.A. Comparative analysis of mechanical properties of porous structures obtained on the basis of triply periodic P-surfaces. Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2025. P. 1–18. DOI: 10.1080/15376494.2025.2518468.

14. Анализ влияния микрокальцита на эффективность совместной работы наполненных полимерных покрытий с бетонными основаниями / А.Н. Чернов, Д.Р. Низин, Т.А. Низина, А.И. Горенкова, Д.А. Клементьева // Известия вузов. Строительство. 2018. № 9. С. 60–67.

15. Свойства материалов на основе портландцемента с добавкой метакаолина МКЖЛ / С.А. Краснобаева, И.Н. Медведева, А.С. Брыков, З.В. Стафеева // Цемент и его применение. 2015. Вып. 1. С. 50–55.

REFERENCES

1. «Design, fabrication and analysis of triply periodic minimal surface concrete units». Journal of Building Engineering. 2024. V. 98. Art. 111286. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.111286
2. Building Materials and the Climate: Constructing a New Future. United Nations Environment Programme. Nairobi: United Nations Environment Programme. 2023. 48 p.
3. CO₂ Emissions. Global Energy Review 2025 / International Energy Agency (IEA). Paris: IEA. 2025.
4. Wiesenhuetter S., Goertzen T., Vakaliuk I., Curbach M., Scheerer S., Niemeyer A.C., Noennig J.R. Triply

Periodic Minimal Surfaces – A Novel Design Approach for Lightweight CRC Structures. Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland. 2023. P. 1449–1458. DOI: 10.1007/978-3-031-32511-3_148

5. Jianping Shi, Liya Zhu, Lan Li, Zongan Li, Jiquan Yang & Xingsong Wang. TPMS-based method for modeling porous scaffolds for bionic bone tissue engineering. Scientific Reports. 2018. V. 8. Art. 7395. DOI: 10.1038/s41598-018-25750-9

6. Skoratko A., Szatkiewicz T., Katzer J., Jagoda M. Mechanical properties of mortar beams reinforced by gyroid 3D printed plastic spatial elements. Cement and Concrete Composites. 2022. V. 134. Art. 104809. P. 1–11.

7. Smolkov M.I., Blatova O.A., Krutov A.F., Blatov V.A. Generating triply periodic surfaces from crystal structures: the tiling approach and its application to zeolites. Acta Crystallogr A Found Adv. 2022. Vo. 78(4). P. 327–336. DOI: 10.1107/S2053273322004545

8. Blatov V.A., Delgado-Friedrichs O., O’Keeffe M., Proserpio D.M. Three-periodic nets and tilings: natural tilings for nets. Acta Crystallogr A. 2007. V. 63(5). P. 418–425. DOI: 10.1107/S0108767307038287

9. Eremin A.V., Frolov M.A., Krutov A.F., Smolkov M.I., Shulga A.S., Bragin D.M., Popov A.I., Blatov V.A. Mechanical properties of porous materials based on new triply periodic and minimal surfaces. Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2024. V. 31(29). P. 11320–11336. DOI: 10.1080/15376494.2024.2303724

10. Blatov V.A., Shevchenko A.P., Proserpio D.M. Applied Topological Analysis of Crystal Structures with the Program Package ToposPro. Cryst Growth Des. 2014. V. 14(7). P. 3576–3586. DOI: 10.1021/cg500498k

11. Eremin A.V., Frolov M.A., Krutov A.F., Smolkov M.I., Shulga A.S., Bragin D.M., Popov A.I., Blatov V.A. Mechanical properties of porous materials based on new triply periodic and minimal surfaces. Mechanics of Advanced Materials and Structures. V. 31(29). P. 11320–11336. DOI: 10.1080/15376494.2024.2303724

12. Porous 3D, Samara, Russia: SCTMS. Available at: <https://p3d.topcryst.com/software/> (accessed 15 September 2025).

13. Frolov M.A., Smolkov M.I., Krutov A.F., Burchakov A.V., Blatov V.A. Comparative analysis of mechanical properties of porous structures obtained on the basis of triply periodic P-surfaces. Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2025. P. 1–18. DOI: 10.1080/15376494.2025.2518468.

14. Chernov A.N., Nizin D.R., Nizina T.A., Gorenkova A.I., Klementyeva D.A. Analysis of the influence of microcalcite on the efficiency of joint work of filled polymer coatings with concrete bases. *Izvestiia vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction], 2018, no. 9, pp. 60–67. (in Russian)

15. Krasnobaeva S.A., Medvedeva I.N., Brykov A.S., Stafeyeva Z.V. Properties of materials based on Portland cement with the addition of metakaolin MKZhL. *Tsement i ego primeneniye* [Cement and its application], 2015, no. 1, pp. 50–55. (in Russian)

Об авторах:

ФРОЛОВ Евгений Игоревич

кандидат химических наук, доцент,
заведующий кафедрой производства строительных
материалов, изделий и конструкций
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: frolov.ei@samgtu.ru

АНЦЕВ Максим Александрович

аспирант кафедры производства строительных
материалов, изделий и конструкций
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: max2203200@mail.ru

СМОЛЬКОВ Михаил Игоревич

младший научный сотрудник НИЛ Вычислительной
геометрии
и теоретического материаловедения
Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23
E-mail: m.smolkov97@gmail.com

ФРОЛОВ Михаил Александрович

кандидат технических наук,
доцент кафедры общей и неорганической химии
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: panosonig@mail.ru

FROLOV Evgeniy Ig.

PhD in Chemical Sciences, Associate Professor,
Head of the Production of Building Materials, Products
and Structures Chair
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244
E-mail: frolov.ei@samgtu.ru

ANTSEV Maxim Al.

Post-graduate student of the Production of Building
Materials, Products and Structures Chair
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244
E-mail: max2203200@mail.ru

SMOLKOV Mikhail Ig.

Associate Researcher at the Research Laboratory
of Computational Geometry
and Theoretical Materials Science
Povolzhskiy State University of Telecommunications
and Informatics
443010, Russia, Samara, L. Tolstoy st., 23
E-mail: m.smolkov97@gmail.com

FROLOV Mikhail Al.

PhD in Engineering Sciences,
Associate Professor of the General and Inorganic
Chemistry Chair
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244
E-mail: panosonig@mail.ru

Для цитирования: Фролов Е.И., Анцев М.А., Смольков М.И., Фролов М.А. Композитные изделия, состоящие из каркаса со структурой трехпериодичных поверхностей, заполненного самоуплотняющимся цементным раствором // Градостроительство и архитектура. 2025. Т. 15, № 4. С. 73–82. DOI: 10.17673/Vestnik.2025.04.11.
For citation: Frolov E.I., Antsev M.A., Smolkov M.I., Frolov M.A. Composite products consisting of a frame with a structure of three-periodic surfaces filled with self-sealing concrete mortar. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2025, vol. 15, no. 4, pp. 73–82. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2025.04.11.

Принята: 10.06.2025 г.