УДК 691.175.5/.8
doi: 10.33622/0869-7019.2024.06.59-65

Прочностные свойства 3D-печатных поликарбонатов

Кирилл Владимирович АВДЕЕВ[1], зам. генерального директора – главный инженер, 6136133@mail.ru

Екатерина Владимировна ДОМАРОВА[1,2], инженер, старший преподаватель НИУ МГСУ, cathie_p@mail.ru

Никита Андреевич КУДРЯВЦЕВ[1], инженер, n.kudryavtsev@cniipz.com

Максим Сергеевич КАЛИНИН[1], инженер, maksikalinin@gmail.com

Максим Евгеньевич КЕЙЗБЕРГ[1], инженер, m.keisberg@cniipz.com

[1] Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий, 127238 Москва, Дмитровское ш., 46, корп. 2

[2] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. *Представлен аналитический обзор исследований, посвященных изучению свойств 3D-печатного поликарбоната, а также изложены результаты испытаний на растяжение образцов, распечатанных на 3D-принтере. Цель работы — изучение свойств 3D-печатного поликарбоната для внедрения конструкций из данного материала в практику проектирования и строительства. Проведен цикл испытаний для оценки влияния параметров печати (вид решетки, угол поворота растра, процент заполнения образца) на значение разрушающей нагрузки. Исследовались три вида решетки — «треугольники», «соты», «сетка». Результаты испытаний показали, что процесс деформирования и разрушения образцов зависит от угла поворота растра и вида решетки. Повышение процента заполнения образца также оказывает влияние на максимальное напряжение, которое может выдержать образец. При этом для таких видов решетки, как «сетка» и «соты», повышение процента заполнения во всем исследованном диапазоне стабильно приводит к увеличению максимально допустимых напряжений, а для треугольной решетки рост наблюдался только до 80 % заполнения. В этой связи для внедрения в практику строительства конструкций, изготовленных с применением аддитивных технологий, необходимо дальнейшее изучение их физических и механических свойств при различных видах напряженного состояния.*

Ключевые слова: *поликарбонат, 3D-печать, прочность, процент заполнения, вид решетки, испытания на растяжение*

Для цитирования: *Авдеев К. В., Домарова Е. В., Кудрявцев Н. А., Калинин М. С., Кейзберг М. Е.* Прочностные свойства 3D-печатных поликарбонатов // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 6. С. 59–65. doi: 10.33622/0869-7019.2024.06.59-65

STRENGTH PROPERTIES OF 3D PRINTED POLYCARBONATES

Kirill V. AVDEEV[1], 6136133@mail.ru, **Ekaterina V. DOMAROVA**[1,2], cathie_p@mail.ru

Nikita A. KUDRYAVTSEV[1], n.kudryavtsev@cniipz.com, **Maksim S. KALININ**[1], maksikalinin@gmail.com

Maksim E. KEIZBERG[1], m.keisberg@cniipz.com

[1] Central Research and Design and Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures – TsNIIPromzdaniy, Dmitrovskoe shosse, 46, korp. 2, Moscow 127238, Russian Federation

[2] National Research Moscow State Civil Engineering University, Yaroslavskoye shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Abstract. *An analytical review of studies devoted to the study of the properties of 3D-printed polycarbonate, as well as the results of tensile tests of samples printed on a 3D printer are presented. The purpose of the work is to study the properties of 3D-printed polycarbonate for the introduction of structures made of this material into the practice of design and construction. A test cycle was carried out to assess the effect of printing parameters (type of grid, angle of rotation of the raster, percentage of sample filling) on the value of the destructive load. Three types of grids were studied — "triangles", "honeycombs", "grid". The test results showed that the process of deformation and destruction of samples depends on the angle of rotation of the raster and the type of lattice. An increase in the percentage of sample filling also has an effect on the maximum stress that the sample can withstand. At the same time, for such types of grating as "grid" and "honeycomb", an increase in the percentage of filling in the entire studied range consistently leads to an increase in the maximum allowable stresses, and for a triangular grating, an increase was observed only up to 80% of the filling. In this regard, in order to introduce into practice the construction of structures made using additive technologies, it is necessary to further study their physical and mechanical properties under various types of stress conditions.*

