

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 62-254:629.11.01(047.31)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-24-31>

Поступила в редакцию 23.06.2022

Received 23.06.2022

С. Н. Янкевич, И. Н. Хроль, Н. А. Калиновский*Приборостроительный завод «Оптрон», Минск, Республика Беларусь***ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРСОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА**

Аннотация. Изучены свойства материалов для безвоздушного колесного движителя транспортных средств, в том числе электрических. Выполнено экспериментальное обоснование выбора типа полимерных матриц и составов армирующих наполнителей для изготовления безвоздушного колесного движителя электротранспортных средств. Для проведения испытаний базовой эпоксидной матрицы часть образцов без добавления армирующих волокон отверждалась при комнатной температуре (L-285H), а остальные (L-285G) – при нагреве до 60 °С. В целях улучшения прочностных характеристик эпоксидной матрицы L-285G проводили армирование стеклоровингом EC16 1600T-16(400). Матрицей для выполнения образцов на базе литьевых полиуретанов был выбран Smooth-Cast 300 Series. Из базового полиуретана изготовлены образцы при различных условиях: при атмосферном отвержении (SC), под вакуумом –81,1 кПа (SC-0.8) и при отверждении с наложением вибрации (SCV). Проведены сравнительные испытания, которые показали отличия механических свойств базовых матриц на базе эпоксидных смол и литьевых полиуретанов, в частности относительное удлинение образцов из литьевого полиуретана более чем в 2 раза. Установлено, что в качестве демпфирующих элементов наиболее рационально применение литьевого полиуретана, а материала изготовления спиц-демпферов – композита SCV-S-20. Изготовление изделий из полученного композита целесообразно проводить при наложении на форму вибраций и с предварительным вакуумированием при вакууме 81,1 кПа компонентов полиуретановой матрицы, что позволяет снизить количество внутренних дефектов в виде раковин. Вакуумирование изделия при полимеризации не дает значимого эффекта ввиду наличия в базовой матрице комплекта специализированных деаэрационных присадок, поэтому предложено проводить его при постоянном контроле, так как превышение вакуума в пределах от 81,1 до 91,2 кПа влечет разложение отдельных компонентов матрицы с образованием пены.

Ключевые слова: электрическое транспортное средство, безвоздушное колесо с внутренним демпфированием, композиционные материалы, полиуретан, армирующие наполнители

Для цитирования: Янкевич, С. Н. Оценка прочностных характеристик полимерных материалов для изготовления элементов персонального электротранспорта / С. Н. Янкевич, И. Н. Хроль, Н. А. Калиновский // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2023. – Т. 68, № 1. – С. 24–31. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-24-31>

Stsiapan N. Yankevich, Igor N. Khrol, Nikita A. Kalinovskij*JSC “Instrument-Making Plant Optron”, Minsk, Republic of Belarus***EVALUATION OF THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF POLYMER MATERIALS
FOR THE MANUFACTURE OF PERSONAL ELECTRIC VEHICLE ELEMENTS**

Abstract. The properties of materials for airless wheel propulsion of vehicles, including electric ones, have been studied. The experimental substantiation of the choice of the type of polymer matrices and compositions of reinforcing fillers for the manufacture of an airless wheel mover of electric vehicles has been carried out. To test the basic epoxy matrix, part of the samples without the addition of reinforcing fibers was cured at room temperature (L-285H), and the rest (L-285G) – when heated to 60 °C. In order to improve the strength characteristics of the epoxy matrix L-285G, glass reinforcement was carried out with EC16 1600T-16(400) glass reinforcement. The Smooth-Cast 300 Series was chosen as the matrix for performing samples based on injection-molded polyurethanes. Samples are made of base polyurethane under various conditions: at atmospheric rejection (SC), under vacuum 0.8 kPa (SC-0.8) and during vibration-induced curing (SCV). Comparative tests were carried out, which showed differences in the mechanical properties of the base matrices based on epoxy resins and injection-molded polyurethanes, in particular, the relative elongation of samples from injection-molded polyurethane by more than 2 times. It is established that the most rational use of injection-molded polyurethane is application as damping elements, and the material for manufacturing spokes dampers is composite SCV-S-20. It is advisable to manufacture products from the resulting composite when vibrations are applied to the mold and with preliminary vacuuming at a vacuum of 0.8 kPa of the components of the polyurethane matrix, which reduces the number of internal defects in the form of shells. Since vacuuming of the product during polymerization does not give a significant effect due to the presence of a set of specialized deaeration additives in the base matrix, it is proposed to carry it out under constant control, since exceeding the vacuum in the range from 0.8 to 0.9 kPa entails decomposition of individual matrix components with foam formation.

