

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ EXPERIMENTAL RESEARCHES

DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-1-73-83

УДК 624.011.78/6

EDN: YNLEDV

Научная статья / Research article

Влияние температуры на физико-механические свойства монолитного поликарбоната

К.В. Авдеев¹ , В.В. Бобров^{1,2}  , М.А. Тучин¹ , Е.В. Домарова^{1,2} ,
Н.А. Кудрявцев¹ , П.В. Скакун¹ 

¹ АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений — ЦНИИПромзданий», Москва, Россия

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

✉ vbobrov1985@bk.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 20 октября 2023 г.

Доработана: 23 декабря 2023 г.

Принята к публикации: 11 января 2024 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

Аннотация. Изучение физико-механических свойств поликарбоната при различных температурных условиях с учетом его широкого использования в качестве базового материала монолитных поликарбонатных систем в различных климатических районах позволит обеспечить высокую степень надежности конструкций при эксплуатации в широком диапазоне температур. Проведены серии испытаний монолитного поликарбоната на растяжение в диапазоне температур от -60 до $+80$ °С. Была проведена оценка влияния температуры на следующие характеристики монолитного поликарбоната: относительное удлинение при разрыве, предел текучести при растяжении, прочность при разрыве, деформации монолитного поликарбоната, соответствующие концу упругой стадии работы материала. В результате проведенных экспериментальных исследований выявлена зависимость прочностных свойств монолитного поликарбоната от температуры эксплуатации. Значения относительного удлинения при разрыве при температу-

Авдеев Кирилл Владимирович, заместитель генерального директора — главный инженер, АО «ЦНИИПромзданий», Москва, Россия; ORCID: 0009-0009-8369-3159; E-mail: 6136133@mail.ru

Бобров Владимир Викторович, кандидат технических наук, заведующий сектором отдела обследований зданий и сооружений АО «ЦНИИПромзданий», доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Россия; ORCID: 0000-0002-7796-0072; E-mail: vbobrov1985@bk.ru

Тучин Михаил Александрович, заведующий сектором отдела конструктивных систем, АО «ЦНИИПромзданий», Москва, Россия; ORCID: 0009-0009-7888-7987; E-mail: m.tuchin@cniipz.com

Домарова Екатерина Владимировна, инженер отдела конструктивных систем, АО «ЦНИИПромзданий», старший преподаватель кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); Москва, Россия; ORCID: 0000-0002-1193-201X; E-mail: cathie_p@mail.ru

Кудрявцев Никита Андреевич, инженер отдела конструктивных систем, АО «ЦНИИПромзданий», Москва, Россия; ORCID: 0009-0000-8740-9826; E-mail: n.kudryavtsev@cniipz.com

Скакун Павел Владимирович, главный специалист отдела конструктивных систем, АО «ЦНИИПромзданий», Москва, Россия; ORCID: 0009-0005-6124-1152; E-mail: 89152892984@yandex.ru

© Авдеев К.В., Бобров В.В., Тучин М.А., Домарова Е.В., Кудрявцев Н.А., Скакун П.В., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

рах, превышающих 15 °С, для различных образцов в целом соответствуют значениям, полученным при испытаниях, проведенных при стандартных условиях.

Ключевые слова: монолитный поликарбонат, температура, относительное удлинение, прочность при разрыве, предел текучести при растяжении

Для цитирования

Авдеев К.В., Бобров В.В., Тучин М.А., Домарова Е.В., Кудрявцев Н.А., Скакун П.В. Влияние температуры на физико-механические свойства монолитного поликарбоната // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2024. Т. 20. № 1. С. 73–83. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-1-73-83>

Effect of Temperature on Physical and Mechanical Properties of Monolithic Polycarbonate

Kirill V. Avdeev¹ , Vladimir V. Bobrov^{1,2}  , Mikhail A. Tuchin¹ ,
Ekaterina V. Domarova^{1,2} , Nikita A. Kudryavtsev¹ , Pavel V. Skakun¹ 

¹ JSC “Central Research and Design Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures — Tsniipromzdaniy”, Moscow, Russia

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

✉ vbobrov1985@bk.ru

Article history

Received: October 20, 2023

Revised: December 23, 2023

Accepted: January 11, 2024

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution

Undivided co-authorship.

Abstract. The study of the physical and mechanical properties of polycarbonate under various temperature conditions, taking into account its widespread use as a base material of monolithic polycarbonate systems in various climatic regions, will ensure a high degree of reliability of structures during operation in a wide temperature range. The authors of the article conducted a series of tensile tests of monolithic polycarbonate in the temperature range from –60 to +80 °C. The influence of temperature on the following characteristics of monolithic polycarbonate was evaluated: elongation at break, tensile yield strength, tensile stress at break, strains at the end of the elastic stage of the material. As a result of the conducted experimental studies, the relationship between the strength properties of monolithic polycarbonate and the operating temperature was revealed. The values of elongation at break at temperatures exceeding 15 °C for various samples generally correspond to the values obtained during tests conducted under standard conditions.

Keywords: monolithic polycarbonate, temperature, relative elongation, tensile strength, tensile yield strength.

