

Научная статья

УДК 691.175

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31410>



Д.А. Пезин¹, Б.С. Ермаков², Д.В. Нечаев² ✉

¹ Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия;

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ nechaev_dv@spbstu.ru

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Аннотация. В ходе настоящей работы была проведена оценка применимости узлов и деталей электрооборудования, изготовленных из термопластичных полимерных материалов, для эксплуатации в условиях Арктики. В результате было установлено, что использование полимерных композиционных материалов на основе полиамидов и полибутилентерефталатов в условиях экстремально низких температур и высокой влажности воздуха может приводить к развитию аварийных ситуаций из-за резкого снижения деформационной способности материалов. Также было показано, что самым перспективным материалом для изготовления узлов и деталей оборудования, предназначенного для работы в условиях Крайнего Севера, является поликарбонат. Однако, несмотря на высокий и стабильный уровень статических механических свойств и ударной вязкости, этот материал не может быть рекомендован для изготовления вентиляторов специального назначения, поскольку использование при выборе материала только прочностных характеристик не обеспечивает гарантии его длительной безопасной эксплуатации.

Ключевые слова: Арктика, механические свойства, поликарбонат, полимер, фрактография.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Разработка методик определения возможностей и условий применения полимеркомпозитных материалов в качестве строительных конструкций, деталей и узлов оборудования нефтедобывающих предприятий в Арктической и Субарктической зонах России» (FEWN-2025-0005).

Для цитирования:

Пезин Д.А., Ермаков Б.С., Нечаев Д.В. Работоспособность термопластичных полимеров в условиях Арктического региона Российской Федерации // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 4. С. 134–145. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31410>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31410>*D.A. Pezin*¹, *B.S. Ermakov*², *D.V. Nechaev*² ✉¹ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia;² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia✉ nechaev_dv@spbstu.ru

PERFORMANCE OF THERMOPLASTIC POLYMERS IN THE CONDITIONS OF THE ARCTIC REGION OF THE RUSSIAN FEDERATION

Abstract. In the course of this work, an assessment of the applicability of components and parts of electrical equipment made from thermoplastic polymeric materials for use in Arctic conditions. As a result, it was established that the use of polyamide- and polybutylene terephthalate-based polymer composite materials under conditions of extremely low temperatures and high humidity can lead to accidents due to a sharp reduction in the materials' deformation capacity. It was also shown that polycarbonate was the most promising material for the manufacture of components and parts of equipment designed for use in the Far North. However, despite its high and stable static mechanical properties and impact strength, this material cannot be recommended for manufacturing special-purpose fans, since relying solely on strength characteristics when selecting a material does not guarantee its long-term safe operation.

Keywords: Arctic, mechanical properties, polycarbonate, polymer, fractography.

Acknowledgements: The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment "Development of methods for determining the possibilities and conditions for the use of polymer composite materials as building structures, parts and equipment units for oil production enterprises in the Arctic and Subarctic zones of Russia" (FEWN-2025-0005).

Citation:

Pezin D.A., Ermakov B.S., Nechaev D.V., Performance of thermoplastic polymers in the conditions of the Arctic Region of the Russian Federation, *Global Energy*, 31 (04) (2025) 134–145, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31410>

Введение. Изменение стратегии освоения и разработки запасов сырья в северных условиях потребовало пересмотреть подход к обеспечению надежности, ремонтпригодности [1], увеличению межремонтного периода обслуживания машин и механизмов [2], а достаточно короткий срок эксплуатации малых месторождений – обеспечить легкое перемещение оборудования с одной площадки на другую с минимальными техническими и финансовыми затратами при условии крайне слабой транспортной инфраструктуры в Арктической зоне Российской Федерации [3]. При этом следует учесть тот факт, что опыт применения в условиях северных широт значительного числа аппаратов и приборов, успешно эксплуатируемых в центральных областях страны показал, что их эксплуатация в Арктическом регионе невозможна или затруднена и требует либо модернизации, либо создания принципиально новых приборов, аппаратов, их несущих и корпусных конструкций [4, 5].

Одним из решений повышения надежности и долговечности техники, эксплуатация которой планируется в условиях северных широт, а также облегчения перемещения оборудования с одной площадки на другую является постепенное замещение подверженных коррозионным повреждениям и хрупким разрушениям из-за недостаточной хладостойкости стальных конструкций на полимерные и полимерно-композитные [6–9].