Keywords: electric vehicle, airless wheel with internal damping, composite materials, polyurethane, reinforcing fillers

For citation: Yankevich S. N., Khrol I. N., Kalinovskij N. A. Evaluation of the strength characteristics of polymer materials for the manufacture of personal electric vehicle elements. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 24–31 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-24-31>

Введение. Одним из популярных в настоящее время видов индивидуального средства передвижения является электросамокат. Его принцип действия заключается в том, что аккумуляторная батарея приводит в действие электродвигатель, параметры работы которого зависят от заводских настроек. Чем мощнее двигатель, тем больше грузоподъемность и скорость самоката. В целом же принято условное деление: самокаты с мощностью до 250 Вт подходят для людей массой до 80 кг, при большей массе следует использовать самокат с мощностью выше 250 Вт.

Оптимальным диаметром колес для самоката считается 8 дюймов. Самокат с такими колесами достаточно универсален: на нем можно ездить не только по асфальту, но и по грунту. Кроме того, чем меньше диаметр колес, тем, как правило, слабее двигатель. Масса средней модели с такими колесами составляет ~ 13 кг. Электрические самокаты с колесами диаметром 8 дюймов обычно без проблем помещаются в багажник автомобиля.

В настоящее время 8-дюймовые колеса комплектуются пневматическими шинами, которые, обладая рядом преимуществ, имеют существенные недостатки, связанные с наличием давления воздуха внутри. В безвоздушных колесах гибкие упругие элементы выполняют функции воздуха в пневматических шинах.

Применение безвоздушного колеса дает возможность получения оптимального уровня показателей электротранспорта. Несущая способность безвоздушного колесного движителя в значительной мере определяется жесткостными характеристиками упругих элементов, прежде всего радиальной жесткостью.

Очевидно, что реализация внутреннего демпфирования неразрывно связана в первую очередь с оптимизацией формы спиц безвоздушного колеса: применяемые спицы дугообразной формы или спицы, представляющие собой аналог сотовой структуры, являясь решением проблемы, тем не менее не реализуют полностью существующих возможностей для решения задачи.

В качестве приемлемого решения может быть принято конструктивное исполнение спиц в виде витых пружин S-образной формы. Данное решение продиктовано необходимостью обеспечения боковой жесткости колеса при минимальном количестве деталей и узлов изделия. Витые пружины в подобных конструкциях выполняют функцию бокового ребра жесткости. Учитывая данные обстоятельства, особое значение приобретает материал для изготовления безвоздушного колеса. Так, в [1] исследованы обладающие повышенными механическими свойствами полимерные композиционные материалы на основе полиуретанов для производства электротранспортных средств. В [2] рассмотрено применение полимерного материала на основе стеклопластика, упрочненного стеклянными наполнителями.

Исходя из этого, выбор материала для колесного движителя электросамоката с оптимальными качествами становится весьма актуальным.

Цель исследования – экспериментальное обоснование выбора типа полимерных матриц и составов армирующих наполнителей для изготовления безвоздушных колесных движителей электротранспортных средств.

Схема исследований. Представление безвоздушного колеса как сложной системы (рис. 1) позволяет, с одной стороны, расчленить его проектирование на этапы, с другой – учесть существующие связи между подсистемами, определяющими его работоспособность. Вместе с тем излишняя детализация и конкретизация может не только значительно затруднить, но и сделать подобный анализ практически невозможным. Поэтому следует констатировать, что при моделировании такой системы нецелесообразно создавать одну универсальную модель, которая могла бы воспроизводить как действие системы в целом, так и отдельных ее подсистем.

Как видно из рис. 1, можно выделить отдельный элемент конструкции колеса – спицу-демпфер (рис. 2, *a*), и проводить дальнейшие исследования и расчеты относительно ее механических свойств (рис. 2, *b*).



