

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИУРЕТАНОВ

С. Н. ЯНКЕВИЧ

ОАО «Приборостроительный завод Оптрон»

А. Д. ГЛАДИНОВ

Белорусский национальный технический университет

Исследованы механические свойства композиционных материалов на основе полиуретанов в зависимости от содержания различных наполнителей. Установлено, что перспективным армирующим наполнителем являются арамидные волокна, которые позволяют увеличить предел прочности полиуретана на разрыв до 2,5 раз.

Ключевые слова: полиуретаны холодного отверждения, армирование, наполнители, арамидные волокна, механические свойства.

MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE POLYURETHANE-BASED MATERIALS

S. N. YANKEVICH

JSC "Instrument-making plant Optron"

A. D. GLADINOV

Belarusian National Technical University

The mechanical properties of composite materials based on polyurethanes depending on the content of various fillers are studied. It has been established that aramid fibers are a promising reinforcing filler which allow increasing the tensile strength of polyurethane up to 2.5 times.

Keywords: cold-cured polyurethanes, reinforcement, fillers, aramid fibers, mechanical properties.

Введение. Современными материалами, отвечающими все более возрастающим требованиям к деталям и узлам наземного электро-транспорта, являются полимеры, поскольку их конструкционные и прочностные свойства в ряде случаев не уступают металлам и, кроме того, они имеют низкую плотность. Такие материалы позволяют

в широких пределах варьировать их физико-механические свойства путем армирования различными наполнителями. В частности, перспективным полимерным материалом для производства деталей персонального электротранспорта является полиуретан. Использование при изготовлении деталей эластомеров, в частности, полиуретана, позволит снизить уровень стоимости электротранспорта. Полиуретаны нашли широкое применение в машиностроении, но и они не лишены недостатков, поскольку обладают сравнительно невысокими механическими свойствами, а также склонны к накоплению остаточных пластических деформаций под действием длительных механических воздействий. Нивелировать указанные недостатки можно путем правильного выбора армирующих наполнителей, то есть разработки новых составов композиционных полимерных материалов (КПМ), исследования влияния их формы (порошки, волокна) и концентрации на свойства полиуретана, что является целью настоящей работы.

Основными тенденциями в разработке и применении многофункциональных КПМ, являются:

- преимущественное использование материалов, наполненных стекло- или углеволокнами в комбинации с другими функциональными добавками;

- создание смесей на основе термодинамически несовместимых термопластов с использованием функционализированных полимеров в качестве компатибилизаторов.

- разработка КПМ с учетом специфических технических требований заказчика («материал под изделие»);

- определение оптимальных, с точки зрения прочности и износостойкости, размеров волокна, его концентрации, ориентации и распределения в матрице;

- проведение ускоренных испытаний изделий из КПМ.

Из-за отсутствия по вновь создаваемым КПМ данных о кратковременной и длительной усталостной прочности и износостойкости, результаты кратковременных усталостных испытаний (порядка 10^6 циклов перемены напряжений) дополняют данными, полученными при статических испытаниях композита на растяжение, а расчет композитных изделий на износостойкость и прочность при статическом изгибе ведут с использованием двухуровневого метода расчета, в соответствии с так называемым гибридным наполнением

конструкционных термопластов. На 1-ом (микромеханическом) уровне определяют характеристики, которые используются в качестве исходных данных для анализа напряженно-деформированного 2-го (макромеханического) уровня, включая микроскопию и схематизацию структуры композита, диагностику деформационных свойств и верификацию модели.

Так в работе [1] для расчетов характеристик безвоздушных шин методом конечных элементов были использованы характеристики механических свойств полиуретановых эластомеров разных марок. При нормальной нагрузке $P = 4$ кН, соответствующей приходящейся на колесо легкового автомобиля, нормальный статический прогиб h безвоздушной шины из эластичного полиуретана СКУ-ПФЛ-100 составляет 20 мм. При этом статическая жесткость $C = 200$ кН/м. Для сравнения: нормальный прогиб пневматической шины БЛ-85 175/70R13 при указанной нагрузке и номинальном давлении воздуха составляет 34 мм, а статическая жесткость $C = 117,6$ кН/м.

При той же нагрузке прогиб безвоздушной шины из полиуретана СУРЭЛ ТФ-235 $h = 5,0$ мм ее статическая жесткость $C = 800$ кН/м, что ведет к ухудшению плавности хода. Кроме того, жесткий и твердый протектор, как показали испытания безвоздушных шин, сильно повышает шум при езде по дорогам с твердыми покрытиями.