В отечественной и мировой промышленности уже широко применяются различные типы пластмасс, среди которых достаточный объем принадлежит термопластичным материалам [10, 11]. Хотя такие материалы не используются в силовых и строительных конструкциях, они нашли свое применение в качестве корпусов, зубчатых колес, крыльчаток, лопастей вентиляторов и других узлов и деталей различных машин и механизмов [12–14]. Основным ограничением их использования в условиях Арктического региона являются высокие требования к морозостойкости, то есть к способности материалов сохранять заданные физико-механические и эксплуатационные свойства при температурах ниже температуры стеклования для аморфных полимеров или ниже температуры хрупкости для кристаллизующихся полимеров [15]. При этом рядом исследователей [15, 16] показано, что при проектировании и конструировании деталей и узлов электрооборудования, эксплуатируемого в условиях арктического климата, должна быть учтена и стойкость материала к ударным нагрузкам, возникающим при ветровом воздействии, к водопоглощению, а также к повышенным температурам. Поэтому целью настоящей работы являлась оценка применимости узлов и деталей электрооборудования, изготовленных из термопластичных полимерных материалов (ПМ), для эксплуатации в условиях Арктики.

Материалы и методы исследования

Материалами исследования являлись конструкционные термопластичные ПМ с различным уровнем кристалличности: полибутилентерефталат (ПБТ) марки LUPOX серии 1000 производства LG Chem, поликарбонат (ПК) PC-010, изготовленный по ТУ 2226-173-00203335-2007, и полиамид (ПА) 610 литьевой, изготовленный по ГОСТ 10589-87.

Оценка работоспособности ПМ и изменения, происходящие в них в ходе длительной эксплуатации, были выполнены путем проведения механических испытаний в соответствии с ГОСТ 14359-69, ГОСТ 4647-2015, ГОСТ 16782-92, ГОСТ 11262-80 и ГОСТ 26277-84. Интенсивность водопоглощения материалов была определена в соответствии с ГОСТ 4650-80. Фрактографический анализ изломов и поверхности опытных образцов проводили с предварительным напылением на образцы хрома толщиной порядка 30–100 нм на сканирующем электронном микроскопе TESCAN Mira 3 LMU. Климатические испытания проводились в камере тепла-влаги-холода (КТВХ) СМ –70/100–1000 ТВХ при следующих параметрах модельной среды: влажность 95–98%; температура $70 \pm 0,5$ °С (средняя допустимая температура корпуса при эксплуатации), $90 \pm 0,5$ °С (аварийные перегрев корпуса) и -70 ± 1 °С (низкотемпературное климатическое воздействие). Время нахождения образцов в климатической камере составляло 200, 500, 1000 и 2400 часов.

Результаты

На первом этапе работы были исследованы наиболее уязвимые свойства ПМ – оценка влияния водопоглощения на механические свойства в условиях низких климатических температур. С этой целью одновременно с образцами для измерения водопоглощения в тех же условиях были экспонированы образцы из ПМ для механических испытаний. Результаты оценки водопоглощения приведены в табл. 1.

Определено, что прирост массы образцов для механических испытаний после 48 часов экспонирования оказался несколько меньше, чем у образцов, подготовленных по ГОСТ 4650-80, и составил у ПА – 2,72%, ПБТ – 0,05%, ПК – 0,24%. Однако тенденция увеличения массы образца во время пребывания в жидкости сохраняется, что позволяет качественно оценить роль водопоглощения в изменении свойств ПМ в ходе эксплуатации в условиях высокой влажности окружающей среды.

В табл. 2 приведены результаты сравнительных испытаний ударной вязкости ПМ в диапазоне температур от 20 до -60 °С (-70 °С для ПК) в исходном, кондиционированном, состоянии и после 48-часового экспонирования образцов в дистиллированной воде.