For citation

Avdeev K.V., Bobrov V.V., Tuchin M.A., Domarova E.V., Kudryavtsev N.A., Skakun P.V. Effect of Temperature on Physical and Mechanical Properties of Monolithic Polycarbonate. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024;20(1):73–83. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-1-73-83>

Kirill V. Avdeev, Deputy General Director – Chief Engineer, JSC “Central Research and Design Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures — Tsniipromzdaniy”, Moscow, Russia; ORCID: 0009-0009-8369-3159; E-mail: 6136133@mail.ru

Vladimir V. Bobrov, Candidate of Technical Sciences, Head of the Sector of the Department of Surveys of Buildings and Structures, JSC “Central Research and Design Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures — Tsniipromzdaniy”, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia; ORCID: 0000-0002-7796-0072; E-mail: vbobrov1985@bk.ru

Mikhail A. Tuchin, Head of the Sector of the Structural Systems Department, JSC “Central Research and Design Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures — Tsniipromzdaniy”, Moscow, Russia; ORCID: 0009-0009-7888-7987; E-mail: m.tuchin@cniipz.com

Ekaterina V. Domarova, Engineer of Structural Systems Department, JSC “Central Research and Design Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures — Tsniipromzdaniy”, Senior Lecturer of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia; ORCID: 0000-0002-1193-201X; E-mail: cathie_p@mail.ru

Nikita A. Kudryavtsev, Engineer of Structural Systems Department, JSC “Central Research and Design Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures — Tsniipromzdaniy”, Moscow, Russia; ORCID: 0009-0000-8740-9826; E-mail: n.kudryavtsev@cniipz.com

Pavel V. Skakun, Chief Specialist of Structural Systems Department, JSC “Central Research and Design Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures — Tsniipromzdaniy”, Moscow, Russia; ORCID: 0009-0005-6124-1152; E-mail: 89152892984@yandex.ru

1. Введение

В настоящее время активно развивается рынок отечественных полимерных и композиционных материалов, в том числе монолитного поликарбоната. Изучение физико-механических свойств поликарбоната с учетом его широкого использования в разных сферах позволит обеспечить высокую степень надежности конструкций при эксплуатации в широком диапазоне температур. Ранее авторы статьи провели серию экспериментов [1] на растяжение и изгиб с целью определения физико-механических свойств поликарбоната в стандартных условиях. Также результаты экспериментальных исследований по определению различных физических, механических, оптических и других свойств монолитного поликарбоната приведены в [2–10]. При этом прочностные и деформационные характеристики этого материала как одного из вида пластмасс зависят от температурного режима эксплуатации элементов конструкций [11; 12]. Сложные молекулярные процессы и структура пластмасс обуславливают специфические особенности деформации полимеров в зависимости от температуры [13]. Поэтому для расширения возможностей использования монолитного поликарбоната в качестве базового материала монолитных поликарбонатных систем в различных климатических условиях важной задачей представляется изучение физико-механических характеристик монолитного поликарбоната при условиях, отличающихся от стандартных условий испытаний, что позволит обеспечить механическую безопасность ограждающих светопрозрачных конструкций. В связи с этим авторами статьи были проведены серии испытаний монолитного поликарбоната на растяжение в диапазоне температур от -60 до $+80$ °С.

2. Экспериментальные исследования

В рамках исследования были испытаны серии образцов трех производителей различных толщин, а именно 4 и 10 мм. Образцы были изготовлены механическим способом на универсальном станке ЧПУ из листового поликарбоната (рис. 1).

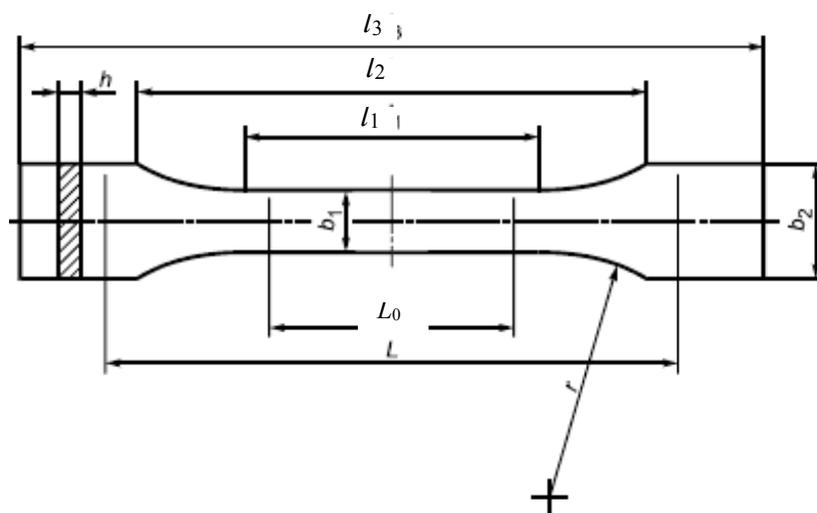


Рис. 1. Размеры образцов для испытания монолитного поликарбоната (Тип 1В по межгосударственному стандарту ГОСТ 11262-2017¹):

l_3 = более 150 мм; l_1 = 60 мм; r = 60° ; l_2 = 108,0 мм;
 b_2 = 20 мм; b_1 = 10 мм; h = 4 мм; L_0 = 50 мм; L = 115 мм

Источни к : выполнено Н.А. Кудрявцевым по ГОСТ 11262-2017¹

Figure 1. Dimensions of monolithic polycarbonate test specimens

(Type 1B according to GOST 11262-2017¹ standard):

l_3 = over 150 mm; l_1 = 60 mm; r = 60° , l_2 = 108,0 mm;
 b_2 = 20 mm; b_1 = 10 mm; h = 4 mm; L_0 = 50 mm; L = 115 mm

Source: made by N.A. Kudryavtsev in according to ГОСТ 11262-2017¹

¹ ГОСТ 11262-2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. Москва: Стандартинформ, 2018. 20 с.