При использовании полиуретана СУРЭЛ ТФ-228 упругие свойства и несущая способность безвоздушной шины были близки к пневматической шине ($h = 28$ мм, $C = 140$ кН/м).

В работе [2] рассмотрены современные подходы к описанию анизотропии механических свойств ориентированного композиционного материала. Установлено, что наибольшие радиальные деформации колесный движитель из КПП на основе стеклопластика, нагруженный вертикальной силой, испытывает при движении по твердой поверхности. Максимальные допустимые эквивалентные напряжения при этом определяются способностью стеклопластика сопротивляться циклическим нагрузкам.

В работе [3] приведены результаты компьютерного моделирования вертикального статического нагружения самонесущей непневматической шины при взаимодействии с твердым основанием. Созданы компьютерные 3d-модель и конечно-элементная модель непневматической шины и стального диска. Получены значения

деформаций и эквивалентных напряжений, возникающих в модели колеса, определен характер деформации упругих элементов шины. Построена зависимость вертикальной нагрузки на колесе от вертикального перемещения, определена вертикальная жесткость колеса.

В статье [4] проанализировано 43 возможных сценария с параметрами оптимизации: напряжение во всех точках безвоздушной шины меньше предела прочности при минимальной ее массе. Количество сценариев и время анализа напрямую связаны с возможностями вычислительной системы. Максимальная деформация при заложенных нагрузках составила 4 мм без разрушений.

В работе [5] приведена модель многоспицевой безвоздушной шины, обладающей характеристиками прочности и жесткости, сравнимыми с традиционными пневматическими шинами. Начальные параметры конструкции спиц определены аналитически без учета их совместной работы. Далее методом конечных элементов (МКЭ) проведен анализ напряженного состояния и уточнены геометрические параметры спиц. Получена нелинейная нагрузочная характеристика колеса при использовании спиц, имеющих возможность контакта между собой. Прочность и жесткость финальной конструкции спиц из стеклопластика проверена на двух основных режимах работы транспортного средства.

Моделирование различных конструкций безвоздушных шин с использованием метода конечных элементов позволяет получить приближенные решения, зависящие от размеров и числа элементов сетки, погрешности определения механических характеристик эластичных полиуретанов, размеров, формы и количества спиц и других факторов.

Материалы и методики исследований. В качестве полимерной матрицы для исследования использовали полиуретан (ПУ) марки Smooth-Cast 300 Series, предел прочности на разрыв которого составляет 21 МПа. В качестве армирующих материалов использовали порошки различных материалов, которые вводили в полимерную полиуретановую композицию при постоянном перемешивании, а также волокна, которые перед заливкой полиуретана укладывали в специально изготовленную из силикона форму, размеры полости в которой соответствовали размерам образцов типа 1А по ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) (рисунки 1).

В качестве наполнителей использовали порошки оксида алюминия, волластонита, кварца и карбида кремния (SiC) разного фракционного состава. Кроме того использовали сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) (таблица 1).

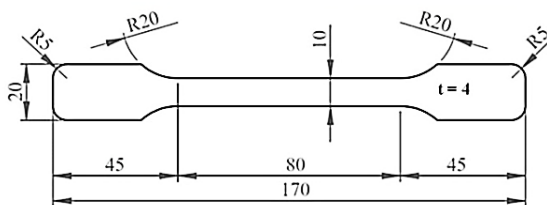


Рисунок 1 – Образец типа 1А по ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012)

Таблица 1 – Составы исследованных композиционных материалов на основе полиуретана

Номер состава	Наполнитель	Размер частиц, мкм	Содержание наполнителя, мас. %
1	без наполнителя	–	–
2	железо	100	10
3	медь	100	10
4	оксид алюминия	1	10
5	волластонит	10	10
6	кварц	10	10
7	СВМПЭ	–	1 слой

Изготовление образцов осуществлялось путем заливки полиуретановой смолы в форму, сушки и отверждении при комнатной температуре в течение 3–6 ч. Испытание на разрыв осуществлялось на разрывной машине WDW–100 E. Для крепления образцов в разрывной машине были использованы универсальные клиновидные захваты. Деформация образцов проводилась со скоростью 2 мм/мин. Удлинение определяли по перемещению траверсы.

Микроструктуру полученных композиционных материалов изучали методом оптической микроскопии на шлифах с дисперсными наполнителями в поперечном направлении оси образцов сечения.