Таблица 1

Водопоглощение опытных образцов ПМ

Table 1

Water absorption of experimental samples of polymeric materials

Материал	Водопоглощение (%) за период (час)			
	12	24	36	48
ПА	1,93	2,91	2,96	3,02
ПБТ	0,04	0,05	0,05	0,06
ПК	0,21	0,24	0,26	0,27

Таблица 2

Средние и минимальные значения ударной вязкости опытных образцов ПМ
в исходном состоянии и после водопоглощения

Table 2

Mean and minimum values of impact strength of experimental samples of polymeric materials
in the initial state and after water absorption

Материал	Состояние материала	Температура испытания	Средняя ударная вязкость $KCV_{\text{сред}}$	Минимальная ударная вязкость $KCV_{\text{мин}}$
		°C	Дж/см ²	
ПА	Исходное	20	16,2	14,1
		-60	14,2	12,3
	После водопоглощения	20	14,6	11,6
		-60	3,2	2,2
ПБТ	Исходное	20	6,9	6,3
		-60	1,3	0,4
	После водопоглощения	20	6,8	6,3
		-60	1,2	0,1
ПК	Исходное	20	36,6	33,4
		-70	32,0	29,1
	После водопоглощения	20	35,6	31,3
		-70	34,6	30,4

Как следует из представленных данных, низкотемпературная ударная вязкость ПБТ даже в исходном состоянии крайне мала, что может приводить к хрупким разрушениям конструкций, эксплуатируемых в условиях северных регионов. Анализ изломов образцов ПБТ показал, что при понижении температуры испытания от 20 до -60 °C изменяется механизм разрушения материала – при комнатной температуре основным механизмом разрушения является ямочный отрыв. С понижением температуры доля вязкой составляющей снижается практически до нуля, а основным становится механизм, который можно сравнить с механизмом скола в металлах, когда происходит расщепление кристаллической части полимера по определенным кристаллографическим плоскостям [17].

Ударная вязкость ПА в кондиционированном состоянии сохраняется на достаточно высоком и, главное, стабильном уровне во всем диапазоне исследованных температур, однако образцы



Рис. 1. Округлые поры – следы водонасыщенных кластеров в поверхности разрушения образца ПА после испытаний при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$: а) при увеличении $\times 120$, б) при увеличении $\times 600$

Fig. 1. Rounded pores – traces of water-saturated clusters in the fracture surface of a polyamide sample after testing at $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$: a) $\times 120$ magnification, b) $\times 600$ magnification

после насыщения водой в течение 48 часов при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ разрушаются хрупко, что объясняется высоким уровнем водопоглощения материала, образованием в его структуре водонасыщенных кластеров, образующих при замерзании водонасыщенные скопления, следы которых хорошо видно на поверхностях изломов испытанных образцов (рис. 1).

Так как электрооборудование, установленное и эксплуатируемое на кустовых площадках месторождений нефти и газа, карьерах добычи твердых полезных ископаемых, в ходе эксплуатации подвергается как низким климатическим температурам, так и высокотемпературным нагревам, когда нагрев обмоток двигателя может составлять от $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (класс А) до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (класс F), был проведен второй этап исследования влияния длительных выдержек образцов ПК в климатической камере. Для экспонирования в климатической камере были подготовлены образцы в исходном, кондиционированном, состоянии и после пребывания в воде в течение 48 часов. После старения и захлаживания образцы были испытаны на ударный изгиб и одноосное статическое растяжение. Уровень водопоглощения кондиционированных образцов ПК после старения при $70\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0,14\%$, после захлаживания – менее $0,08\%$. Также были проведены испытания ударной вязкости и прочности при растяжении образцов ПК после 48-часового пребывания в воде. Учитывая высокую склонность ПА к водопоглощению и резкому охрупчиванию материала при низких климатических температурах, решили отказаться от его длительных испытаний в климатической камере, а испытания образцов ПБТ были проведены по той причине, что этот материал максимально широко используется в измерительном и контрольном оборудовании зарубежных фирм, поставляемом, в частности, на нефте- и газодобывающие предприятия страны. Результаты испытаний показаны в табл. 3.

Также в табл. 3 кроме величин механических свойств приведены коэффициенты Y_1 и Y_2 . Использование этих коэффициентов при проектировании и прочностных расчетах изделий и конструкций из ПМ было рекомендовано ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Эти коэффициенты учитывают условия работы ПМ в изделиях и рассчитываются как отношение фактического значения прочности материала к его прочности при $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹. Коэффициент Y_1 отражает изменение прочности ПК под действием температурно-влажностных условий испытаний при растяжении; коэффициент Y_2 – при разрыве.

Анализом результатов испытаний образцов ПБТ после длительных температурных выдержек (табл. 3) определено, что ударная вязкость материала постепенно снижается, приближаясь к нулевым значениям. Именно охрупчивание ПБТ при низких температурах является причиной повышенной аварийности вентиляторов, воздуходувок, корпусов измерительной аппаратуры, эксплуатируемых в условиях экстремально низких температур.