Испытания на растяжение выполнялись в соответствии с требованиями межгосударственных стандартов ГОСТ 34370-2017² и ГОСТ 11262-2017¹, где приведены общие принципы по определению механических свойств при растяжении и требования к типу образцов и методам их подготовки соответственно.

Для оценки влияния температуры окружающей среды на физико-механические свойства монолитного поликарбоната испытания проводились в температурной камере с возможным диапазоном температур от -60 до $+300$ °С (рис. 2). Испытания проводились для следующих значений температур: -60 , -40 , -20 , -10 , -5 , 0 , $+5$, $+15$, $+23$, $+30$, $+45$, $+60$, $+80$ °С. Образцы изготавливались из поликарбоната трех производителей: KARBOGLASS (толщиной 4 мм), NOVATRO (толщиной 4 и 10 мм), DANPALON (толщиной 4 мм). В каждую серию для одного значения температуры входило по три образца каждого производителя.

Влияние температуры оценивалось на следующие характеристики монолитного поликарбоната:

- относительное удлинение при разрыве;
- предел текучести при растяжении;
- прочность при разрыве;
- деформации монолитного поликарбоната, соответствующие концу упругой стадии и началу проявления пластических деформаций (т. *B* на диаграмме «напряжения — деформации» при растяжении — рис. 3).



Рис. 2. Образец после испытания в температурной камере
Источник: фото АО «ЦНИИПромзданий»

Figure 2. Specimen after testing in the temperature chamber
Source: photo by JSC «TsniiPromzdaniy»

3. Результаты

Характер диаграммы «напряжения — деформации» при различных значениях температур идентичен диаграмме при стандартных испытаниях (рис. 3), но значения параметрических точек имеют отличия.

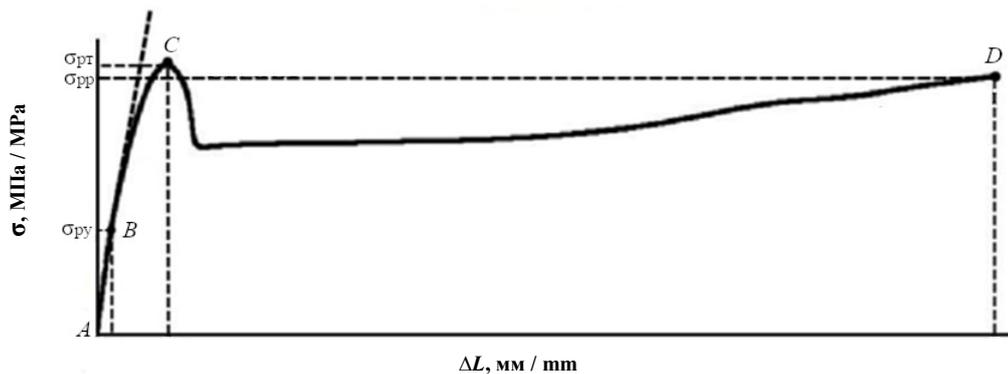


Рис. 3. Диаграмма «напряжения — деформации» при растяжении при стандартных условиях испытания:
 $\sigma_{рт}$ — предел текучести при растяжении; $\sigma_{рр}$ — прочность при разрыве; $\sigma_{ру}$ — предел упругости

Источник: выполнено авторами [1]

Figure 3. Tensile stress-strain diagram under standard test conditions:
 σ_{rt} — tensile yield strength; σ_{pp} — tensile stress at break; σ_{py} — elastic limit

Source: made by the authors [1]

² ГОСТ 34370-2017. Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. Ч. 1. Общие принципы. Москва: Стандартинформ, 2018. 27 с.

Предел текучести при растяжении монолитного поликарбоната изменяется линейно в зависимости от температуры, при этом при температурах ниже 23 °С, соответствующей стандартным условиям испытаний, прочность повышается, а при более высоких температурах происходит снижение прочности при растяжении (рис. 4, табл.). В таблице приведен коэффициент γ_1 , учитывающий изменение прочности монолитного поликарбоната при условиях его эксплуатации, отличных от стандартных условий. Данные экспериментальных исследований монолитного поликарбоната согласуются с поведением различных пластмасс при повышенных и пониженных температурах. Так в [14] к расчетным сопротивлениям пластмасс (например, для стеклопластиков), эксплуатируемых при повышенных температурах, вводятся понижающие коэффициенты условия работы материалов в конструкциях.

**Прочностные свойства поликарбоната при различных температурах /
Strength properties of polycarbonate at various temperatures**

Температура / Temperature, °С	Прочность при растяжении / Tensile strength, $\sigma_{рм}$, МПа / МПа	$\gamma_1 = \frac{\sigma_{рr}}{\sigma_{23рr}}$	Прочность при разрыве / Tensile stress at break, $\sigma_{рр}$, МПа / МПа	$\gamma_2 = \frac{\sigma_{рр}}{\sigma_{23рр}}$
-60 °С	94,6	1,44	78,01	1,28
-40 °С	85,8	1,31	71,74	1,18
-20 °С	79,13	1,21	67,72	1,11
-10 °С	75,82	1,16	64,96	1,07
-5 °С	74,34	1,13	63,5	1,04
0 °С	73,19	1,12	65,1	1,07
5 °С	71,2	1,09	63,49	1,04
15 °С	69,23	1,06	64,84	1,06
23 °С	65,51	1,00	60,89	1,00
30 °С	63,94	0,98	56,32	0,92
45 °С	59,72	0,91	51,47	0,85
60 °С	55,38	0,85	43,41	0,71
80 °С	49,85	0,76	35,94	0,59

