

EDN: LGQCUH

УДК 661.1:678.8

## **Investigation of Polymer Composite Materials Based on Mechanically Activated Polytetrafluoroethylene**

**Tatyana A. Isakova\***,  
**Pavlina N. Petrova and Marfa A. Markova**  
*Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian  
Branch of the Russian Academy of Science  
Yakutsk, Russian Federation*

Received 29.06.2023, received in revised form 10.08.2023, accepted 04.10.2023

**Abstract.** In this work, the influence of mechanical activation of polytetrafluoroethylene PTFE on the properties of filled composites was studied. It has been established that the polymer mixture of PTFE with 10 wt.% activated PTFE in a planetary mill within 5 minutes increases the deformation-strength parameters and the modulus of elasticity. It has been shown that the addition of 0.5–2 wt.% of activated Sibunit to the polymer matrix does not lead to a decrease in deformation-strength characteristics compared to the original PTFE, while the wear resistance of polymer composite materials PCM increases by 6–56 times. This is apparently due to the fact that, upon activation, Sibunit particles are dispersed, and the modified matrix is characterized by improved values of deformation and strength characteristics, which compensates for the negative effect of the filler on these indicators when the Sibunit content is filled to 2 wt.%. An increase in concentration to 5 wt.% leads to an increase in wear resistance by a factor of 107, but to a decrease in the deformation-strength parameters of PCM. Thus, based on the studies performed, the use of a polymer mixture of PTFE-activated PTFE containing up to 10 wt.% of the activated polymer.

**Keywords:** polytetrafluoroethylene, polymer composites, mechanical activation, deformation-strength properties.

**Acknowledgements.** The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 122011100162–9 using the scientific equipment of the Center for Collective Use of the Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Grant No. 13.ЦКП.21.0016.

Citation: Isakova T. A., Petrova P. N., Markova M. A. Investigation of polymer composite materials based on mechanically activated polytetrafluoroethylene. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(8), 967–976.  
EDN: LGQCUH



## Исследование полимерных композиционных материалов на основе механоактивированного политетрафторэтилена

Т. А. Исакова, П. Н. Петрова, М. А. Маркова  
*Институт проблем нефти и газа  
Сибирского отделения Российской академии наук  
Российская Федерация, Якутск*

**Аннотация.** В данной работе исследовано влияние механической активации политетрафторэтилена ПТФЭ на свойства наполненных композитов. Установлено, что у полимерной смеси ПТФЭ с 10 мас.% активированного ПТФЭ в планетарной мельнице в течение 5 минут повышаются деформационно-прочностные показатели и модуль упругости. Показано, что добавление 0,5–2 мас.% активированного Сибунита в полимерную матрицу не приводит к снижению деформационно-прочностных показателей по сравнению с исходным ПТФЭ, износостойкость полимерных композиционных материалов ПКМ при этом повышается в 6–56 раз. Это, видимо, связано с тем, что при активации частицы Сибунита диспергируются, а также модифицированная матрица характеризуется улучшенными значениями деформационно-прочностных характеристик, что компенсирует негативное влияние наполнителя на эти показатели при наполнении содержания Сибунита до 2 мас.%. Увеличение концентрации до 5 мас.% приводит к повышению износостойкости в 107 раз, но к снижению деформационно-прочностных показателей ПКМ. Таким образом, на основании проведенных исследований показана перспективность использования полимерной смеси ПТФЭ-активированный ПТФЭ, содержащий до 10 мас.% активированного полимера.

**Ключевые слова:** политетрафторэтилен, полимерные композиты, механоактивация, деформационно-прочностные свойства.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ № 122011100162-9 с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант № 13.ЦКП.21.0016).

Цитирование: Исакова Т. А. Исследование полимерных композиционных материалов на основе механоактивированного политетрафторэтилена / Т. А. Исакова, П. Н. Петрова, М. А. Маркова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(8). С. 967–976. EDN: LGQCUH

### Введение

Применение композиционных материалов на полимерной основе играет большую роль в увеличении производительности и становлении эффективного развития ведущих отраслей промышленности [1]. Политетрафторэтилен (ПТФЭ) и композиты на его основе обладают превосходными эксплуатационными свойствами благодаря его специфическим особенностям молекулярной структуры [2]. Один из наиболее эффективных способов при разработке композитов – метод механической активации [3] с введением волокнистых или дисперсных наполнителей [4], так как ПТФЭ является адгезионно-инертным полимером, а сами наполнители характеризуются неоднородным гранулометрическим составом, при хранении могут терять структурную активность, агломерироваться. В связи с этим во многих исследованиях используют активированные наполнители [2].