Рис. 1. Модель системы «Безвоздушное колесо»
 Fig. 1. Model of the “Airless wheel” system

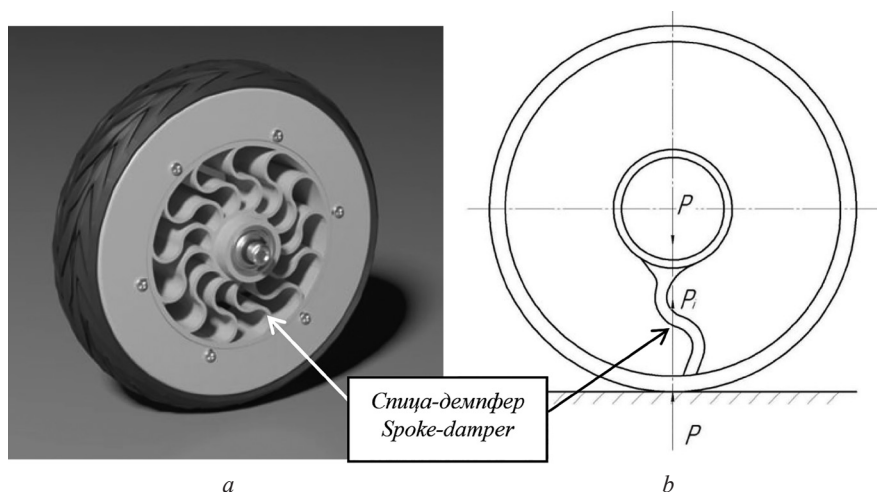


Рис. 2. Внешний вид безвоздушного колеса (a) и схема нагружения безвоздушной шины с упругими элементами радиальной нагрузкой P (b)
 Fig. 2. The appearance of an airless wheel (a), and the loading scheme of an airless tire with elastic elements with a radial load P (b)

Для проведения испытаний были изготовлены образцы согласно ГОСТ 11 262-2017 (ISO 527-2:2012) «Пластмассы. Метод испытания на растяжение». Исследование механических свойств образцов материала проводили на разрывной электромеханической испытательной машине WDW-100E (TIME Group Inc., Китай) с максимальной нагрузкой 100 кН. Для крепления образца в разрывной машине использованы универсальные клиновидные захваты. Деформация образцов во всех экспериментах осуществлялась с постоянной скоростью 2 мм/мин. Удлинение определялось по ходу траверсы.

Для выполнения сравнительных испытаний часть образцов была выполнена с матрицей из эпоксидной смолы L-285, технические характеристики которой представлены в табл. 1.

Эпоксидная смола L-285 предназначена для производства планеров, мотопланеров и моторных самолетов, катеро- и судостроения, изготовления спортивного инвентаря, моделей самолетов, пресс-форм и инструментов. Применяется с различными наполнителями (стекловолокно, углеткань и арамидные волокна). После термообработки при температуре от 50 до 55 °С композит на основе этой смолы соответствует стандартам для планеров и моторных планеров (рабочие температуры от –60 до +54 °С). Для соответствия стандартам для моторных самолетов (рабочие температуры от –60 до +72 °С) требуется термическая обработка при 80 °С.

Т а б л и ц а 1. Технические характеристики эпоксидной смолы L-285

T a b l e 1. Technical characteristics of epoxy resin L-285

Техническая характеристика	Стандарт	Значение
Плотность, г/см ³	DIN EN 610 001 183-1	1,18–1,20
Модуль упругости, ГПа	DIN EN ISO 178	3,0–3,3
Удлинение при разрыве, %	DIN EN ISO 527-2	5,0–6,5
Прочность на изгиб, МПа	DIN EN ISO 178	110–120
Предел прочности на сжатие, МПа	DIN EN ISO 604	120–140
Предел прочности на разрыв, МПа	DIN EN ISO 527-2	70–80
Ударная вязкость, кДж/м ²	SO 179-1	45–55

П р и м е ч а н и е. Отверждение составило 24 ч при 23 °С + 15 ч при 60 °С.