¹ Центр. науч.-исслед. ин-т строит. конструкций им. В. А. Кучеренко Госстроя СССР. Рекомендации по проектированию и расчету конструкций с применением пластмасс. М., 1969. 149 с.

Таблица 3

Средние и минимальные значения ударной вязкости образцов после старения

Table 3

Mean and minimum values of impact toughness of samples after ageing

Состояние материала	T, °C	KCV, кДж/м ²	Прочность при растяжении s _{рм} , МПа	Y ₁	Прочность при разрыве s _{рр} , МПа	Y ₂	ε _{рр} , %
ПК							
Исходное состояние	20	37,7	65,3	1,0	60,5	1,0	89
	-70	31,2	98,1	1,50	82,0	1,34	44
Старение 70 °C, 500 ч	20	36,6	65,1	1,0	60,0	0,98	86
	-70	30,4	98,0	1,50	80,8	1,32	44
Старение 70 °C, 1000 ч	20	36,2	64,6	1,0	59,3	0,97	83
	-70	28,2	96,8	1,48	79,8	1,31	42
Старение 70 °C, 1000 ч (0,27% воды)	20	30,4	59,9	0,92	57,6	0,95	77
	-70	27,2	96,1	1,47	74,5	1,23	39
Старение 90 °C, 1000 ч (0,27% воды)	20	28,8	54,8	0,84	47,0	0,78	74
	-70	26,9	89,7	1,37	70,2	1,16	36
Захлаживание -70 °C, 500 ч	20	31,0	64,0	0,98	59,8	0,98	82
	-70	28,4	90,2	1,38	72,1	1,18	40
Захлаживание -70 °C, 1000 ч	20	30,2	62,7	0,96	57,8	0,95	77
	-70	28,2	88,3	1,35	70,7	1,16	34
Захлаживание -70 °C, 2400 ч	20	29,2	62,0	0,96	56,9	0,93	71
	-70	27,7	87,9	1,34	69,7	1,15	31
Захлаживание -70 °C, 2400 ч (0,27% воды)	20	26,7	60,4	0,92	55,8	0,92	70
	-70	25,9	84,9	1,30	65,9	1,09	29
ПБТ							
Исходное состояние	20	3,4	48		48	1,0	53
	-60	1,1	—		59	1,23	0
Старение 70 °C, 1000 ч	20	3,4	48		48	1,0	51
	-60	0,7	—		54	1,13	0
Захлаживание -70 °C, 1000 ч	20	6,2	46		47	0,99	46
	-60	0,2	—		49	1,02	0

Результаты проведенных испытаний ПМ хорошо согласуются с данными других авторов [18, 19] и позволяют утверждать, что деградация свойств ПК под действием климатических факторов и условий эксплуатации весьма невелика – снижение коэффициентов Y_1 и Y_2 в условиях штатной эксплуатации оборудования составляет не более 8%.

Однако наряду с весьма позитивными результатами механических свойств ПК следует особое внимание обратить на изломы – поверхности разрушения испытанных образцов. При визуально-измерительном контроле разрушенных образцов ПК в исходном состоянии и после длительных выдержек в климатической камере было определено, что в изломах всех ударных

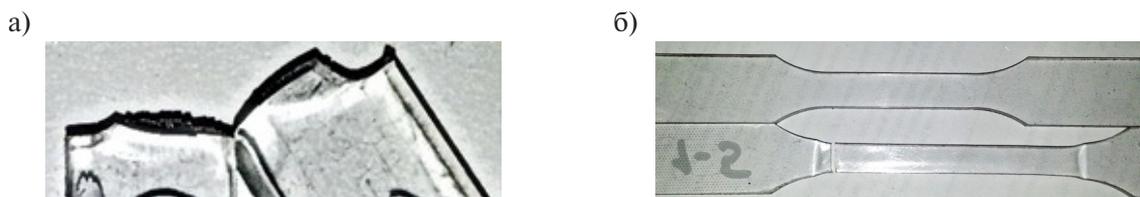


Рис. 2. Разрушение ударного образца (старение при $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ на протяжении 1000 часов):
 а) деформация и боковые утяжки в зоне излома; б) равномерное удлинение рабочей части образца
 (старение при $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ на протяжении 1000 часов) при статическом растяжении