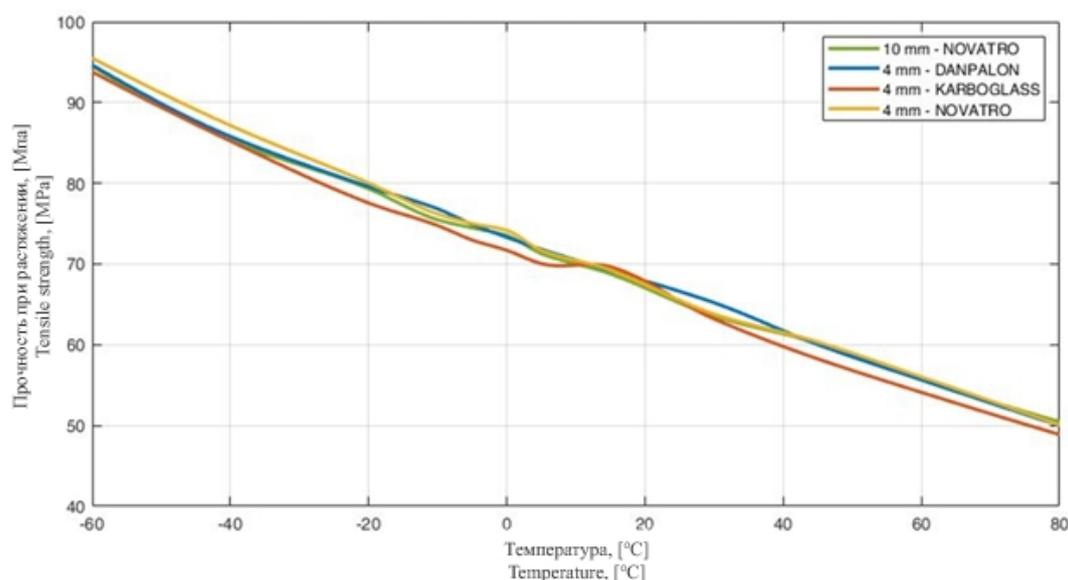


Рис. 4. График зависимости прочности при растяжении от температуры
Источник: выполнено авторами

Figure 4. Relationship between tensile strength and temperature
Source: made by the authors

Аналогичную зависимость от температуры показывает и прочность монолитного поликарбоната при разрыве (рис. 5).

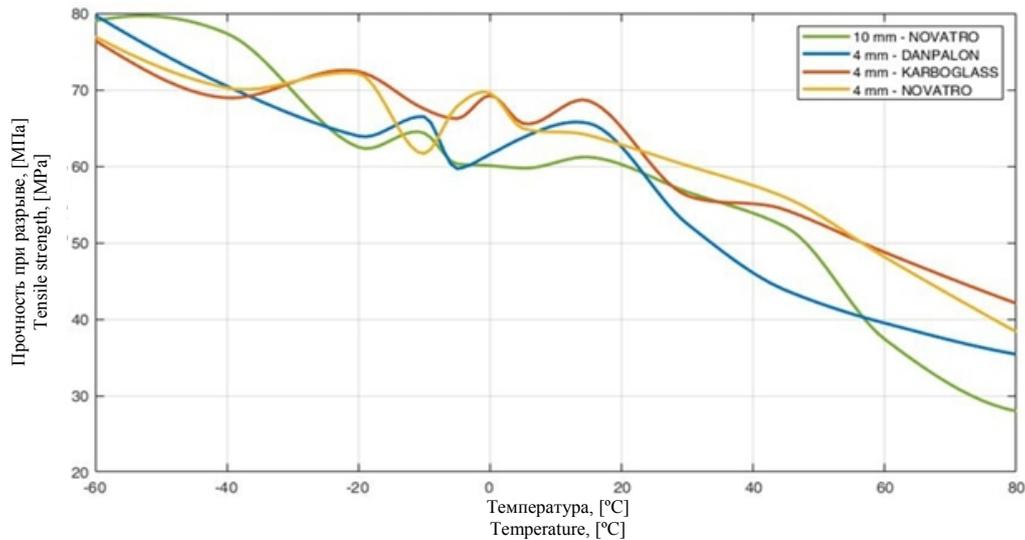


Рис. 5. График зависимости прочности при разрыве от температуры
Источник: выполнено авторами

Figure 5. Relationship between tensile stress at break and temperature
Source: made by the authors

В начале нагружения монолитный поликарбонат работает упруго и подчиняется закону Гука, но при некотором уровне напряжений, соответствующим $t. B$ на рис. 3, происходит отклонение от линейной зависимости между напряжениями и деформациями, начинают проявляться пластические деформации. При отрицательных температурах поликарбонат теряет пластичность и становится более хрупким (рис. 6, *a*).

Для анализа физическо-механических свойств (прочности при растяжении, прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве) поликарбоната при различных температурах были применены два основных математических метода обработки данных: метод скользящего среднего и интерполяция модифицированным методом Акима (Modified Akima или «Makima») [15].