Для проведения испытаний базовой матрицы было изготовлено шесть образцов без добавления армирующих волокон, три из них отверждались при комнатной температуре (L-285H), а остальные (L-285G) – при нагреве до 60 °С.

Во второй части опытов для изготовления образцов использовали литьевой полиуретан. Это универсальный современный конструкционный синтетический материал, который благодаря своим особенным эксплуатационным свойствам используется в качестве замены различных марок резины, каучуков, металла, пластика во многих отраслях промышленности.

Полиуретановые стержни, листы, другие изделия по своим техническим характеристикам во многом превосходят резины, обычные пластические массы, каучуки, даже металл, благодаря чему открываются новые возможности применения, а потребление данной продукции с каждым годом значительно возрастает.

Матрицей для выполнения образцов на базе литьевых полиуретанов выбран Smooth-Cast 300 Series – жидкий синтетический полимер, который обладает очень низкой вязкостью 0,08 Па·с.

Данный продукт обладает высокой влагостойкостью и устойчивостью к воздействию слабых растворителей. Технические характеристики литьевого полиуретана Smooth-Cast 300 Series приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Технические характеристики литьевого полиуретана Smooth-Cast 300 Series [6]

T a b l e 2. Technical characteristics of injection molded polyurethane Smooth-Cast 300 Series [6]

Техническая характеристика	Smooth-Cast 300	Smooth-Cast 305	Smooth-Cast 310
Плотность, г/см ³	1,05		
Модуль упругости на растяжение, МПа	961,8	923,9	
Модуль упругости на изгиб, МПа	882,5	813,6	
Удлинение при разрыве, %	5	7,5	
Предел прочности на изгиб, МПа	31,1	27,58	
Предел прочности на сжатие, МПа	27,58	26,2	
Предел прочности на разрыв, МПа	20,68		
Время отверждения (зависит от массы), мин	10	30	180–240

Аналогично образцам из эпоксидной смолы были изготовлены образцы из базового полиуретана при различных условиях: при атмосферном отвержении (SC), под вакуумом – 81,1 кПа (SC-0.8) и при отверждении с наложением вибрации (SCV).

Для армирования производилась добавка в литьевой полиуретан стеклоровинга (SCV-S-20 и SCV-S-10), углеволоконного ровинга (SCV-U-20 и SCV-U-10) и углеволокна (SCV-U).

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты испытаний образцов из эпоксидной смолы L-285 без добавления армирующих волокон представлены в табл. 3.

Как можно видеть из приведенных результатов, нагрев до 60 °С позволяет увеличить прочность получаемой базовой матрицы на 18 % при улучшении ее текучести (рис. 3). По этой причине последующее изготовление армируемых образцов производилось на базе матрицы L-285G.

Таблица 3. Результаты испытаний базовой матрицы эпоксидной смолы L-285

Table 3. Test results of the basic matrix of epoxy resin L-285

Образец	Предел прочности на растяжение, МПа
L-285H-1	60,6
L-285H-2	48,2
L-285H-3	35
L-285G-1	53,03
L-285G-2	48,46
L-285G-3	74,06