Fig. 2. Fracture of an impact specimen (ageing at $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 1000 hours):
 a) deformation and lateral contractions in the fracture zone; b) uniform elongation
 of the working part of the specimen (ageing at $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 1000 hours) under static tension

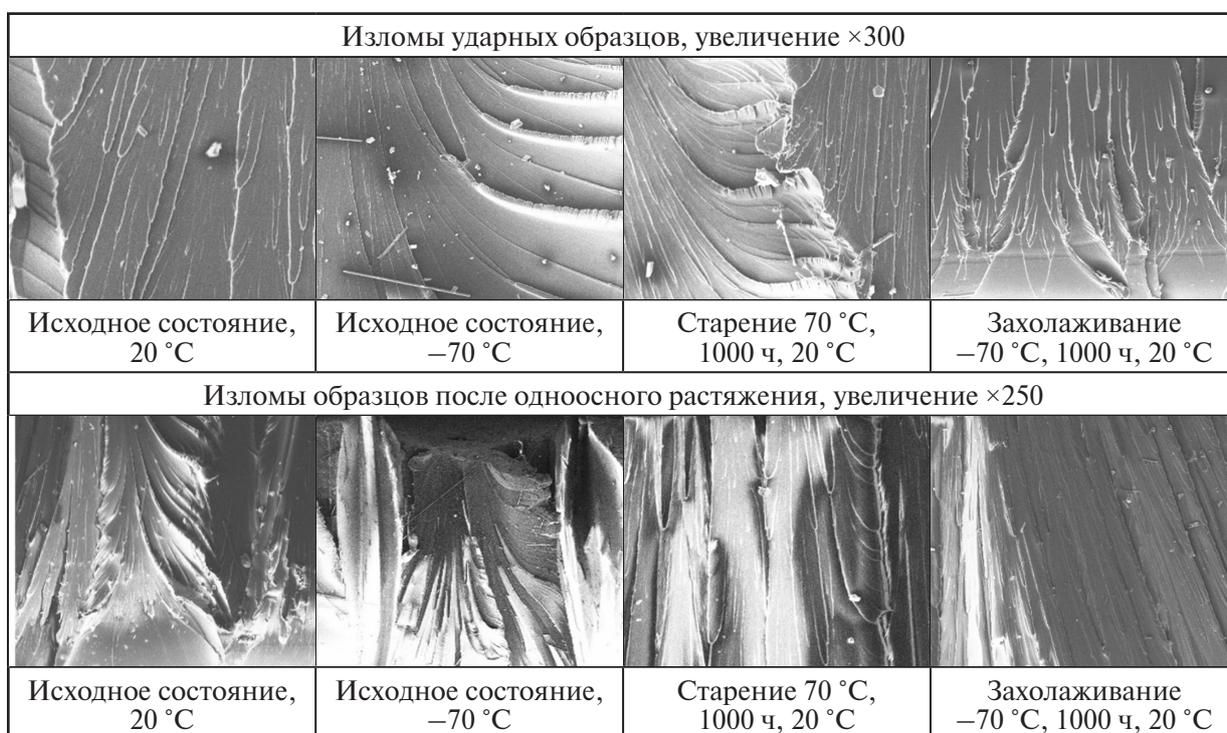


Рис. 3. Поверхности разрушения образцов поликарбоната после испытаний при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 3. Fracture surfaces of polycarbonate samples after testing at $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$

образцов преобладает вязкий механизм разрушения с большими боковыми утяжками, а на рабочих частях образцов на одноосное растяжение присутствуют следы значительной равномерной утяжки, причем толщина рабочей части образца снизилась почти на 30% за счет перераспределения материала в ходе растяжения (рис. 2).

В то же время фрактографическим анализом поверхности изломов ударных образцов и образцов на статическое растяжение ПК было установлено, что вне зависимости от их состояния (рис. 3) зарождение, развитие и движение магистральной трещины происходит по механизму хрупкого разрушения, а все признаки вязкого разрушения связаны только с общим деформированием образца.

Обсуждение

По результатам проведенных испытаний было показано, что в условиях низких климатических температур применение ПБТ и ПА может привести к хрупким разрушениям, и их использование в условиях открытого воздуха Арктического региона может носить весьма ограниченный характер. В то же время результатами испытаний ПК было подтверждено, что этот материал сохраняет высокую ударную вязкость во всем исследованном диапазоне температур как в кондиционированном состоянии, так и после длительного пребывания в воде.