Keywords: *polycarbonate, 3D printing, strength, percentage of filling, type of lattice, tensile tests*

For citation: Avdeev K. V., Domarova E. V., Kudryavtsev N. A., Kalinin M. S., Keizberg M. E. Strength Properties of 3D Printed Polycarbonates. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2024, no. 6, pp. 59–65. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2024.06.59-65

© АВДЕЕВ К. В., ДОМАРОВА Е. В., КУДРЯВЦЕВ Н. А., КАЛИНИН М. С., КЕЙЗБЕРГ М. Е., 2024

Введение

В современном строительстве используются не только традиционные материалы, такие как железобетон, сталь, дерево, стекло, но и инновационные, например полимеры. К ним относится поликарбонат (PC) — синтетический полимер с высокой прочностью, получаемый из линейного полиэфира угольной кислоты и двухатомных фенолов. Благодаря своим уникальным свойствам, он успешно применяется в производстве материалов в различных отраслях промышленности.

Поликарбонат широко используется и в строительных конструкциях, например в светопрозрачных ограждающих конструкциях в составе кровель, фасадов, элементов интерьера [1—3]. Исследованию физико-механических характеристик поликарбоната, а также проектированию конструкций с его применением посвящены работы зарубежных ученых [4—6].

В статьях [7—9] опубликованы результаты экспериментов, направленных на определение прочностных и деформативных характеристик монолитного поликарбоната. В публикациях [10, 11] подробно рассматриваются различные физические и химические процессы, происходящие в структуре поликарбоната, что способствует более глубокому пониманию процессов его разрушения.

В работе [12] авторы сравнивают результаты испытаний образцов монолитного поликарбоната российских и зарубежных специалистов с имеющимися у производителей справочными данными. При этом основное количество работ посвящено изучению конструкций с применением монолитного поликарбоната, в то время как 3D-печатные поликарбонаты практически не исследованы.

Большинство печатных полимеров теряют свои физические свойства в диапазоне температуры выше 60 °С, а при температуре ниже минус 20 °С становятся хрупкими. Поликарбонат является лидером по термостойкости и морозоустойчивости, при этом он очень прочный и самый жесткий из всех термопластов, обладает высокой ударной прочностью. Кроме того, прочность поликарбоната существенно выше, чем у пластиков PLA и ABS.

По сравнению почти со всеми другими пластиками для 3D-печати, представленными в настоящее время на рынке, поликарбонатные материалы могут обеспечить лучшую термостойкость [13], поскольку выдерживают температуру до 120 °С.

Полимер обладает высокой химической устойчивостью к большинству неинертных веществ, что дает возможность применения в агрессивных средах без изменения его химического состава и свойств.

К недостаткам данного материала можно отнести высокую термоусадку, которая приводит к следующим проблемам при печати — изменению геометрии, расслоению, отлипанию от стола 3D-принтера. Кроме того, поликарбонат гигроскопичен и требует особых условий хранения и сушки. Длительное воздействие ультрафиолетовых лучей вызывает деградацию полимерной структуры материала, что приводит к потере его прочности, а также изменению цвета и текстуры. Для защиты поликарбоната от ультрафиолетового излучения и продления срока его службы используют специальные добавки или защитные покрытия.

Несмотря на перечисленные особенности, поликарбонат является перспективным материалом для применения в строительных конструкциях, созданных с использованием аддитивных технологий. Его используют для быстрого изготовления моделей и узлов проектируемых конструкций. Благодаря вариативности печати можно воспроизводить уменьшенные модели уникальных зданий и сооружений.

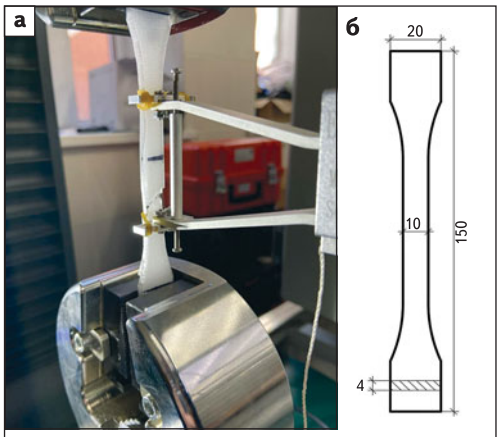
Кроме того, изделия из поликарбоната могут использоваться как ремонтный материал для фасадных и кровельных конструкций. С использованием технологии 3D-печати возможно создать крепеж, детали или другие изделия разной формы. Механические характеристики таких деталей рассматриваются в работах [14, 15]. Ограниченная область применения обусловливается малой изученностью свойств материала.