Результаты исследований. Испытания КПМ из упрочненного порошками полиуретана показали, что наибольшими характеристи-

ками предела прочности при растяжении обладают образцы из исходного ПУ и упрочненные введением СВМПЭ (23,5 и 27 МПа соответственно), а наибольшие модули упругости получены при введении порошка меди и СВМПЭ (0,69 и 0,9 ГПа).

Установлено, что образцы композитов с волокнами, в отличие от образцов, упрочненных порошками оксида алюминия и меди, имели дефекты в виде пор и раковин вследствие плохой смачиваемости волокон полимером при литье. Введение порошков увеличивает время затвердевания литых образцов в 2 раза (до 6 ч), что может быть связано с увеличением теплоемкости композиционных материалов.

Испытания на разрыв образцов, армированных порошками карбида кремния, по сравнению с упрочнением порошками металлов, показали, что их предел прочности снижается до 13–15 МПа, что связано с высокой дисперсностью порошков SiC (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты испытаний композиционных материалов на основе полиуретана, упрочненных карбидом кремния

№ образца	Армирующий материал	Предел прочности на растяжение, МПа	Среднее значение предела прочности, МПа	Модуль упругости, ГПа	Среднее значение модуля упругости, ГПа
1	SiC (крупные нити)	7	7	0,606	0,606
4	SiC	4	4	0,318	0,274
5		4		0,240	
6		4		0,265	
7	SiC (0–32 мкм)	15	14,5	0,974	0,978
8		14		0,983	
9	SiC (0–150 мкм)	13	13,3	0,947	0,922
10		14		0,867	
11		13		0,952	

Микроструктуры образцов композиционных материалов 1–6 представлены на рисунке 2.

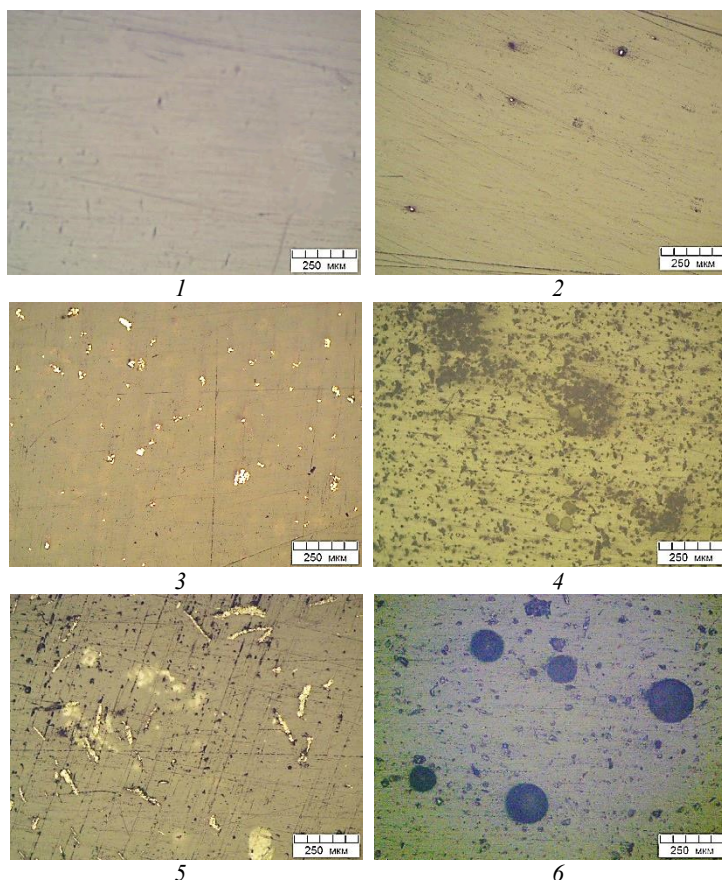


Рисунок 2 – Микроструктура композиционных материалов на основе полиуретана:
 1–6 – составы образцов по таблице 1

Сравнение полученных результатов с приведенными в работе [6] показало, что при использовании в качестве наполнителей оксидов CuO и Fe_2O_3 в количестве 1 мас. % предел прочности ПУ марки СКУ ПФА-100 повышается с 3,5 МПа до 5,0 и 4,5 МПа соответственно.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что для изготовления спиц безвоздушных шин электросамодорожников целесообразно использовать композиты на основе полиуретана с добавлением порошка меди или СВМПЭ ввиду их высокой упругости и эластичности. Для изготовления обода колеса необхо-

можно использовать базовый литевой полиуретан и полиуретан с армированием СВМПЭ ввиду их максимальной прочности.

В качестве волокнистых армирующих материалов при дальнейших исследованиях использовали: арамидные волокна, капроновую нить, хлопчатобумажную нить, композиционную фибру, нейлоновую нить.