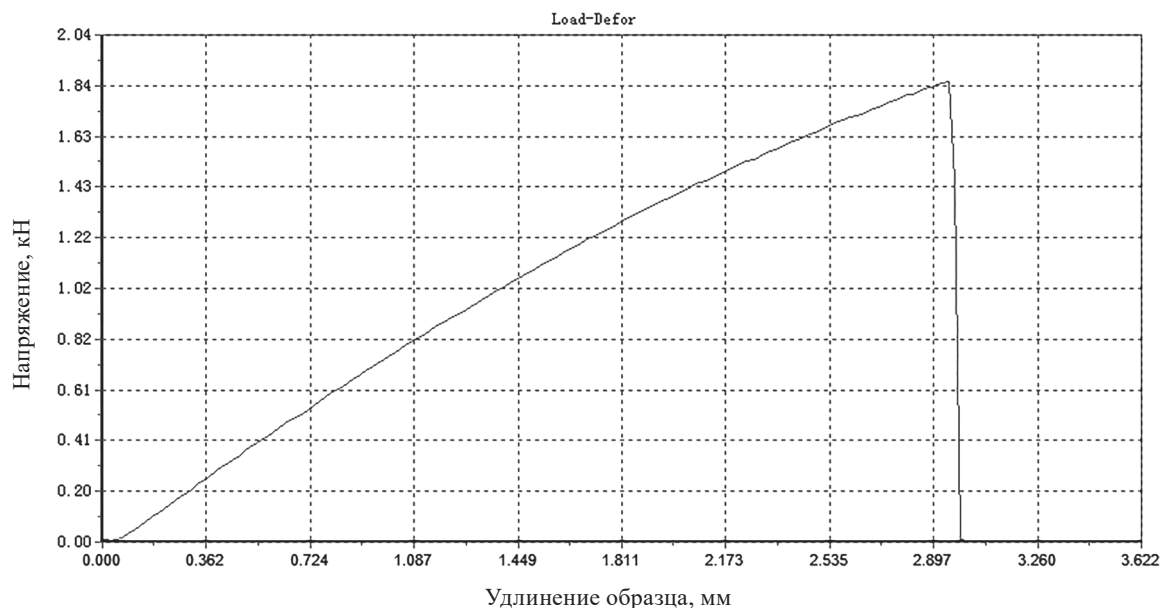


Рис. 3. Диаграмма растяжения матрицы L-285G

Fig. 3. The stretching diagram of the matrix L-285G

Представленный на рис. 3 график на начальной стадии эксперимента имеет практически прямолинейный участок, который соответствует чисто упругой деформации, описываемой законом Гука. В середине графика происходит резкое уменьшение наклона кривой (уменьшение модуля E), что свидетельствует о достижении критических напряжений и изменении механизма деформации.

Данный процесс можно пояснить тем, что после процесса полимеризации полимерные цепи реактопластов образуют сетчатые полимеры [3]. Сама сетка получается за счет структурирования (сшивки) цепей в узлы. Эти узлы имеют разную природу образования (химическую, физическую и топологическую) и обуславливают поведение эпоксиды при разрушении. Например, физические узлы образованы за счет электростатических, ван-дер-ваальсовых и водородных связей. Ввиду низкой прочности данных узлов эпоксиды при нагрузке могут переходить в вязкотекучее состояние и кратковременно проводить «самозалечивание» с перестройкой внутримолекулярной структуры, пока эти связи не разрушатся [4, 5].

В целях улучшения прочностных характеристик эпоксидной матрицы L-285G проводили армирование стеклоровингом ЕС16 1600Т-16(400), который представляет собой первичный продукт производства стеклокомпозитов, получаемый из расплавленного алюмоборосиликатного стекла (вытягивается волокнами диаметром 10–20 мк каждое). Если смола разрушается хрупко при достижении некоторого фиксированного значения механического напряжения (предел прочности), то композит разрушается постепенно (рис. 4), поэтому величина предела прочности становится не вполне определенной, исходя из того, что разрушение материала происходит путем разрыва волокон, а также через образование продольных и поперечных трещин в смоле и между волокнами [5].