Отметим, что в настоящее время в России не существует норм по расчету конструкций из пластмасс, изготовленных с применением аддитивных технологий.

Для обеспечения механической безопасности конструкций из поликарбоната, изготовленных с применением аддитивных технологий, а также разработки предложений по нормированию параметров материалов и конструкций, необходимо проведение испытаний поликарбоната для оценки его физико-механических свойств и применимости различных методик испытания пластмасс для 3D-печатного поликарбоната. Кроме того, представляет интерес изучение факторов, влияющих на прочность и деформативность 3D-печатных конструкций, таких как процент заполнения образца, вид решетки, угол поворота.

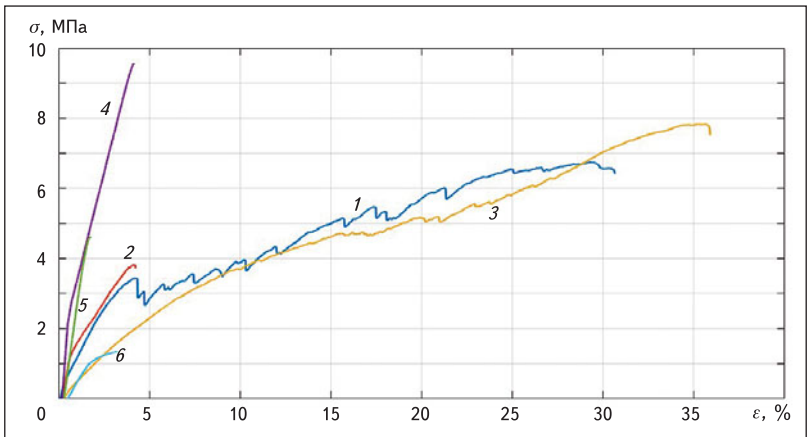
Цель работы — исследование физико-механических свойств 3D-печатного поликарбоната, а также факторов, оказывающих влияние на них, для дальнейшего более широкого внедрения данной технологии в строительную отрасль.

В научных работах [16—18] рассматривается влияние параметров печати на прочностные



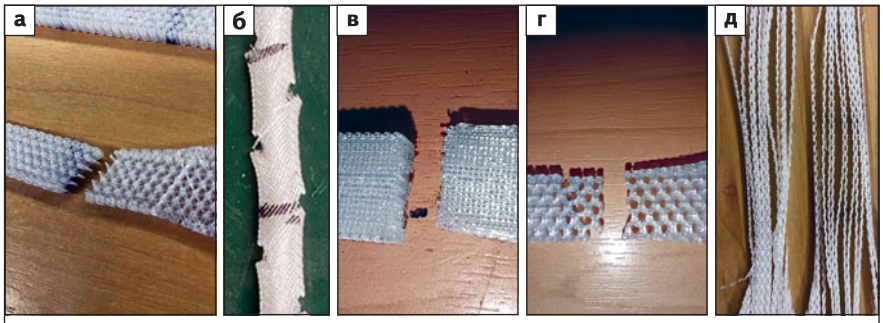
а — общий вид; б — схема образца с размерами, мм

Рис. 1. ***Испытание на растяжение 3D-печатного поликарбоната по методике ГОСТ 11262***



1 — «сетка» — 0°; 2 — «треугольники» — 0°; 3 — «соты» — 0°; 4 — «сетка» — 45°; 5 — «треугольники» — 30°; 6 — «соты» — 90°

Рис. 2. ***Графики зависимости напряжений σ от деформаций ε для различных видов решетки и углов поворота растра при степени заполнения 60 %***



а — «треугольники» с углом поворота 0° и 30°; б, в — «сетка» с углом поворота соответственно 0° и 45°; г, д — «соты» с углом поворота соответственно 90° и 0°

Рис. 3. ***Характер разрушения образцов при растяжении для различных вариантов решетки***

свойства различных полимеров. В статье [4] экспериментальными методами для 3D-печатных ABS-композитов определены механические свойства при различных напряженных состояниях: растяжении, изгибе и сжатии. Рассматривалось влияние решетки, процента заполнения, угла направления печати образцов на величину разрушающей нагрузки. Эксперименты показали, что прочность материала пропорциональна проценту заполнения, а также зависима от геометрии решетки при сжатии и изгибе.

