

УДК 54.057:54.03:54-76:54-79

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ВНЕШНИХ ВИБРАЦИЙ В ОТВЕТСТВЕННЫХ УЗЛАХ УСКОРТЕЛЕЙ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2023 г. Ф. К. Горбунов¹, *, А. А. Фади́на¹, Т. В. А. Нгуен²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук”,
Новосибирск, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Новосибирский национальный исследовательский государственный университет”, Новосибирск, Россия

*E-mail: f.gorbunov@solid.nsc.ru

Поступила в редакцию 28.11.2022 г.

После доработки 15.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Показано, что введение порошков-модификаторов в полимерную матрицу в количестве менее 1 мас. % приводит к увеличению прочностных характеристик и стойкости к циклическому нагружению с силой 50–1600 Н и частоте 2 Гц более 3 млн циклов.

DOI: 10.31857/S0367676522701137, EDN: KVPIYA

ВВЕДЕНИЕ

Синхротронное излучение (СИ) – давно признанный инструмент аналитических методик исследования состава и структуры вещества. Синхротрон является кольцевым циклическим ускорителем заряженных частиц, схема и принцип работы которого описаны в [1]. В настоящее время работы с синхротронным излучением в ИЯФ СО РАН выполняются на экспериментальных станциях накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-4М [2] и большинство исследований [2–6] направлено на улучшение их характеристик или разработку новых станций, но при этом отсутствуют работы по созданию полимерных материалов для подавления внешних вибраций и циклических воздействий в различных узлах ускорителей.

Ранее в работе [7] авторами уже был изучен один из способов модифицирования литьевых полиуретанов (ЛПУ): изменение физико-механических характеристик полимерных материалов было достигнуто введением малых добавок нанодисперсных керамических частиц, которые выступают в качестве зародышей кристаллизации полимерной матрицы и тем самым изменяют размер зерна полимера (ЗП). Уменьшение зерна полимера [8] приводит к увеличению прочностных свойств материалов. Более подробно механизм изменения размера ЗП от количества структурообразующих центров представлен в работе [9].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

ЛПУ относится к слаборазветвленным или частично сшитым полимерам, поэтому модифицирование его в расплаве или растворе невозможно. Вследствие этого модифицирование ЛПУ проводили “in situ” на стадии смешения исходных компонентов синтеза. Порошки-модификаторы вводили в компоненты, содержащие реакционно-способные изоцианатные (~NCO) группы, по которым идет основная реакция синтеза, что способствует равномерному распределению частиц наполнителя в полимерной матрице.

В настоящей работе получали образцы литьевого полиуретана на основе отвердителя МОСА и преполимера СКУ ПФЛ-74. В качестве модифицирующей добавки был выбран нанодисперсный корунд (средний размер частиц ~60 нм) в количестве от 0.001 до 0.1 мас. %, полученный в результате механообработки на центробежно-планетарной мельнице АГО-2. Полимерные материалы испытывали по ГОСТ на стойкость к циклическим воздействиям, истираемость, твердость, прочность и относительное удлинение при растяжении. Физико-механические характеристики ЛПУ приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, при введении в структуру ЛПУ порошка-модификатора в количестве 0.001 мас. % происходит: увеличение показателей предела прочности с 17.6 и 24.2 МПа (на 37.5%) и относительного удлинения при растяжении с

Таблица 1. Физико-механические характеристики модифицированного ЛПУ

Содержание модификатора, мас. %	Твердость, Шор А	Плотность, г/см ³	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Истираемость, мм ³ /м
0	90.3	1.07	17.6	564.0	38.6
0.001	90.1	1.10	24.2	797.7	29.8
0.01	89.8	1.08	23.2	649.8	27.5
0.1	89.9	1.10	19.8	683.4	38.1

564.0 до 797.7% (на 41%), а также снижение истираемости с 38.6 до 29.8 мм³/м. Увеличение концентрации порошка-модификатора в ЛПУ до 0.1 мас. % приводит к снижению прочностных характеристик относительно образцов, содержащих 0.001 мас. % модификатора, но выше показателей немодифицированного ЛПУ.