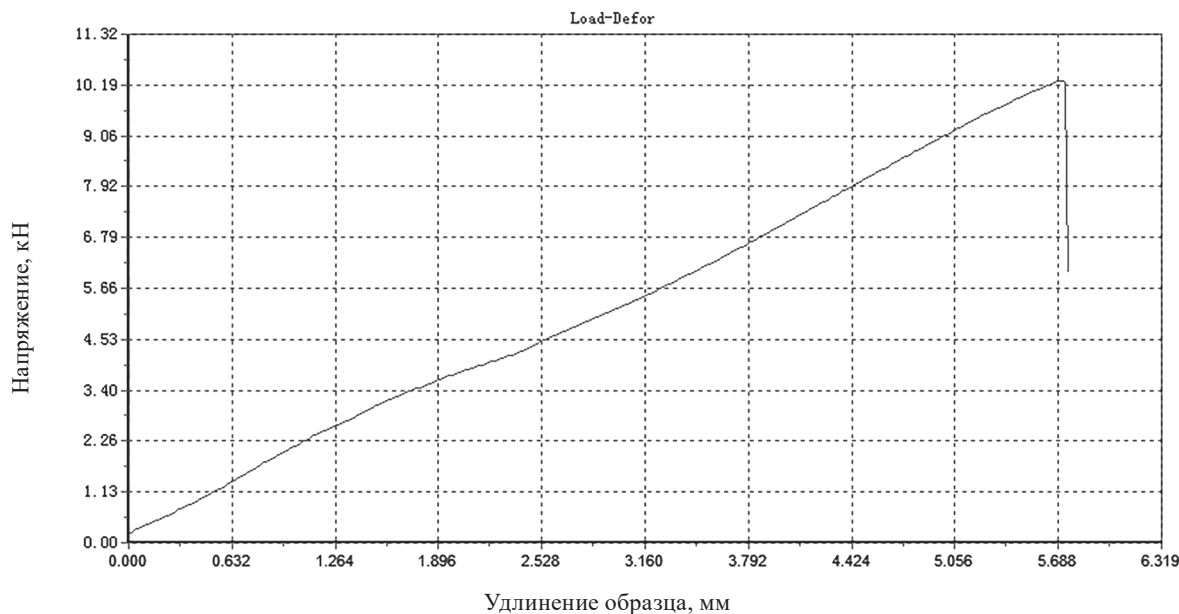


Рис. 4. Диаграмма растяжения композита L-285G-20
Fig. 4. The stretching diagram of the composite L-285G-20

Значения предела прочности на растяжение композитов на матрице L-285, армированных стеклоровингом в 10 сложенный (L-285G-10), 15 (L-285G-15) и 20 сложенный (L-285G-20), приведены в табл. 4. Как видно максимальное значение получено у образца L-285G-20 и равно 358,9 МПа, а минимальное – у образца L-285G-10 – 294,8 МПа.

Таблица 4. Результаты испытаний композитов на матрице L-285

Table 4. Test results of composites on the L-285 matrix

Образец	Предел прочности на растяжение, МПа
L-285G-20	358,97
L-285G-20	333,79
L-285G-15	326,4
L-285G-15	302,3
L-285G-10	316,6
L-285G-10	294,8

Результаты испытаний литьевого полиуретана Smooth-Cast 300 Series при различных условиях: при атмосферном отверждении (SC), под вакуумом (SC-0.8, давление вакуума – 81,1 кПа) и при отверждении с наложением вибрации (SCV), – представлены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты испытаний матрицы Smooth-Cast 300 Series

Table 5. Test results of the Smooth-Cast 300 Series matrix

Образец	Предел прочности на растяжение, МПа	Модуль упругости, МПа	Ударная вязкость по Шарпи без надреза, кДж/м ²
SC-0.8	16,6	472	15
SC	15,3	384	20
SCV	22,9	572	40

Из полученных результатов видно, что наложение вибрации позволяет увеличить прочность получаемой базовой матрицы на 30 %. Это связано с достаточно высокой вязкостью базовых компонентов, что приводит к образованию внутренних дефектов в виде раковин. Наложение вибрации при отверждении вызывает процесс дегазации с отделением пузырей от стенок формы. По этой причине дальнейшее изготовление армируемых образцов производилось на базе матрицы SCV.