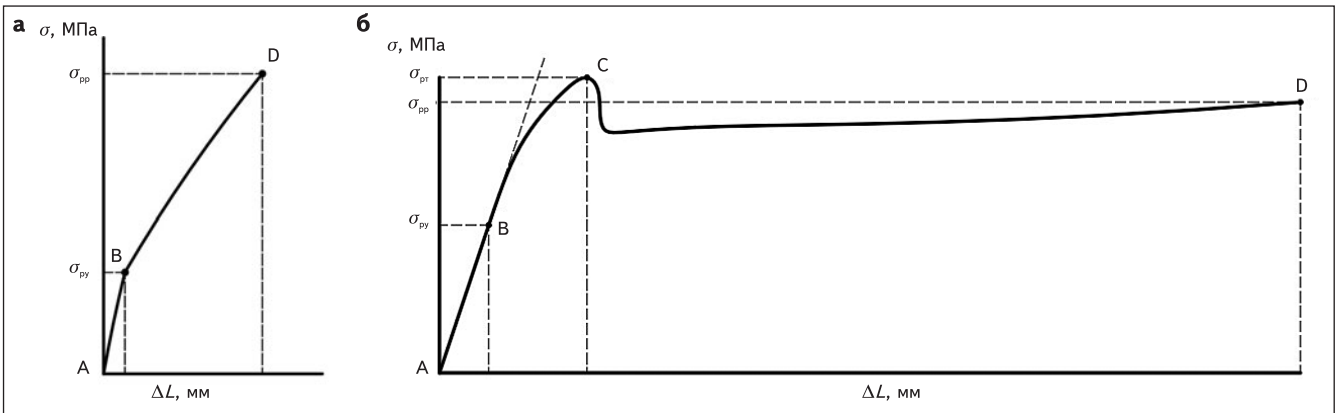
В статье [10] анализируются реологические и механические свойства смесей ABS/PC. Результаты данного исследования показывают, что технологичность поликарбоната может быть улучшена добавлением ABS. Экспериментально определенные значения предела текучести при растяжении следуют «правилу смесей», показывая уменьшение его значения с увеличением содержания ABS. Однако ни ударная вязкость, ни удлинение при разрыве не подчиняются этому правилу, и оба показателя значительно ниже, чем у материала без добавления ABS.

Проведение испытаний

Для изучения прочностных характеристик 3D-печатного поликарбоната из пластика, представленного на российском рынке, анализа влияния факторов печати на разрушающую нагрузку, а также для сопоставления работы монолитного и 3D-печатного поликарбонатов под нагрузкой авторами статьи в лаборатории ЦНИИПромзданий проведен цикл экспериментов.

В данной статье представлены результаты испытания на растяжение образцов, напечатанных с различным видом решетки и процентом заполнения. Испытания 3D-печатного поликарбоната на растяжение выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 34370—2017 «Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. Ч. 1. Общие принципы» и ГОСТ 11262—2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение», где приведены общие принципы по определению механических свойств при растяжении и требования к типу образцов и методам их подготовки соответственно.

Для проведения испытаний было напечатано 72 образца (по три образца для каждого вида решетки, угла поворота и степени заполнения). Тип и размеры образцов приняты в соответствии с ГОСТ 11262 *(рис. 1)*. Были приняты следующие параметры печати: температура стола —105 °С; температура сопла 3D-принтера — 270 °С; толщина слоев печати — 0,2 мм; скорость печати — 60 мм/с;



а — 3D-печатный поликарбонат; б — монолитный поликарбонат; A, B, C и D — характерные точки

Рис. 4. ***Графики зависимости напряжения σ от относительной деформации ΔL при испытании поликарбоната на растяжение***

угол поворота растра — 0, 30, 45 и 90°. Для образцов были приняты следующие степени заполнения: 60, 70, 80 и 90 %. Виды заполнения — «сетка», «треугольники», «соты».