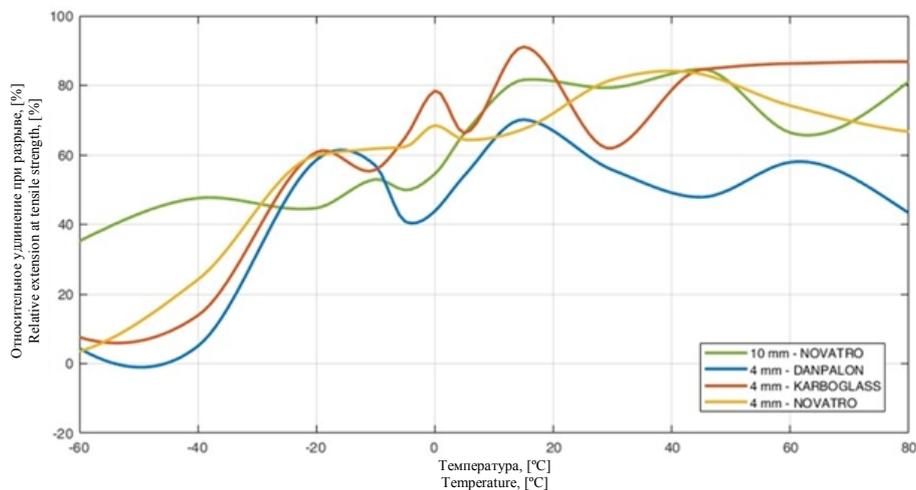
В начале, чтобы уменьшить «шум» и выделить основной тренд в полученных экспериментальных данных, был применен метод арифметического скользящего среднего. Этот метод подразумевает создание нового набора данных, где каждое значение является средним значением определенного количества точек данных за установленный период температуры. Данный период называется размером окна обработки данных. Скользящее среднее численно равно среднему арифметическому значений исходной функции за установленный период и вычисляется по формуле

$$SMA_t = SMA_{t-1} - \frac{p_{t-n}}{n} + \frac{p_t}{n},$$

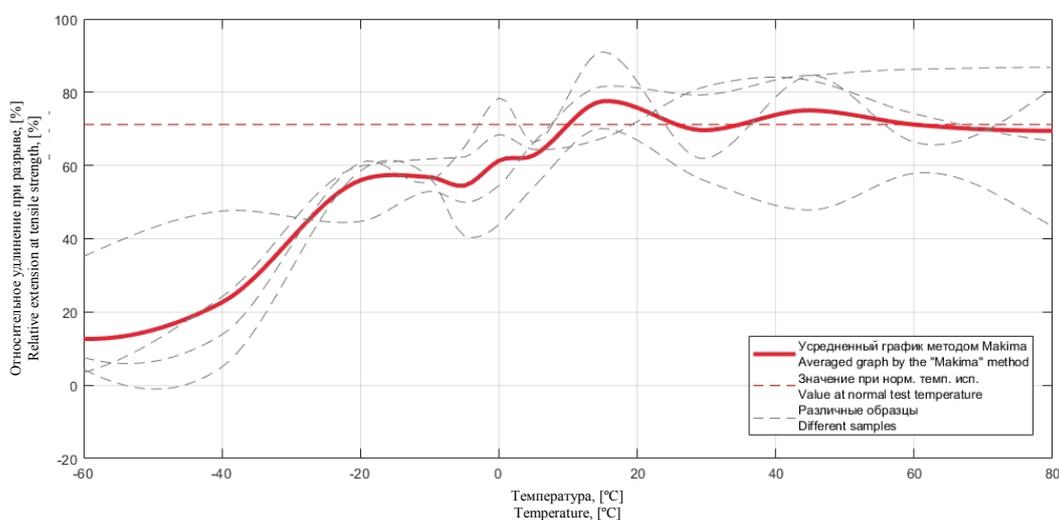
где SMA_t — значение простого скользящего среднего в точке t ; SMA_{t-1} — предыдущее значение простого скользящего среднего; p_{t-n} — значение исходной функции в точке $t-n$ (в случае временного ряда, самое «раннее» значение исходной функции, используемое для вычисления предыдущей скользящей средней); p_t — значение исследуемой функции в точке t (в случае временного ряда, текущее — последнее значение).

Авторами было проведено исследование влияния размера окна обработки данных (диапазонов периодов температуры) на результат сглаживания. По результатам проведенного анализа оптимальным оказался размер окна в 2 °C.

Первый шаг математической обработки позволил сгладить график исходных данных, выявить общий тренд и обеспечить улучшение визуализации графиков.



a



б

Рис. 6. График зависимости относительного удлинения при разрыве от температуры:
a — образцов различных производителей и толщин; *б* — усредненный методом «Makima»
 Источник: выполнено авторами

Figure 6. Relationship between relative elongation at break and temperature:
a — specimens of different manufacturers and thicknesses; *б* — averaged by the "Makima" method
 Source: made by the authors

Вторым шагом было применение интерполяции методом сплайна Акима для более детального представления о поведении поликарбоната при промежуточных значениях температур (относительно температур, при которых проведены испытания). Данный метод является вариацией кубической интерполяции, названной в честь ее создателя Хироши Акима. В методе используются кубические полиномы для создания плавной кривой между исходными точками данных и предотвращения нежелательных колебаний. Преимущество сплайна Акима заключается в том, что он использует только значения из соседних узловых точек (не меняя значения самих узловых точек) при построении коэффициентов интерполяционного полинома между любыми двумя узловыми точками.

В результате обработки экспериментальных данных вышеуказанными методами были получены более плавные и детализированные графики взаимосвязи температуры и физико-механических свойств поликарбоната. Графики деформаций образцов различных производителей представлены на рис. 6, *б*.