Наличие порошков модификаторов в полимерной матрице в процессе синтеза приводит к изменению надмолекулярной структуры, так как керамические наночастицы выступают в роли структурообразующих центров в процессе отверждения полимера. На рис. 1 представлена схема формирования зерна полимера (ЗП) различного размера от количества структурообразующих центров. Данный процесс можно описать следующим образом: в идеальных условиях, если в полимерной матрице находится один структурообразующий центр, то формирование ЗП будет происходить вокруг него до тех пор, пока не будет ограничен размерами емкости (рис. 1а). Наличие же нескольких структурообразующих центров, равномерно распределенных в объеме, приведет к одновременному началу и окончанию формирования ЗП равного размера (рис. 1б и 1в). Но введение в полимерную матрицу большого количе-

ства наночастиц, такого что они не могут равномерно распределиться в объеме полимера, приводит к их агрегации (рис. 1д). В последствии уже агрегаты выступают в качестве структурообразующих центров (рис. 1е), что приводит к увеличению размера зерна полимера.

Введение керамических порошков-модификаторов в полимерную матрицу литьевого полиуретана в количестве 0.001 мас. % приводит к изменению его надмолекулярной структуры, а именно, уменьшению размера ЗП (рис. 2) практически в 5 раз (с 15 до 3–5 мкм) и как следствие увеличению прочностных характеристик материала.

Для определения стойкости полимерных композитов к воздействию циклических нагрузок изготовлены образцы в виде амортизаторов (рис. 3) с различным содержанием керамических порошков-модификаторов (от 0.001 до 0.1 мас. %). Так как при работе ускорителей синхротронного излучения возникают различные внешние вибрации и циклические нагрузки, которые должны поглощать специальные материалы подобно амортизаторам при работе протезов, то для испытаний использован модуль МК-010. Исследования проведены в соответствии с ГОСТ Р ИСО 10328-2007 (табл. 2–4) с уровнем нагрузки Р6.

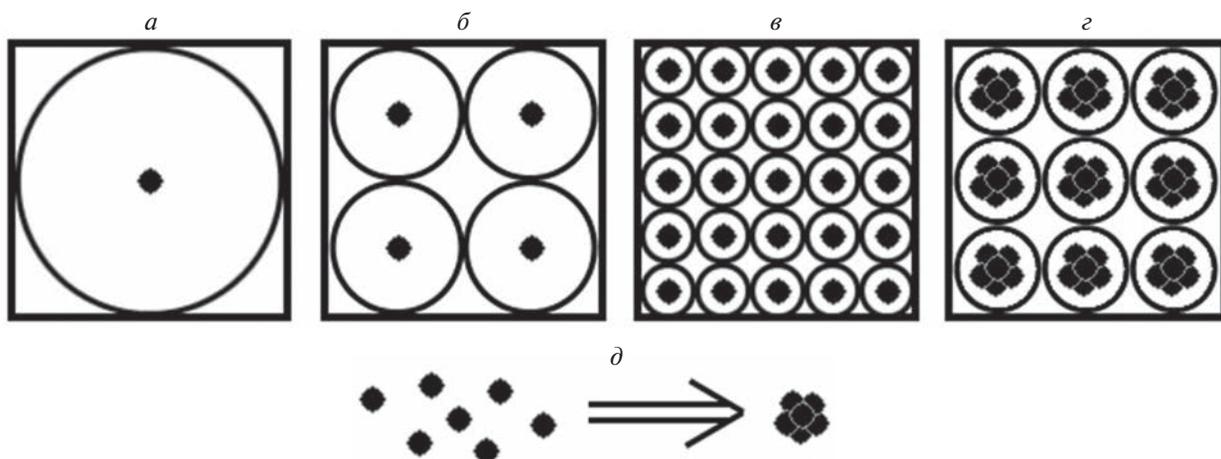


Рис. 1. Зависимость размера ЗП от количества структурообразующих центров: один (а); четыре (б); равномерно распределены (в); агрегированные частицы (г); процесс агрегации частиц (д).