Ввиду технологических особенностей печати для вида заполнений «соты» и «треугольники» вместо угла 45°, при котором крайние ячейки остаются без боковых граней, что ведет к уменьшению сечения образца, были приняты углы поворота 90 и 30° соответственно.

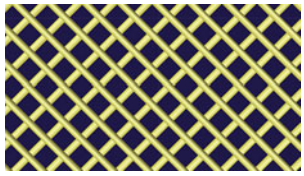
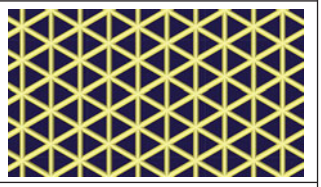
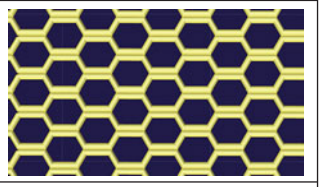
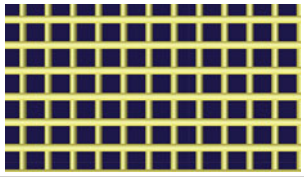
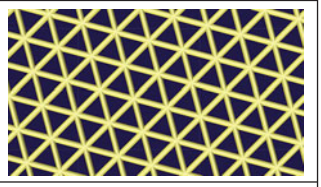
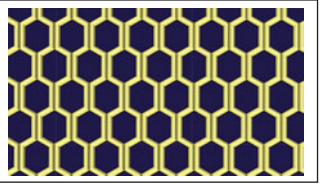
При испытании образец растягивали вдоль его главной продольной оси с постоянной скоростью, в процессе растяжения измеряли нагрузку, выдерживаемую образцом, и удлинение образца *(см. рис. 1)*.

Результаты исследования

По результатам испытаний поликарбоната были сформированы сводные графики зависимости напряжения от деформации при растяжении для образцов из полимеров. На *рис. 2* представлены графики при различных видах решетки и угла поворота растра при степени заполнения образца 60 %. Для заполнения 70, 80 и 90 % характер графиков аналогичен.

Характер разрушения образцов при растяжении для различ-

Сводная таблица результатов испытаний на растяжение

Вид заполнения (угол растра, град)	Процент заполнения, %	Максимальное значение напряжения, МПа	Вид в модели
«Сетка» (0)	60	7	
	70	11	
	80	12	
	90	17	
«Треугольники» (0)	60	3,9	
	70	5,1	
	80	7	
	90	6,5	
«Соты» (0)	60	7,9	
	70	10,1	
	80	11,8	
	90	16	
«Сетка» (45)	60	9,4	
	70	13,8	
	80	12,5	
	90	26	
«Треугольники» (30)	60	4,6	
	70	5,5	
	80	8,1	
	90	12	
«Соты» (90)	60	1,25	
	70	2,25	
	80	2,25	
	90	2,25	

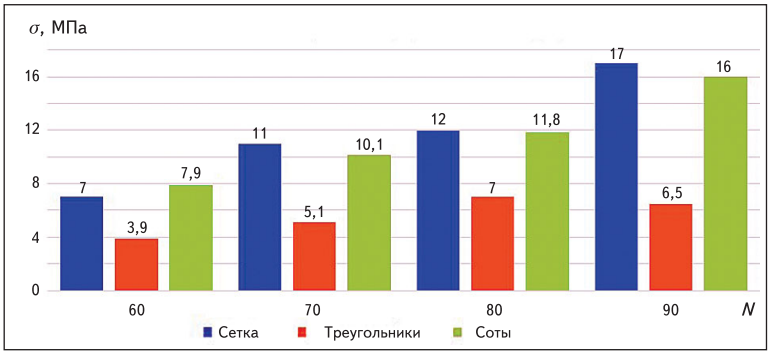


Рис. 5. ***Максимальные напряжения σ при разных процентах заполнения N образца и угле поворота растра 0°***