Механическая активация самой матрицы ПТФЭ приводит к изменению надмолекулярной структуры и повышению ее реакционной способности, что было показано в работах авторов [4, 5].

Механическая активация – это метод, который может вызвать ряд физических и химических изменений в твердых материалах путем применения сдвига, сжатия, удара, изгиба и растяжения, которые также вызывают химические реакции [6]. В процессе механического измельчения структура твердых материалов сильно изменяется: размер частиц материалов быстро уменьшается, площадь поверхности частиц увеличивается, происходит искажение кристаллической решетки и образуются дефекты решетки, аморфный характер будет усиливаться [7, 8]. Многочисленными экспериментальными и теоретическими исследованиями установлено многообразие явлений, сопровождающих процесс механической активации веществ. Регистрируются следующие процессы: эмиссия электромагнитных волн, тепловыделение, эмиссия электронов, образование упругих и пластических деформаций, медленная релаксация деформаций и избыточных напряжений в твердых телах [9, 10]. Это приводит к сохранению веществом избыточной энергии, изменению термодинамических характеристик вещества, повышению его реакционной способности.

Благодаря широкому интервалу рабочих температур, химической стойкости, низкому коэффициенту трения и способности работать без смазки ПТФЭ широко используется для изготовления различных уплотнительных деталей (прокладок, сальниковых колец, манжет, седел, клапанов и др.). Однако при введении даже активированных наполнителей в достаточном количестве для существенного повышения износостойкости ПТФЭ снижаются деформационно-прочностные характеристики. Композиты становятся жесткими и часто подвергаются из-за этого хрупкому разрушению при небольшой деформации под воздействием нагрузки, что ограничивает их применение в качестве уплотнений. Это связано с тем, что одним из основных требований, которые предъявляются к уплотнительным материалам, является жесткость, чтобы выдерживали нагрузки, и упругость одновременно, чтобы материал не разрушался, не крошился при этом. В связи с этим при разработке композитов на основе ПТФЭ, предназначенных для использования в качестве уплотнений, необходимо учитывать это обстоятельство и использовать различные технологические приемы для решения этой задачи.

В данной работе было решено апробировать технологию механоактивации самой полимерной матрицы. Целью работы является исследование влияния механической активации ПТФЭ на свойства наполненных композитов.

### **Материалы и методы исследования**

В качестве полимерной матрицы использовали ПТФЭ – фторопласт-4 (Ф-4) марки ПН, ГОСТ 10007–80. В качестве наполнителя использован углеродный материал Сибунит производства Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН. Углеродный материал Сибунит относится к классу пористых углеродных материалов, обладает прекрасной химической устойчивостью и электропроводностью, развитой поверхностью пор [11].

Образцы для испытаний получали методом холодного формования при удельном давлении 50 МПа с последующим спеканием до 380 °С и свободным охлаждением до комнатной температуры согласно стандартной технологии переработки композитов на основе ПТФЭ.

Механическую активацию ПТФЭ проводили в планетарной мельнице «Pulverisette 5» с частотой вращения 400 об/мин и в планетарной мельнице «АГО-2» при 3000 об/мин.

Показатели механических характеристик образцов определяли при испытаниях на растяжение на разрывной машине UTS-20K (UTS Testsysteme, Германия) по ГОСТ 11262–2017. Из триботехнических характеристик представлены скорость массового изнашивания, коэффициент трения на машине трения ИИ-5018 (Россия) (образец – столбик диаметром 10 мм, высотой 20 мм, контртело – стальной вал из стали 45) при удельном давлении 160 Н, скорости скольжения 0,2 м/с, время испытания 3 ч, ГОСТ 11629–2017).

### Результаты и их обсуждения

В данной работе в качестве полимерной матрицы предлагается использовать ПТФЭ, включающий в состав активированный в планетарной мельнице ПТФЭ в различных концентрациях. Для выбора полимерной матрицы сначала проведены исследования влияния содержания активированного ПТФЭ в течение 5 мин в общей массе полимерной смеси на деформационно-прочностные и триботехнические свойства. Значения физико-механических и триботехнических показателей в зависимости от концентрации активированного в планетарной мельнице ПТФЭ приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что введение активированного ПТФЭ в ПТФЭ приводит к снижению износостойкости, но при этом зарегистрировано существенное повышение деформационно-прочностных показателей при концентрации активированного полимера до 10 мас.%. Так, добавление в ПТФЭ 5 и 10 мас.% активированного ПТФЭ приводит к повышению прочности при растяжении и относительному удлинению на 20–35 %. При добавлении больше 10 мас.% значения прочности при растяжении остаются на уровне исходного ПТФЭ, значение относи-