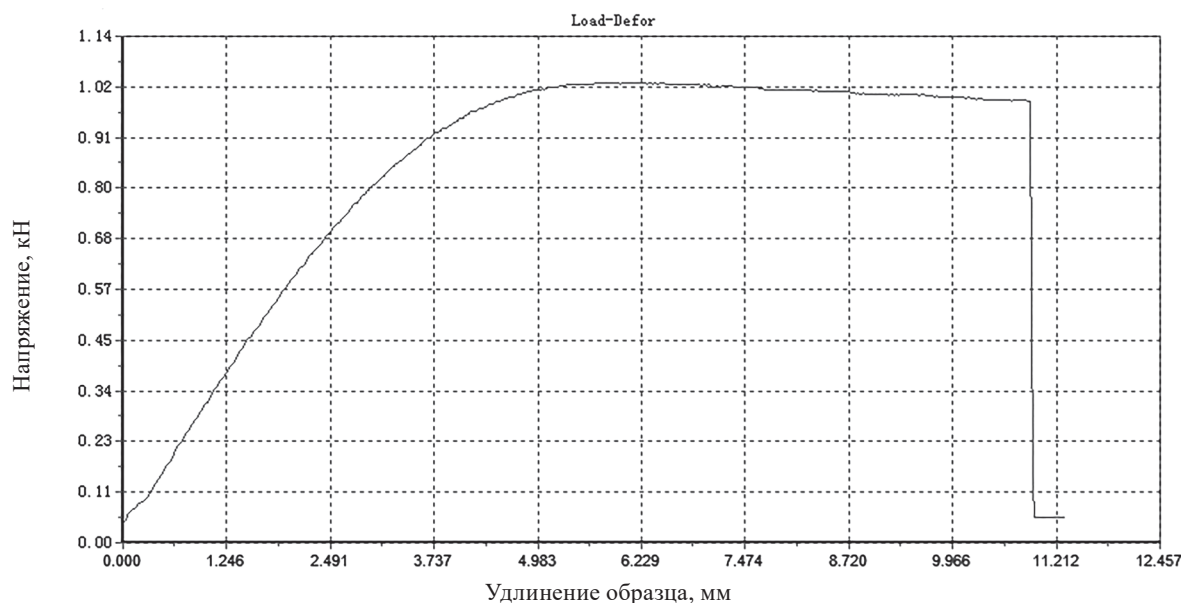


Рис. 5. Диаграмма растяжения композита SCV

Fig. 5. SCV composite stretching diagram

Диаграмма растяжения композита SCV представлена на рис. 5. На кривой зависимости между напряжением и деформацией просматриваются следующие характерные участки. В начале приложения усилия происходит рост напряжения, что свойственно для упругой деформации, описываемой законом Гука. В середине графика происходит незначительное снижение напряжения, а затем в материале происходит надрыв основного сечения (уменьшение модуля E), что свидетельствует об изменении механизма деформации [6, 7].

Следующий этап исследований литевых полиуретанов заключался в проведении испытаний на армированных образцах.

Результаты испытаний композитов на матрице Smooth-Cast 300 Series, армированных стекло-роvingом (SCV-S-20 и SCV-S-10), углеволокном роvingом (SCV-U-20 и SCV-U-10) и углеволокном (SCV-U), приводятся в табл. 6. Лучшие результаты по пределу прочности (65,7 МПа) показал композит SCV-S-20, также у данного композита хорошие показатели модуля упругости (2191 МПа) и ударной вязкости по Шарпи (20 кДж/м²), худшие – у SCV-U (соответственно 1230 МПа и 10 кДж/м²).

Таблица 6. Результаты испытаний композитов на матрице Smooth-Cast 300 Series

Table 6. Test results of composites on a Smooth-Cast 300 Series matrix

Образец	Предел прочности на растяжение, МПа	Модуль упругости, МПа	Ударная вязкость по Шарпи без надреза, кДж/м ²
SCV-S-10	51,4	1580	15
SCV-S-20	65,7	2191	20
SCV-U-10	45,8	1600	10
SCV-U-20	44,4	2270	15
SCV-U	26,3	1230	10

Заключение. В ходе проведенных сравнительных испытаний композиционных материалов на основе литевых полиуретанов и эпоксидных смол установлены отличия механических свойств их матриц. Стоит отметить увеличенное более чем в 2 раза относительное удлинение образцов из литевого полиуретана.

По мнению авторов, для целевого применения в качестве материала демпфирующих элементов безвоздушных шин целесообразно применение композита SCV-S-20 ввиду на порядок большего, по сравнению с базовой матрицей, модуля упругости и предела прочности.