На основании полученных результатов при оценке влияния старения при 70 °С и захлаживания при –70 °С определено, что деградация свойств ПМ в условиях повышенной влажности постепенно ослабевает, а сам материал сохраняет высокую стабильность статических и динамических свойств после длительных температурных воздействий. Также показано, что самым перспективным материалом для изготовления узлов и деталей оборудования, предназначенного для работы в условиях Крайнего Севера, является ПК.

В результате фрактографического анализа определено, что механизм разрушения опытных образцов при ударных нагрузках состоит из двух этапов, где на первом этапе (до образования магистральной трещины) наблюдается равномерное вязкое течение материала, а на втором (с момента образования трещины) разрушение протекает хрупко. То есть наряду с вязкопластическим течением полимера отмечается его практически нулевая трещиностойкость. Таким образом, разрушение ПК носит двоякий характер – до наступления момента возникновения хрупкой магистральной трещины происходит первичная, вязкая, стадия, сопровождающаяся локальными утяжками и утонениями в зоне, а после возникновения трещины – хрупкое разрушение. Этот эффект необходимо учитывать при конструировании деталей и оборудования для регионов холодного и особо холодного климата, в частности электровентиляторов, так как в случае возникновения механических повреждений – царапин, рисков, следов механических ударов и т.п. – может наступить катастрофически быстрое разрушение аппарата.

Заключение

На основании проведенных исследований представляется возможным сделать следующие выводы:

1. Установлено, что использование наиболее распространенных в условиях средних широт полимерных композиционных материалов на основе ПА и ПБТ в условиях экстремально низких температур и высокой влажности воздуха может приводить к развитию аварийных ситуаций из-за резкого снижения деформационной способности материалов.

2. Определено, что самым перспективным материалом для изготовления узлов и деталей оборудования, предназначенного для работы в условиях Крайнего Севера, является ПК. Однако разрушение ПК имеет две стадии развития: первая связана с общим деформированием образца и протекает со значительными пластическими формоизменениями – утяжками ударных образцов и значительным равномерным удлинением рабочей части образцов на статическое растяжение. Такой механизм действует до момента зарождения магистральной трещины, которая развивается по хрупкому механизму разрушения. Поэтому, несмотря на высокий и стабильный уровень статических механических свойств и ударной вязкости, этот материал не рекомендуется для изготовления вентиляторов специального назначения, поскольку использование при выборе материала только прочностных характеристик не обеспечивает гарантии его длительной безопасной эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Толмачев А.А., Иванов В.А., Пономарева Т.Г.** К вопросу о применении труб термопластовых армированных для сооружения нефтегазопроводов в Арктике // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2020. № 4. С. 88–99. DOI: 10.31660/0445-0108-2020-4-88-99
- [2] **Седуш В.Я., Сидоров В.А., Сушко А.Е.** История технического обслуживания и ремонта в России // Главный механик. 2016. Т. 162, № 12. С. 39–54.
- [3] **Кожевников С.А., Патракова С.С.** Транспортная связность северных регионов России: проблемы и инструменты обеспечения // Проблемы развития территории. 2024. Т. 28, № 3. С. 50–66. DOI: 10.15838/ptd.2024.3.131.4
- [4] **Горбунов В.П.** Решение проблем адаптации и эксплуатации систем жизнеобеспечения воздушных судов западного производства в условиях экстремально низких температур Крайнего Севера, Сибири и Арктики // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 218. С. 50–54.
- [5] **Ермаков Б.С., Швецов О.В.** Эксплуатационные свойства полимерных композиционных материалов в условиях Арктического и Субарктического регионов РФ // Технологии обустройства нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений. 2024. С. 224–230.
- [6] **Погребная И.А., Михайлова С.В., Полищук С.Т., Бабюк Г.Ф.** О применении альтернативных материалов для трубопроводов на месторождениях Крайнего Севера // Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации). 2016. Т. 3. С. 73–75.
- [7] **Qureshi J.** A review of fibre reinforced polymer structures, *Fibers*, 10 (3) (2022) 27. DOI: 10.3390/fib10030027
- [8] **Less T., Demir A., Sezen H.** Structural performance and corrosion resistance of fiber reinforced polymer wrapped steel reinforcing bars, *Construction and Building Materials*, 366 (2023) 130176. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130176
- [9] **Sajan S., Selvaraj D.P.** A review on polymer matrix composite materials and their applications, *Materials Today: Proceedings*, 47 (15) (2021) 5493–5498. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.08.034
- [10] **Кацевман М.Л.** Объединенная компания «Полипластик-Технопол» – лидер российского рынка конструкционных материалов на основе термопластов // Пластические массы. 2006. № 10. С. 45–47.
- [11] **Qiao Y., Fring L.D., Pallaka M.R., Simmons K.L.** A review of the fabrication methods and mechanical behavior of continuous thermoplastic polymer fiber–thermoplastic polymer matrix composites, *Polymer Composites*, 44 (2) (2023) 694–733. DOI: 10.1002/pc.27139
- [12] **Адхамов А., Нумонов А.** Перспективы применения ПКМ в автомобильной промышленности // ТЕСНика. 2021. Т. 5, № 1. С. 8–13. DOI: 10.24411/2181-0753/2021-100002
- [13] **Лысов Н.А., Янченко А.В.** Анализ использования полимерных материалов в электроприводе воздушного компрессора роботизированного комплекса // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению. 2021. С. 120–123.
- [14] **Макаров В.Ф., Песин М.В., Волковский А.А.** Инновационные технологии повышения производительности и качества механической обработки полимерных композиционных материалов // Научно-технические технологии в машиностроении. 2023. № 9. С. 27–38. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-27-38
- [15] **Корнев В.А., Рыбаков Ю.Н.** Морозостойкость полимерных, конструкционных материалов и покрытий для применения в технических средствах нефтепродуктообеспечения // Аллея науки. 2018. Т. 23, № 7. С. 78–87.
- [16] **Ермаков Б.С., Швецов О.В., Ермаков С.Б.** Особенности применения полимерных композиционных материалов при обустройстве нефтегазовых месторождений Арктического пояса // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 1. С. 112–121. DOI: 10.18721/JEST.31108
- [17] **Олейник Э.Ф.** Пластичность частично кристаллических гибкоцепных полимеров на микро- и мезоуровнях // Высокомолекулярные соединения. Серия С. 2003. Т. 45, № 12. С. 2137–2264.