Из графика видно, что при температурах, превышающих 15 °С, относительное удлинение при разрыве близко к значению удлинения при стандартных условиях испытания, равного 71,17 % [1].

Кроме того, представляет интерес изучить влияние температуры на начало зоны пластических деформаций (точка *B* на рис. 3). Начиная с т. *B*, график «напряжения — деформации» приобретает криволинейный характер, что является подтверждением пластического деформирования материала. Для поиска точки *B* применялся метод линейной регрессии.

В рамках данного математического анализа были выявлены участки, на которых графики «напряжения (МПа) — деформации (мм)» следуют линейной тенденции, и определены точки отклонения от линейности. С помощью метода линейной регрессии по данным напряжений (МПа) и деформаций (мм) вычислен регрессионный полином первого порядка.

Метод регрессионного анализа состоит в вычислении предсказанных значений напряжений (МПа) на основе уравнения линейной регрессии и последующем вычислении остатков, т.е. разницы между исходными и предсказанными значениями напряжений (МПа) [16].

Была определена мера оценки линейности — «среднеквадратичная ошибка». Данная характеристика показывает, насколько предсказания модели отличаются от наблюдаемых значений. Чем меньше среднеквадратичная ошибка, тем ближе предсказанные значения к наблюдаемым, и тем точнее модель. Рассчи-

тывается среднеквадратичная ошибка по формуле $\sigma = \sqrt{\frac{\sum (y_i - y_p)^2}{n}}$, где: y_i — настоящее значение; y_p — предсказанное значение; n — количество наблюдений.

Для определения линейности данных было установлено пороговое значение, равное 10 % от максимального значений напряжений (МПа). Если разница между реальными значениями и значениями, предсказанными на основе линейной регрессии, не превышает установленного порога, считается, что данные на данном участке соответствуют линейной зависимости.

Данный метод позволил упростить процесс анализа и минимизировать возможные ошибки, связанные с человеческим фактором, так как алгоритмы математической статистики работают автоматически и исключают субъективную интерпретацию, что вполне возможно при геометрическом «ручном» анализе.

Точки, где происходит отклонение от линейного поведения графика, являются началом необратимых пластических деформаций (соответствуют пределу упругости).

В [1] для нормальных условий испытаний напряжения, соответствующие пределу упругости, принимались равными 30 МПа, что было предложено использовать в качестве расчетного сопротивления на растяжение в расчетах по первой группе предельных состояний. Анализ полученных экспериментальных данных (рис. 7) показал, что напряжения, соответствующие окончанию упругой стадии деформирования, при диапазоне температур от –60 до +80 °С, превышают 30 МПа, поэтому введение понижающих коэффициентов при расчетах поликарбоната на растяжение по первой группе предельных состояний не требуется.

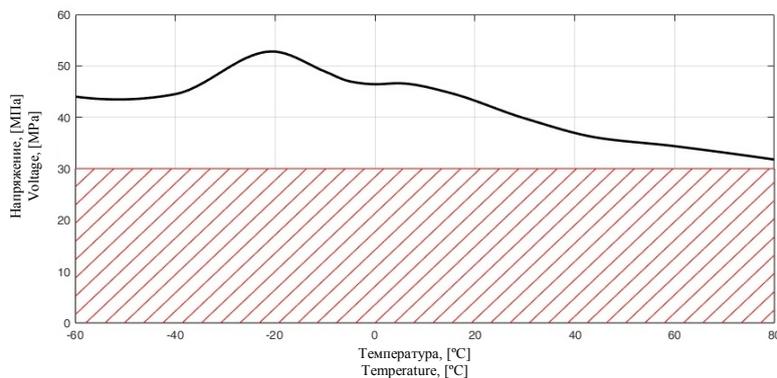


Рис. 7. График зависимости напряжений, соответствующих т. *B*, от температуры

Источник: выполнено авторами

Figure 7. Stresses corresponding to point *B* as a function of temperature

Source: made by the authors

Также представляет интерес оценить изменение деформаций, соответствующих длине горизонтального участка на диаграмме деформирования, в зависимости от температуры испытания.

На рис. 8 представлены диаграммы «напряжения — деформации» для температур испытания -60 , $+30$, $+80$ °С.

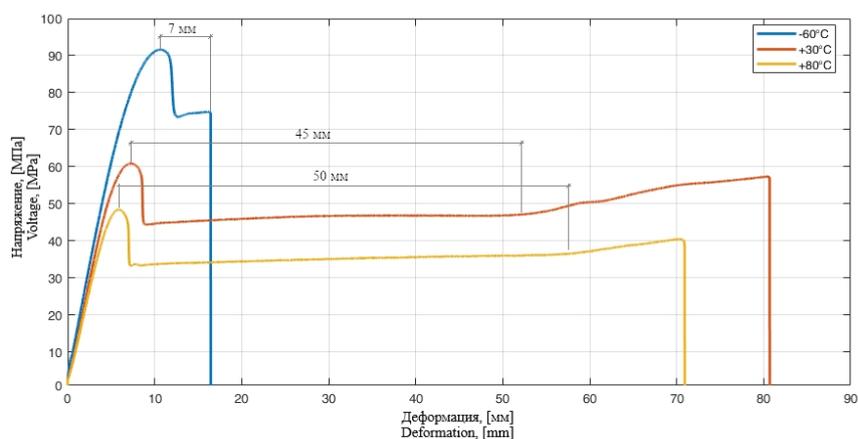


Рис. 8. Диаграммы работы монолитного поликарбоната на растяжение при $t = -60$ °С, $+30$ °С, $+80$ °С