Список использованных источников

1. Янкевич, С. Н. Механические свойства композиционных материалов на основе полиуретанов = Mechanical properties of composite polyurethane-based materials / С. Н. Янкевич, А. Д. Гладинов // *Металлургия: респ. межведомств. сб. науч. тр. / редкол.: И. А. Иванов (гл. ред.) [и др.]*. – Минск: БНТУ, 2022. – Вып. 43. – С. 173–184.
2. Карташов, А. Б. Применение композиционных материалов в конструкции ходовой части городского автомобиля / А. Б. Карташов // *Тр. НГТУ им. Р. Е. Алексеева*. – 2010. – № 3. – С. 155–159.
3. Структурные уровни разрушения эпоксидных композитных материалов при ударном нагружении / П. Д. Стухляк [и др.] // *Физ. мезомеханика*. – 2014. – Т. 17, № 2. – С. 65–83.
4. Research on non-pneumatic tire with gradient anti-tetrachiral structures / Wu Taoyu [et al.] // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. – 2021. – Vol. 28, № 22. – P. 2351–2359. <https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1734888>
5. Size matters – The shell lander concept for exploring medium-size airless bodies / C. D. Grimm [et al.] // *Acta Astronautica*. – 2020. – Vol. 173. – P. 91–110. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.02.002>
6. Hryciów, Z. The Influence of Non-Pneumatic Tyre Structure on its Operational Properties / Z. Hryciów, J. Jackowski, M. Żmuda // *Intern. J. Automotive Mech. Eng.* – 2020. – Vol. 17, iss. 3. – P. 8168–8178. <https://doi.org/10.15282/ijame.17.3.2020.10.0614>
7. Considering the stress concentration of fiber surfaces in the prediction of the tensile strength of unidirectional carbon fiber-reinforced plastic composites / Go Yamamoto [et al.] // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2019. – Vol. 121. – P. 499–509. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.04.011>

References

1. Yankevich S. N., Gladinov A. D. Mechanical properties of composite polyurethane-based materials. *Metallurgiya: resp. mezhvedomst. sb. nauch. tr.* [Metallurgy: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, 2022, issue 43, pp. 173–184 (in Russian).
2. Kartashov A. B. The use of composite materials in the design of the chassis of a city car. *Trudy NGTU im. R. E. Alexeeva = Transactions of Nizhni Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev*, 2010, no. 3, pp. 155–159 (in Russian).
3. Stukhlyak P. D., Buketov A. V., Panin S. V., Marushchak P. O., Moroz K. M., Poltaranin M. A., Vukherer T., et al. Structural levels of destruction of epoxy composite materials under shock loading. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 2014, vol. 17, no. 2, pp. 65–83 (in Russian).
4. Taoyu Wu, Mingxuan Li, Xiaolei Zhu, Xiaofeng Lu. Research on non-pneumatic tire with gradient anti-tetrachiral structures. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2021, vol. 28, no. 22, pp. 2351–2359. <https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1734888>
5. Grimm C. D., Witte L., Schröder S., Wickhusen K. Size matters – The shell lander concept for exploring medium-size airless bodies. *Acta Astronautica*, 2020, vol. 173, pp. 91–110. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.02.002>
6. Hryciów Z., Jackowski J., Żmuda M. The Influence of Non-Pneumatic Tyre Structure on its Operational Properties. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2020, vol. 17, iss. 3, pp. 8168–8178. <https://doi.org/10.15282/ijame.17.3.2020.10.0614>
7. Go Yamamoto, Miho Onodera, Keita Koizumi, Jun Watanabe, Haruki Okuda, Fumihiko Tanaka, Tomonaga Okabe. Considering the stress concentration of fiber surfaces in the prediction of the tensile strength of unidirectional carbon fiber-reinforced plastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 121, pp. 499–509. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.04.011>

Информация об авторах

Янкевич Степан Николаевич – заместитель генерального директора по инновационной деятельности, ОАО «Приборостроительный завод «Оптрон» (ул. Ф. Скорины, 52, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nio@optron.by

Хроль Игорь Николаевич – начальник научно-исследовательского отдела, ОАО «Приборостроительный завод «Оптрон» (ул. Ф. Скорины, 52, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: igor_aspirant_fmm@mail.ru

Калиновский Никита Александрович – младший научный сотрудник, ОАО «Приборостроительный завод «Оптрон» (ул. Ф. Скорины, 52, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kirillf57@gmail.com

Information about the authors

Stsiapan N. Yankevich – Deputy Director General for Innovation, JSC “Instrument-Making Plant “Optron” (52, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nio@optron.by

Igor N. Khrol – Head of the Scientific Department, JSC “Instrument-Making Plant “Optron” (52, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: igor_aspirant_fmm@mail.ru

Nikita A. Kalinovskij – Junior Researcher, JSC “Instrument-Making Plant “Optron” (52, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kirillf57@gmail.com