[18] **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. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-1-73-83

[19] **Гасанова Н.А.** Влияние температуры на характер деформации пластмасс, работающих в нефтепромысловых оборудованьях // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. № 5–3. С. 17–20.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПЕЗИН Дмитрий Александрович – *руководитель проектов, Тюменский индустриальный университет, канд. социол. наук.*

E-mail: pezinda@tyuiu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1223-2453>

ЕРМАКОВ Борис Сергеевич – *главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.*

E-mail: ermakov55@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0932-2408>

НЕЧАЕВ Даниил Валерьевич – *инженер-исследователь, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.*

E-mail: nechaev_dv@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5997-143X>

REFERENCES

[1] **A.A. Tolmachev, V.A. Ivanov, T.G. Ponomareva**, To the issue of application of thermoplastic reinforced pipes for the construction of oil and gas pipelines in the Arctic, *Oil and Gas Studies*, 4 (2020) 88–99. DOI: 10.31660/0445-0108-2020-4-88-99

[2] **V.Y. Sedush, V.A. Sidorov, A.E. Sushko**, History of maintenance and repair in Russia, *Glavnyi mekhanik [Chief mechanic]*, 12 (162) (2016) 39–54.

[3] **S.A. Kozhevnikov, S.S. Patrakova**, Transportation connectivity of Russia's northern regions: Problems and tools for ensuring it, *Problems of Territory's Development*, 28 (3) (2024) 50–66. DOI: 10.15838/ptd.2024.3.131.4

[4] **V.P. Gorbunov**, Solutions for problems of life-support systems adaptation of foreign made aircraft under the conditions extremely low temperatures of Arctic, Siberia and Far North, *Civil Aviation High Technologies*, 218 (2015) 50–54.

[5] **B.S. Ermakov, O.V. Shvetsov**, Ekspluatatsionnye svoistva polimernykh kompozitsionnykh materialov v usloviakh arkticheskogo i Subarkticheskogo regionov RF [Performance properties of polymer composite materials in the Arctic and Subarctic regions of the Russian Federation], *Tekhnologii obustroistva nefiannykh, gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdenii [Technologies for the development of oil, gas and gas condensate fields]*, (2024) 224–230.