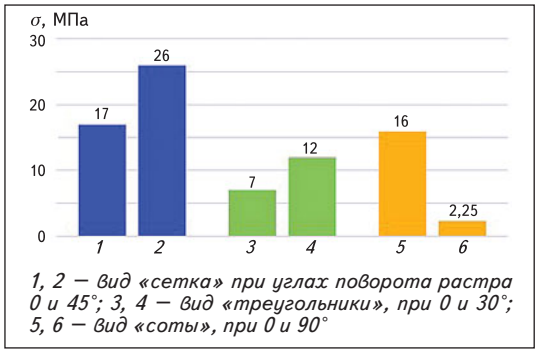


Рис. 6. ***Максимальные напряжения σ при растяжении при разных углах поворота растра для заполнения образца 90 %***

ных вариантов решетки представлен на *рис. 3*.

Разрушение образца с типом заполнения «треугольник» происходит по связям решетки для обоих углов поворота растра *(рис. 3а)*. Образцы с видом заполнения «сетка» и углом поворота растра 0° имели значительные относительные деформации при разрушении по сравнению с большинством остальных образцов, но меньшую прочность, чем у образцов с углом поворота растра 45°. При этом в процессе деформирования под нагрузкой до разрушения происходили местные надрывы образца по всей его длине *(рис. 3б)*. Для образцов «сетка» с углом поворота растра 45° характерна наиболее высокая прочность и малые относительные деформации *(рис. 3в)*.

Образцы с заполнением в виде сот в зависимости от угла растра имели кардинально отличные сценарии разрушения. При угле поворота растра 90° образец быстро разрушается по узлам решетки без расслоения, показывая наименьшую прочность по сравнению с другими видами решетки и углом поворота растра *(рис. 3г)*. В образцах с углом поворота растра 0° во время испытания происходило неприемлемое расслоение образца под нагрузкой *(рис. 3д)*.

Для сопоставления работы монолитного и 3D-печатного поликарбонатов приведем график зависимости «напряжения—деформации» при растяжении для монолитного поликарбоната в соответствии с работой [12] *(рис. 4)*.

В монолитном поликарбонате после достижения предела текучести (точка *C* на *рис. 4б*) растягивающие напряжения падают, при этом продольные деформации увеличиваются практически без изменения нагрузки, т. е. наблюдаются пластические деформации. В образце образуется шейка, в зоне которой происходит дальнейшее разрушение в точке *D* при напряжении 50 МПа [12].

Образцы из 3D-печатного поликарбоната не имеют площадки «текучести». На диаграмме работы 3D-печатного поликарбоната *(рис. 4а)* можно выделить характерную точку *B*, соответствующую концу упругой работы материала, и точку *D*, которая соответствует разрушающей нагрузке. При этом участок упругих деформаций относительно небольшой. В точке *B* виден излом в диаграмме деформирования, т. е. изменение жесткости материала, а на участке *BD* наблюдается почти линейная зависимость напряжений от деформаций, вплоть до точки *D*, соответствующей разрушению образца. Для наиболее прочного варианта образцов («сетка» с углом поворота растра 45° и степенью заполнения 90 %) напряжения при разрыве составляют 26 МПа (*см. таблицу*), что практически в 2 раза меньше прочности монолитного поликарбоната.

Результаты испытаний образцов на растяжение представлены в сводной *таблице*.

Для оценки влияния изменения параметров печати образцов на прочностные свойства 3D-печатного поликарбоната построены диаграммы, представленные на *рис. 5* и *6*. Визуализация данных позволяет наглядно продемонстрировать выявленные зависимости.

Анализ диаграмм *(см. рис. 5)* показывает, что повышение процента заполнения образца также оказывает влияние на максимальное напряжение, которое может выдержать образец. При этом для таких видов заполнения как «сетка» и «соты» повышение процента заполнения во всем исследованном диапазоне от 60 до 90 % с шагом 10 % стабильно приводит к увеличению максимально допустимых напряжений. В то же время для треугольной решетки рост напряжений наблюдался только до 80 % заполнения, поэтому дальнейшее увеличение процента заполнения для такого вида решетки нецелесообразно.