Источник: выполнено авторами

Figure 8. Tensile performance diagrams of monolithic polycarbonate at $t = -60$ °С, $+30$ °С, $+80$ °С

Source: made by the authors

Как видно из графиков (рис. 8 и 9), температура испытания влияет на величину пластических деформаций, соответствующих длине горизонтального участка. Для условий испытаний близких к стандартным ($t = 30$ °С) для образцов толщиной 4 мм деформации, соответствующие длине участка от точки С до конца горизонтального участка, составляют в среднем 45 мм. При температуре $+80$ °С они увеличиваются и составляют 50 мм (рис. 8). При $t = -60$ °С эти деформации уменьшаются и равны 7 мм, что свидетельствует о повышении хрупкости монолитного поликарбоната при отрицательных температурах.

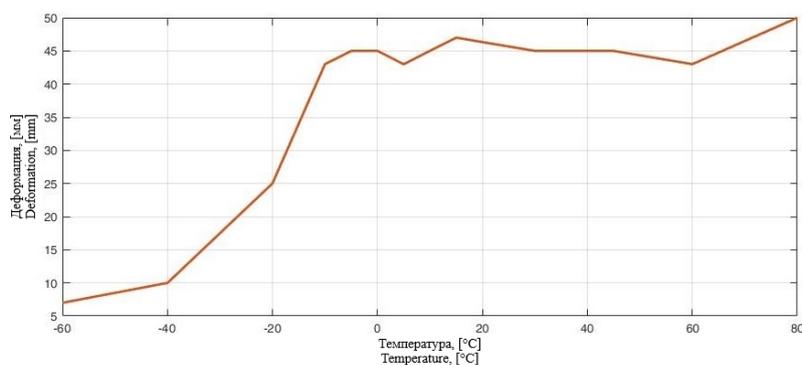


Рис. 9. График зависимости пластических деформаций, соответствующих деформациям от точки С до конца горизонтального участка на диаграмме растяжения, от температуры

Источник: выполнено авторами

Figure 9. Plastic strains corresponding to strains from point C to the end of the horizontal section in the stress-strain diagram as a function of temperature

Source: made by the authors

4. Заключение

1. В результате проведенных экспериментальных исследований выявлена зависимость прочностных свойств монолитного поликарбоната от температуры эксплуатации. При температурах ниже температу-

ры, соответствующей нормальным условиям испытаний, происходит повышение предела текучести при растяжении и прочности при разрыве. При температурах выше 23 °С наблюдается снижение предела текучести при растяжении и прочности при разрыве. Так, при $t = -60$ °С прочность на растяжение увеличивается на 44 %, при $t = 80$ °С прочность на растяжение снижается на 24 % по сравнению со стандартными условиями испытания.

2. При отрицательных температурах относительное удлинение при разрыве меньше заявленного производителями для стандартных условий, ввиду того что поликарбонат теряет пластичность. При этом значение относительного удлинения при разрыве при температурах, превышающих 15 °С, не сильно отличается от стандартных условий испытания ($t = 23$ °С) и находится на уровне примерно 71 %.

3. Напряжения, соответствующие началу пластического деформирования, при диапазоне температур от -60 до $+80$ °С находятся выше значения 30 МПа, предлагаемого в качестве расчетного сопротивления на растяжение при расчете по первой группе предельных состояний без введения коэффициентов условий работы материала.

4. Кроме анализа влияния температуры на прочность монолитного поликарбоната при растяжении представляет интерес для дальнейшего исследования оценка влияния температуры на прочность при сжатии и изгибе, а также изменение ударной вязкости при отрицательных температурах.