Внешний вид образцов из КПМ с различными армирующими волокнистыми материалами приведен на рисунках 3 и 4.

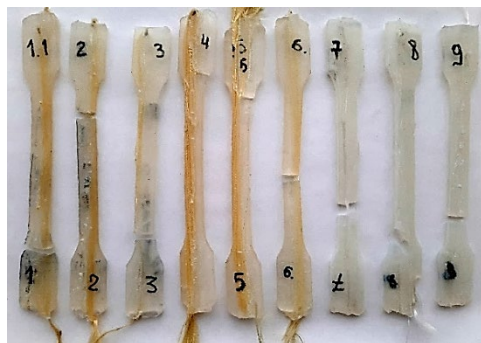


Рисунок 3 – Внешний вид образцов из полиуретана с арамидными волокнами

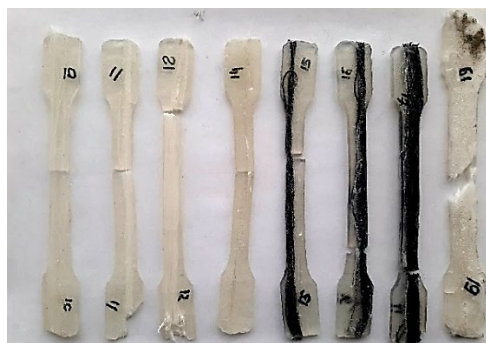


Рисунок 4 – Внешний вид образцов из полиуретана с различными армирующими наполнителями

Результаты испытаний механических свойств образцов КПМ на основе полиуретана холодного отверждения, упрочненных волокнами, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты испытаний КПМ на основе полиуретана, упрочненных волокнами из различных материалов

№ образца	Армирующий материал	Предел прочности на растяжение, МПа	Среднее значение предела прочности, МПа	Модуль упругости, ГПа	Среднее значение модуля упругости, ГПа
1	aramидные волокна	26	24	–	–
2		29		–	
3		17		–	
4		64	51,3	1,53	1,048
5		53		0,977	
6		37		0,915	
7		53	43,6	0,906	0,911
8		37		0,723	
9		41		1,105	
10	капроновая нить	22	34	0,520	0,636
11		33		0,587	
12		47		0,803	
14	нейлоновая нить	21	21	0,465	0,465
15	нить х/б	25	24,3	0,520	0,599
16		16		0,517	
17		32		0,762	
18	композиционная фибра	6	5,5	0,607	0,458
19		5		0,309	

При анализе полученных данных, приведенных в таблице 3, видно, что наибольшими значениями предела прочности на разрыв обладают образцы, армированные арамидными волокнами. При их введении предел прочности повышается в 1,2–2,4 раза по сравнению с аналогичными показателями для других волокон. Характер изменения зависимости удлинения от приложенной нагрузки практически для всех образцов имеет сходный характер, но исключением в данном случае являются образцы, армированные композиционной фиброй. Для них характерно наличие площадок и перегибов, что, скорее всего, связано с хаотичностью расположения волокон и

малой их длиной, что приводит к ступенчатому разрушению. При этом предел прочности образцов снижается до 5 МПа.

Для исследования влияния концентрации волокон на свойства композиционного материала были выбраны арамидные волокна, как показавшие наиболее высокие механические свойства. Образцы изготавливались по той же схеме, что и предыдущие.

Результаты исследований зависимости предела прочности от концентрации арамидных волокон приведены в таблице 4.

Установлено увеличение предела прочности образцов при повышении содержания армирующих волокон. При этом максимальные показатели предела прочности соответствуют образцу 2.3 (98 МПа, таблица 4), имеющему максимальное наполнение арамидными волокнами. Отмечено, что разрушение пришлось на зажатую клиньями часть образцов. Скорее всего, это явление связано с дополнительными напряжениями, обусловленными клиновыми захватами.

Таблица 4 – Результаты испытаний механических свойств КПМ на основе полиуретана, упрочненных арамидными волокнами

Образец №	Армирующий материал	Предел прочности на растяжение, МПа	Модуль упругости, ГПа
1.1	арамидные волокна	21	0,506
1.2		41	1,373
1.3		22	1,348
2.1	арамидные волокна	46	1,710
2.2		58	2,054
2.3		98	0,676

В то же время образцы, упрочненные карбидом кремния, имели предел прочности в 2 раза выше, чем упрочненные фиброй. Это, по-видимому, связано с тем, что фибра плохо смачивается полиуретаном и разрыв при испытании происходит по границам раздела наполнителя и матрицы.