Угол поворота растра оказывает влияние на максимальное напряжение образца при испытании

(см. рис. 6). Так, для вида заполнения «сетка» и «треугольники» с углом поворота 45 и 30° соответственно, наблюдается повышение прочностных свойств образцов, а для вида заполнения «соты» с углом поворота 90° наоборот, происходит их снижение, так как уже при невысоких напряжениях происходит разрушение по линиям соприкосновения сот.

Вывод

Проведенные испытания образцов из 3D-печатного поликарбоната показали зависимость их прочностных свойств от параметров печати и выявили особенности в работе конструкций под нагрузкой по сравнению с монолитным поликарбонатом. Для возможности внедрения в практику строительства конструкций, изготовленных с применением аддитивных технологий, необходимо дальнейшее изучение физических и механических свойств полимеров, распечатанных на 3D-принтере. Авторами статьи проводятся дальнейшие экспериментальные исследования 3D-печатных конструкций из поликарбоната при различных видах напряженного состояния (сжатие, изгиб, растяжение) с целью выявления влияния процента заполнения образца, вида заполнения, угла поворота на прочностные характеристики. Кроме того, представляет научный интерес исследование реологических характеристик и длительной прочности 3D-печатных поликарбонатов, а также оценка влияния температуры испытаний на физико-механические характеристики. С учетом этого можно сказать, что для применения поликарбоната в аддитивных технологиях необходимы дальнейшие комплексные исследования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. *Авдеев К. В., Тучин М. А., Океанов Г. В., Бобров В. В.* К вопросу о перспективах применения модульных поликарбонатных систем в светопрозрачных ограждающих конструкциях // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 3. С. 8–12. doi: 10.33622/0869-7019.2022.03.8-12

1. Avdeev K. V., Tuchin M. A., Okeanov G. V., Bobrov V. V. On the prospects of using modular polycarbonate systems in translucent enclosing structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2022, no. 3, pp. 8–12. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2022.03.8-12

2. *Океанов Г. В., Гранева А. В.* Архитектурные и технологические особенности большепролетного светопрозрачного покрытия стадиона «Казань-Арена» // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 5. С. 13–18. doi: 10.33622/0869-7019.2021.05.13-18

2. Okeanov G. V., Graneva A. V. Architectural and technological features of the large-span translucent coating of the Kazan Arena stadium. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2021, no. 5, pp. 13–18. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2021.05.13-18

3. *Лейкина Д. К., Океанов Г. В.* Архитектура большепролетных светопрозрачных покрытий футбольных стадионов // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 6. С. 9–16.

3. Leikina D. K., Okeanov G. V. Architecture of large-span translucent coverings of football stadiums. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2018, no. 6, pp. 9–16. (In Russ.).

4. Quader Shurjeel A., Pothula N., Punna E. Experimental investigation of strength properties of 3D printed ABS composites [Экспериментальное исследование прочностных свойств ABS-композитов, напечатанных на 3D-принтере]. *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 309, pp. 8–16. doi: 10.1051/e3sconf/202130901148

5. Bahar A., Belhabib S., Guessasma S. et al. Mechanical and thermal properties of 3D printed polycarbonate [Механические и термические свойства поликарбоната, напечатанного на 3D-принтере]. *Energies*, 2022, vol. 15(10), pp. 3686–3697. doi: 10.3390/en15103686

6. Geng P., Zhao J., Gao Z.W. et al. Effects of printing parameters on the mechanical properties of high performance polyphenylene sulfide three-dimensional printing [Влияние параметров печати на механические свойства высокоэффективной трехмерной печати на основе полифениленсульфида]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2021, vol. 8(1), pp. 33-41. doi: 10.1089/3dp.2020.0052

7. *Божанов П. В., Трещев А. А.* Определение прочностных критериев при возникновении пластических деформаций в поликарбонате // Инновации и инвестиции. 2018. № 12. С. 323–326.

7. Bozhanov P. V., Treshchev A. A. Determination of strength criteria in the occurrence of plastic deformations in polycarbonate. *Innovacii i investicii*, 2018, no. 12, pp. 323–326. (In Russ.).