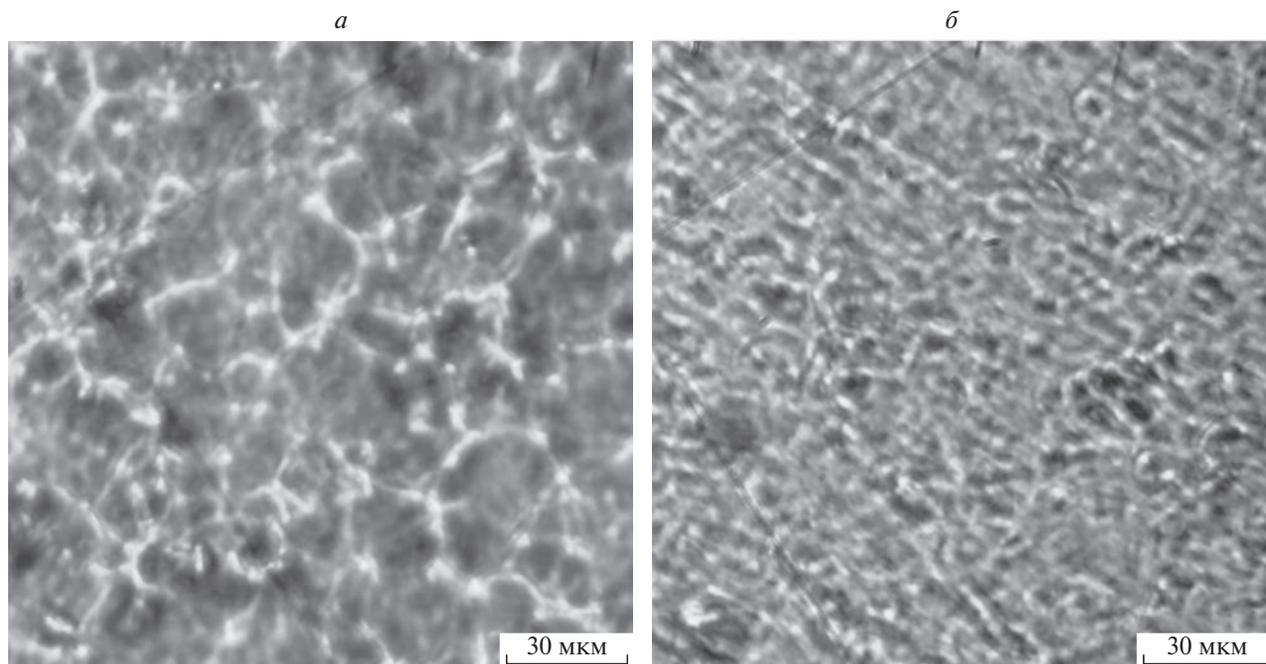


Рис. 2. Микрофотографии ЛПУ немодифицированного (*а*) и модифицированного (*б*) наночастицами корунда в количестве 0.001 мас. %.



Рис. 3. Внешний вид амортизаторов из модифицированных ЛПУ, изготовленных авторами.

Статические и циклические испытания проводили при следующих условиях: I – по схеме нагружения на пятку; II – на носок.

На основании данных табл. 2 и 3 можно сделать вывод, что все образцы ЛПУ включая немодифицированный прошли испытания при стати-

ческом нагружении без разрушений и недопустимых деформаций. Но в результате циклических воздействий (табл. 4) немодифицированный ЛПУ разрушился при 2.5–2.6 млн циклов, а модифицированный выдержал 3 млн циклов без разрушений и недопустимых деформаций.

Таблица 2. Статическое проверочное испытание по ГОСТ Р ИСО 10328-2007 п.п. 16.2.1

Содержание модификатора, мас. %	Условие нагружения		Усилие по ГОСТ, Н	Фактическое усилие, Н	Состояние образца (деформация)
0	I	Скорость 100 Н/с, выдержка 30 с	2490	2500	Без разрушений и недопустимых деформаций
	II		2263	2265	
0.1	I	2490	2490		
	II	2263	2270		
0.01	I	2490	2490		
	II	2263	2265		
0.001	I	2490	2495		
	II	2263	2275		

Таблица 3. Статическое испытание до разрушения по ГОСТ Р ИСО 10328-2007 п.п. 16.2.2

Содержание модификатора, мас. %	Условие нагружения		Усилие по ГОСТ, Н	Фактическое усилие, Н	Состояние образца (деформация)
			пластич. : хрупкое		
0	I	Скорость 100 Н/с, выдержка 30 с	3760 : 4880	4890	Не разрушился
	II		3419 : 4425	4510	
0.1	I	3760 : 4880	4900	Не разрушился	
	II	3419 : 4425	4500		
0.01	I	3760 : 4880	4890	Не разрушился	
	II	3419 : 4425	4500		
0.001	I	3760 : 4880	4900	Не разрушился	
	II	3419 : 4425	4490		

Таблица 4. Циклическое испытание по ГОСТ Р ИСО 10328-2007 п. 16.3 при частоте 2 Гц

Содержание модификатора, мас. %	Условие нагружения	Усилие по ГОСТ, Н	Фактическое усилие, Н	Число циклов до разрушения
0	I	50–1580	40...60–1570...1580	2.5–2.6 млн
	II	50–1450	40...60–1445...1465	
0.1	I	50–1580	40...60–1580...1590	Более 3 млн
	II	50–1450	40...60–1450...1460	
0.01	I	50–1580	40...60–1580...1590	Более 3 млн
	II	50–1450	40...60–1450...1470	
0.001	I	50–1580	40...60–1580...1585	Более 3 млн
	II	50–1450	40...60–1450...1460	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние нанодисперсного ко-рунда (средний размер частиц ~60 нм) в количестве менее 1 мас. % на свойства литьевого полиуретана горячего отверждения введенного “*in situ*” на стадии смешения исходных компонентов синтеза.