Заключение. Проведенные эксперименты показали, что наиболее эффективным армирующим материалом являются арамидные волокна, которые позволяют повысить предел прочности на растяжение до 2,4 раза в сравнении с другими исследованными армиру-

ющими материалами. Полученные в ходе экспериментов данные могут стать базой для разработки новых композиционных полимерных материалов на основе полиуретанов холодного отверждения и найти применение при производстве безвоздушных шин электро-транспорта.

Список литературы

1. Мазур, В. В. Моделирование и расчет безвоздушных шин из эластичных полиуретанов / В. В. Мазур // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2020. – № 1. – С. 93–108.

2. Карташов, А. Б. Исследование режимов качения колеса из композиционных материалов на основе стеклопластика / А. Б. Карташов, Г. О. Котиев, А. А. Смирнов // Журнал Ассоциации Автомобильных инженеров. – 2009. – № 4 (57). – С. 40–43.

3. Оценка деформации колеса, оснащенного непневматической шиной при компьютерном моделировании вертикального статического нагружения / А. В. Михеев [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им Р. Е. Алексеева. – 2015. – № 2 (109). – С. 162–169.

4. Янкевич, С. Наноструктурированные материалы и аддитивные технологии для персонального электротранспорта / С. Янкевич // Наука и инновации. – 2021. – № 1. – С. 34–41.

5. Абдрахимов, Р. Р. Многоспицевая безвоздушная шина из композита: прочность и жесткость / Р. Р. Абдрахимов, В. А. Цитцер, С. Б. Сапожников // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 5–12.

6. Бурдикова, Т. В. Исследование влияния наноксидов металлов на эксплуатационные характеристики композиционных материалов на основе полиуретанов / Т. В. Бурдикова, Л. А. Зенитова, С. С. Ившин // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2020. – Т. 63. – Вып. 10. – С. 64–70.

References

1. Mazur, V. V. *Modelirovanie i raschjot bezvozdushnyh shin iz jelastichnyh poliuretanov* [Modeling and calculation of airless tires made

of elastic polyurethanes] / V. V. Mazur // Scientific and Technical Bulletin of the Bryansk State University. – 2020. – No. 1. – P. 93–108.

2. Kartashov, A. B. *Issledovanie rezhimov kachenija kola iz kompozicionnyh materialov na osnove stekloplastika* [Investigation of rolling modes of wheels made of composite materials based on fiberglass] / A. B. Kartashov, G. O. Kotiev, A. A. Smirnov // *ZHurnal Asso-ciacii Avtomobil'nyh inzhenerov = Journal of the Association of Automotive Engineers.* – 2009. – No. 4 (57). – P. 40–43.

3. Ocenka deformacii kola, osnashhennogo nepnevmaticheskoy shi-noj pri komp'yuternom modelirovanii vertikal'nogo staticheskogo nagru-zhenija [Evaluation of the deformation of a wheel equipped with a non-pneumatic tire in computer modeling of vertical static loading] / A. V. Mikheev [et al.] // *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo uni-versiteta im. R. E. Alekseeva = Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev.* – 2015. – No. 2 (109). – P. 162–169.

4. Yankevich, S. *Nanostrukturirovannyye materialy i additivnye tehnologii dlja personal'nogo jelektrotransporta* [Nanostructured materials and additive technologies for personal electric transport] / S. Yankevich // *Nauka i innovacii = Science and Innovation.* 2021. – No. 1. – P. 34–41.

5. Abdrakhimov, R. R. *Mnogospicevaja bezvozdushnaja shina iz kompozita: prochnost' i zhestkost'* [Multi-spoke airless composite tire: strength and rigidity] / R. R. Abdrakhimov, V. A. Tsitzer, S. B. Sapozh-nikov // *Vestnik YUzhno-ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seri-ya "Mashchinostroenie" = Bulletin of SUSU. The series "Machine-building"*. – 2016. – Vol. 16, No. 4. – P. 5–12.

6. Burdikova, T. V. *Issledovanie vlijanija nanooksidov metallov na jekspluatacionnye harakteristiki kompozicionnyh materialov na osnove poliuretanov* [Investigation of the effect of metal nanoxides on the perfor-mance characteristics of composite materials based on polyurethanes] / T. V. Burdikova, L. A. Zinitova, S. S. Ivshin // *Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya = News of higher educationl istitutions. Chemistry and chemical technology.* – 2020. – Vol. 63. – Vyp. 10. – P. 64–70.

Поступила 01.11.2022
Received 01.11.2022