[6] **I.A. Pogrebnaia, S.V. Mikhailova, S.T. Polishchuk, G.F. Babiuk**, O primenenii al'ternativnykh materialov dlia truboprovodov na mestorozhdeniakh Krainego Severa [On the use of alternative materials for pipelines in the Far North], *Geologiya i neftegazonosnost' Zapadno-Sibirskogo megabasseina (opyt, innovatsii) [Geology and oil and gas potential of the West Siberian megabasin (experience, innovation)]*, 3 (2016) 73–75.

- [7] **J. Qureshi**, A review of fibre reinforced polymer structures, *Fibers*, 10 (3) (2022) 27. DOI: 10.3390/fib10030027
- [8] **T. Less, A. Demir, H. Sezen**, Structural performance and corrosion resistance of fiber reinforced polymer wrapped steel reinforcing bars, *Construction and Building Materials*, 366 (2023) 130176. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130176
- [9] **S. Sajan, D.P. Selvaraj**, A review on polymer matrix composite materials and their applications, *Materials Today: Proceedings*, 47 (15) (2021) 5493–5498. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.08.034
- [10] **M.L. Katsevman**, Ob"edinennaia kompaniia "Poliplastik-Tekhnopol" – lider rossiiskogo rynka konstruksionnykh materialov na osnove termoplastov [The united company "Polyplastic-Technopol" is the leader in the Russian market of construction materials based on thermoplastics], *Plasticheskie massy [Plastics]*, 10 (2006) 45–47.
- [11] **Y. Qiao, L.D. Fring, M.R. Pallaka, K.L. Simmons**, A review of the fabrication methods and mechanical behavior of continuous thermoplastic polymer fiber–thermoplastic polymer matrix composites, *Polymer Composites*, 44 (2) (2023) 694–733. DOI: 10.1002/pc.27139
- [12] **A. Adkhamov, A. Numonov**, Prospects for application of PCM in the automotive industry, *Technika*, 5 (1) (2021) 8–13. DOI: 10.24411/2181-0753/2021-100002
- [13] **N.A. Lysov, A.V. Yanchenko**, Analysis of the use of polymer materials in the electric drive of an air compressor of a robotic complex, *Proizvodstvennye tekhnologii budushchego: ot sozdaniia k vnedreniiu [Manufacturing Technologies of the Future: From Creation to Implementation]*, (2021) 120–123.
- [14] **V.F. Makarov, M.V. Pesin, A.A. Volkovsky**, Innovative technologies for improving the efficiency and machining operating quality for polymer composite materials, *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 9 (2023) 27–38. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-27-38
- [15] **V.A. Kornev, Iu.N. Rybakov**, Frost resistance of polymer, structural materials and coatings for use in technical goods of hardware petroleum products, *Alleia nauki [Alley of Science]*, 7 (23) (2018) 78–87.
- [16] **B.S. Ermakov, O.V. Shvetsov, S.B. Ermakov**, Features of using polymer composite materials in the development of oil and gas fields in the Arctic belt, *Global Energy*, 31 (01) (2025) 112–121, DOI: 10.18721/JEST.31108
- [17] **E.F. Oleinik**, Plasticity of semicrystalline flexible-chain polymers at the microscopic and mesoscopic levels, *Vysokomolekuliarnye soedineniia [High-molecular compounds]*, Series C, 12 (45) (2003) 2137–2264.
- [18] **K.V. Avdeev, V.V. Bobrov, M.A. Tuchin, E.V. Domarova, N.A. Kudryavtsev, P.V. Skakun**, Effect of temperature on physical and mechanical properties of monolithic polycarbonate, *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 1 (20) (2024) 73–83. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-1-73-83
- [19] **N.A. Gasanova**, Influence of the temperature on the character of the deformation of plastics working in oil-field equipment, *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk [Current issues in the humanities and natural sciences]*, 5–3 (2017) 17–20.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Dmitry A. PEZIN – *Industrial University of Tyumen.*

E-mail: pezinda@tyuiu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1223-2453>

Boris S. ERMAKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: ermakov55@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0932-2408>

Daniil V. NECHAEV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: nechaev_dv@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5997-143X>

Поступила: 05.11.2025; Одобрена: 26.11.2025; Принята: 28.11.2025.

Submitted: 05.11.2025; Approved: 26.11.2025; Accepted: 28.11.2025.