Определено, что введение в структуру полиуретана порошка-модификатора в количестве 0.001 мас. % происходит: увеличение показателей предела прочности с 17.6 и 24.2 МПа (на 37.5%) и относительного удлинения при растяжении с 564.0 до 797.7% (на 41%), а также снижение истираемости с 38.6 до 29.8 мм³/м. Увеличение кон-

центрации порошка модификатора в ЛПУ до 0.1 мас. % приводит к снижению прочностных характеристик относительно образцов, содержащих 0.001 мас. % модификатора, но выше показателей немодифицированного ЛПУ.

Показано, что содержание нанодисперсного корунда в полимерной матрице в количестве 0.001 мас. % в процессе синтеза приводит к изменению надмолекулярной структуры полиуретана, а именно, уменьшению размера ЗП практически в 5 раз (с 15 до 3–5 мкм) и как следствие увеличению прочностных характеристик материала.

Обнаружено, что все образцы ЛПУ включая немодифицированный прошли испытания при статическом нагружении без разрушений и недопустимых деформаций. Но в результате циклических воздействий при частоте 2 Гц немодифицированный ЛПУ разрушился при 2.5–2.6 млн циклов, а модифицированный выдержал 3 млн циклов без разрушений и недопустимых деформаций.

Работа была выполнена в рамках бюджетного проекта № FWUS-2021-0004 Института твердотельной химии и механохимии СО РАН и Федеральной целевой программы в соответствии с соглашением № 075-15-2021-1359 от 13.10.2021 г. (внутренний номер 15.СИН.21.0015).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Кэбин Э.И.* Частицы и ядра. Эксперимент. М.: Издательство МАКС Пресс, 2013.
2. *Гольденберг Б.Г., Ракиун Я.В., Бугаев С.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 2. С. 176; *Goldenberg B.G., Rakshun Ya.V., Bugaev S.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Ser. Phys. 2019. V. 83. No. 2. P. 129.
3. *Легкодимов А.А., Купер К.Э., Колмогоров Ю.П., Баранов Г.Н.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 2. С. 158; *Legkodymov A.A., Kuoer K.E., Kolmogorov Yu. P., Baranov G.N.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Ser. Phys. 2019. V. 83. No. 2. P. 112.
4. *Шехтман Л.И., Аульченко В.М., Жуланов В.В., Кудашкин Д.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 2. С. 269; *Shekhtman L.I., Aulchenko V.M., Zhulanov V.V., Kudashkin D.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Ser. Phys. 2019. V. 83. No. 2. P. 220.
5. *Федотов М.Г., Мишнев С.И., Лянгасов И.Д.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 2. С. 163; *Fedotov M.G., Mishnev S.I., Ljangasov I.D.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Ser. Phys. 2019. V. 83. No. 2. P. 116.
6. *Ращенко С. В., Дарьин А.В., Ракиун Я.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 2. С. 228; *Rashchenko S.V., Darin A.V., Rakshun Ya.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Ser. Phys. 2019. V. 83. No. 2. P. 180.
7. *Горбунов Ф.К., Полубояров В.А., Байкина Л.К., Волоскова Е.В.* // Персп. матер. 2013. № 3. С. 71.
8. *Gorbunov F.K., Poluboyarov V.A., Saprykin A.I., Berdnikova L.K.* // Mater. Today. Proc. 2019. V. 12. Part. 1. P. 66.
9. *Горбунов Ф.К., Полубояров В.А., Волоскова Е.В., Кадимова А.В.* // Изв. вузов. Технол. легк. пром. 2017. Т. 1. С. 109.

Obtaining and researching materials for suppressing external vibrations in the responsible nodes of synchrotron radiation accelerators

F. K. Gorbunov^{a, *}, A. A. Fadina^a, T. V. A. Nguyen^b

^a *Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630128 Russia*

^b *Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090 Russia*

*e-mail: f.gorbunov@solid.nsc.ru

We show that the introduction of powders-modifiers into a polymer matrix in an amount of less than 1 wt % leads to an increase in the strength characteristics and resistance to cyclical loading with a force of 50–1600 N and a frequency of 2 Hz of more than 3 million cycles.