Список литературы

1. Авдеев К.В., Тучин М.А., Бобров В.В., Кудрявцев Н.А., Скакуп П.В. Испытания листового монолитного поликарбоната для конструкций покрытий // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 10. С. 56–61. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.10.56-61>
2. Бунто О.В., Жамойдик С.М. Экспериментальное исследование прочностных и деформационных свойств полимерных материалов, рассматриваемых в качестве светопрозрачного заполнения легкосбрасываемых конструкций // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2023. Т. 7. № 1. С. 32–42. <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2023.7-1.32>
3. Бобина Е.А., Данилаев М.П., Клабуков М.А., Куклин В.А. Диагностика разрушения монолитного поликарбоната с использованием пьезоэффекта // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*. 2020. Т. 76. № 2. С. 5–10. EDN: HNZZDK
4. Божанов П.В., Трещев А.А. Определение прочностных критериев при возникновении пластических деформаций в поликарбонате // *Инновации и инвестиции*. 2018. № 12. С. 323–326. EDN: PLDROZ
5. Марков А.В., Дериволков Д.Н., Дуванов Д.С. Исследование напряженного состояния и оценка остаточных напряжений в термомодифицированном листовом поликарбонате // *Пластические массы*. 2019. № 3–4. С. 21–24
6. Бобина Е.А., Гимадеева Л.А., Данилаев М.П. Определение механических напряжений, возникающих в полимерных стеклах в процессе эксплуатации // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 2 (49). С. 31. EDN: YATELZ
7. Zhang S., Wang B., Meng X., Chen Y. Mechanical Properties and Fracture Microstructure of Polycarbonate under High Strain Rate Tension // *Materials*. 2023. Vol. 16. <https://doi.org/10.3390/ma16093386>
8. Mu Q. Experimental data for creep and dynamic mechanical properties of polycarbonate and polycarbonate / acrylonitrile-butadiene-styrene // *Data in Brief*. 2022. Vol. 42. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108264>
9. Gallego S.-T., J., Nieto M. A., Huerta M. Thermal, lighting, and energy performances of buildings constructed with polycarbonate panels. Case study of a classroom in Madrid // *Energy Efficiency*. 2023. Vol. 16. <https://doi.org/10.1007/s12053-023-10120-w>
10. Ahmed A., Bhalla N., Chouhan H., Shukla K., Bhatnagar N. Study of Polycarbonate Based Nano-composites at High Strain Rate Impact // *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 14. P. 507–513. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.05.061>
11. Yang M., Li W., Dong P., Ma Y., He Y., Zhao Z., Che L. Temperature and strain rate sensitivity of yield strength of amorphous polymers: Characterization and modeling // *Polymer*. 2022. Vol. 251. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.124936>
12. Cherepanov A., Savinykh A., Garkushin G., Razorenov S. Spall strength of polycarbonate at a temperature of 20–185°C // *Technical Physics*. 2023. № 68. P. 622–628. <https://doi.org/10.21883/TP.2023.05.56068.10-23>
13. Гасанова Н.А. Влияние температуры на характер деформации пластмасс, работающих в нефтепромысловых оборудовании // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2017. № 5–3. С. 17–20. EDN: YMVENZ
14. Рекомендации по проектированию и расчету конструкций с применением пластмасс // ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М., 1969. 149 с.
15. Mathworks. Help Center. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/makima.html> (дата обращения: 20.10.2023).
16. ArcGIS. Регрессионный анализ. URL: <https://doc.arcgis.com/ru/insights/latest/analyze/regression-analysis.htm> (дата обращения: 20.10.2023).

References

1. Avdeev K.V., Tuchin M.A., Bobrov V.V., Kudryavtsev N.A., Skakun P.V. Testing of monolithic polycarbonate sheet for coating structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2022;(10):56–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.10.56-61>
2. Bunto O.V., Zhamoydik S.M. Experimental investigations of strength and deformation properties of polymeric materials considered as a translucent filling of easy-to-reset structures. *Vestnik Universiteta grazhdanskoi zashchity MChS Belarusi*. 2023;7(1):32–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2023.7-1.32>
3. Bobina E.A., Danilaev M.P., Klabukov M.A., Kuklin V.A. Diagnostics of the destruction of monolithic polycarbonate using the piezoelectric effect. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*, 2020;76(2):5–10. (In Russ.)
4. Bozhanov P.V., Treshchev A.A. Determination of the strength criteria at the onset of plastic deformation in polycarbonate. *Innovacii i investicii*. 2018;(12):323–326. (In Russ.) EDN: PLDROZ
5. Markov A.V., Derivolkov D.I., Duvanov D.S. Stress state investigation and evaluation of residual stresses in thermoformed polycarbonate sheet. *Plasticheskie massy*. 2019;(3–4):21–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-3-4-21-24>
6. Bobina E.A., Gimadeeva L.A., Danilaev M.P. Mechanical stresses measuring in the polymer glasses during their using. *Engineering journal of Don*. 2018;49(2):31. (In Russ.) EDN: YATELZ
7. Zhang S., Wang B., Meng X., Chen Y. Mechanical Properties and Fracture Microstructure of Polycarbonate under High Strain Rate Tension. *Materials*. 2023;16:3386. <https://doi.org/10.3390/ma16093386>
8. Mu Q. Experimental data for creep and dynamic mechanical properties of polycarbonate and polycarbonate / acrylonitrile-butadiene-styrene. *Data in Brief*. 2022;42:108264. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108264>
9. Gallego S.-T., J., Nieto M.A., Huerta M. Thermal, lighting, and energy performances of buildings constructed with polycarbonate panels. Case study of a classroom in Madrid. *Energy Efficiency*. 2023;16. <https://doi.org/10.1007/s12053-023-10120-w>
10. Ahmed A., Bhalla N., Chouhan H., Shukla K., Bhatnagar N. Study of Polycarbonate Based Nano-composites at High Strain Rate Impact. *Procedia Structural Integrity*. 2019;14:507–513. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.05.061>
11. Yang M., Li W., Dong P., Ma Y., He Y., Zhao Z., Chen L. Temperature and strain rate sensitivity of yield strength of amorphous polymers: Characterization and modeling. *Polymer*. 2022;251(4):124936. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.124936>
12. Cherepanov A., Savinykh A., Garkushin G., Razorenov S. Spall strength of polycarbonate at a temperature of 20–185 °C. *Technical Physics*. 2023;68:622–628. <https://doi.org/10.21883/TP.2023.05.56068.10-23>
13. Gasanova N.A. The influence of temperature on the nature of deformation of plastics working in oilfield equipment. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk [Actual problems of humanities and natural sciences]*. 2017;(5–3):17–20. (In Russ.) EDN: YMVENZ
14. *Recommendations for the design and calculation of structures using plastics*. Moscow: TSNIISK named after V.A. Koucherenko Publ.; 1969. (In Russ.)
15. Mathworks. Help Center. Available from: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/makima.html> (accessed: 20.10.2023).
16. ArcGIS. Available from: <https://doc.arcgis.com/ru/insights/latest/analyze/regression-analysis.htm> (accessed: 20.10.2023).