8. *Марков А. В., Семеняк П. А.* Растрескивание листового монолитного поликарбоната в напряженном состоянии // Тонкие химические технологии. 2018. Т. 13. № 3. С. 72–78.

8. Markov A. V., Semenyak P. A. Cracking of monolithic polycarbonate sheets in a stressed state. *Tonkie himicheskie tekhnologii*, 2018, vol. 13, no. 3, pp. 72–78. (In Russ.).

9. *Авдеев К. В., Бобров В. В., Тучин М. А.* [и др.]. Влияние температуры на физико-механические свойства монолитного поликарбоната // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2024. Т. 20. № 1. С. 73–83. doi: 10.22363/1815-5235-2024-20-1-73-83

9. Avdeev K. V., Bobrov V. V., Tuchin M. A. et al. Effect of temperature on physical and mechanical properties of monolithic polycarbonate. *Stroitel'naya mekhanika*

inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij, 2024, vol. 20, no. 1, pp. 73–83.
doi: 10.22363/1815-5235-2024-20-1-73-83

10. Khan M. M. K., Liang R. F., Gupta R. K., Agarwal S. Rheological and mechanical properties of ABS/PC blends [Реологические и механические свойства смесей ABS/PC]. *Korea-Australia Rheology Journal*, 2005, vol. 17(1), pp. 1–7.
11. Zou R., Xia Y., Liu S. et al. Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material [Изотропная и анизотропная эластичность и податливость материалов для 3D-печати]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, vol. 99, pp. 506–513.
doi: 10.1016/j.compositesb.2016.06.009
12. *Авдеев К. В., Тучин М. А., Бобров В. В.* [и др.]. Испытания листового монолитного поликарбоната для конструкций покрытий // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 10. С. 56–61.
doi: 10.33622/0869-7019.2022.10.56-61
12. Avdeev K. V., Tuchin M. A., Bobrov V. V. et al. Testing of monolithic polycarbonate sheet for coating structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2022, no. 10, pp. 56–61. (In Russ.).
doi: 10.33622/0869-7019.2022.10.56-61
13. *Коваленко Р. В.* Современные полимерные материалы и технологии 3D-печати // Вестник Казанского технологического университета. 2015. № 1. С. 263–266.
13. Kovalenko R. V. Modern polymer materials and 3D printing technologies. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, no. 1, pp. 263–266. (In Russ.).
14. Rohde S., Cantrell J., Jerez A. et al. Experimental characterization of the shear properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts [Экспериментальная характеристика свойств при сдвиге деталей из ABS-пластика и поликарбоната, напечатанных на 3D-принтере]. *Experimental Mechanics*, 2018, vol. 58, pp. 871–884. doi: 10.1007/s11340-017-0343-6
15. Bakýr A. A., Atik R., Цzerinз S. Mechanical properties of thermoplastic parts produced by fused deposition modeling: a review [Обзор механических свойств деталей из термопластов, полученных методом моделирования]. *Rapid Prototyping Journal*, 2021, vol. 27(3), pp. 537–561.
doi: 10.1108/RPJ-03-2020-0061
16. Isaac J. P., Dondeti S., Tippur H. V. Fracture behavior of additively printed ABS: effects of print architecture and loading rate [Поведение ABS-пластика с аддитивной печатью на разрыв: влияние структуры печати и скорости загрузки]. *International Journal of Solids and Structures*, 2021, vol. 212, pp. 80–95.
doi: 10.1016/j.ijsolstr.2020.11.027
17. McLouth T. D., Severino J. V., Adams P. M. et al. The impact of print orientation and raster pattern on fracture toughness in additively manufactured ABS [Влияние ориентации отпечатка и растрового рисунка на вязкость разрушения ABS-пластика, изготовленного с использованием добавок]. *Additive Manufacturing*, 2017, vol. 18, pp. 103–109.
doi: 10.1016/j.addma.2017.09.003
18. Nazir A., Jeng J.-Y. A high-speed additive manufacturing approach for achieving high printing speed and accuracy [Высокоскоростной подход к аддитивному производству для достижения высокой скорости и точности печати]. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2020, vol. 234(14), pp. 2741–2749.
doi: 10.1177/0954406219861664 ■