Таблица 1. Зависимость физико-механических и триботехнических характеристик ПТФЭ от концентрации активированного ПТФЭ

Table 1. Dependence of the physical, mechanical and tribological characteristics of PTFE on the concentration of activated PTFE

Состав ПКМ	$\sigma_p$ , МПа	$\epsilon_p$ , %	$E_p$ , МПа	$\sigma_{сж}$ при деформации 25 %, МПа	$E_{сж}$ , МПа	I, мг/ч	f
ПТФЭ	20–22	300–320	513	24	317	161	0,21
ПТФЭ+5 мас.% ПТФЭ акт.	23–24	370–390	574	26	397	167	0,20
ПТФЭ+10 мас.% ПТФЭ акт.	24–25	410–430	610	26	453	171	0,21
ПТФЭ+20 мас.% ПТФЭ акт.	22–23	320–330	424	23	349	219	0,23
ПТФЭ+30 мас.% ПТФЭ акт.	19–20	230–240	472	23	308	217	0,24
ПТФЭ+50 мас.% ПТФЭ акт.	21–22	310–320	500	24	444	204	0,23
100 мас.% ПТФЭ акт.	19–20	210–220	504	27	292	208	0,26

Примечание:  $\sigma_p$  – предел прочности при растяжении, МПа;  $\epsilon_p$  – относительное удлинение при разрыве, %;  $E_p$  – модуль упругости при растяжении, МПа;  $\sigma_{сж}$  – предел прочности при сжатии 25 %, МПа;  $E_{сж}$  – модуль упругости при сжатии, МПа; I – скорость массового изнашивания, мг/ч; f – коэффициент трения.

тельного удлинения при разрыве меняется нелинейно. Так, например, при добавлении 20 и 50 мас.% активированного ПТФЭ значения деформационно-прочностных показателей остаются на уровне исходного полимера, а при концентрации 30 мас.% активированного ПТФЭ зарегистрировано снижение относительного удлинения. Наибольшее повышение деформационно-прочностных показателей и модуля упругости отмечено у полимерной смеси ПТФЭ с 10 мас.% активированного ПТФЭ, в связи с этим при дальнейших исследованиях в качестве полимерной матрицы использована эта композиция. Выбор этой композиции обусловлен еще тем, что чем выше значения модуля упругости, тем меньше композит может растягиваться при нагрузках, т.е. значения остаточной деформации будет меньше, что важно при использовании полимерных материалов в качестве уплотнений.

На основе проведенных работ авторами [5, 12] можно сделать вывод, что при механоактивации ПТФЭ в планетарной мельнице «Pulverisette-5» в течение 5 мин при скорости вращения барабанов 400 об/мин не происходит деструкции полимера, однако это вызывает необратимые деформационные изменения частиц ПТФЭ и появление дефектных областей, т.е. идет аморфизация структуры ПТФЭ. Это приводит к повышению деформационно-прочностных свойств ПТФЭ при введении активированного материала из того же полимера.

Далее с целью выбора режима планетарной мельницы для активации полимера проведены сравнительные исследования зависимостей деформационно-прочностных показателей ПТФЭ в двух разных планетарных мельницах при разных оборотах вращения барабанов: «Pulverisette 5» при 400 об/мин в течение 5 минут и в планетарной мельнице «АГО-2» при 3000 об/мин в течение 5 минут (табл. 2). Установлено, что скорость вращения барабанов при активации полимера не сказывается на значениях деформационно-прочностных показателей, однако зарегистрировано некоторое повышение значений модуля упругости при растяжении и сжатии у модифицированной матрицы, содержащей активированный ПТФЭ в планетарной мельнице «Pulverisette 5». Учитывая это, а также из-за низких энерго- и трудозатрат, для активации полимера выбрана планетарная мельница «Pulverisette 5».

Для выбора времени активации ПТФЭ проведены исследования деформационно-прочностных и триботехнических характеристик модифицированной полимерной матрицы (ПТФЭ+10 % акт. ПТФЭ) от времени активации при 400 об/мин на планетарной мельнице «Pulverisette 5» (табл. 3).

По критериям повышения значения прочности при растяжении, сжатии, модуля упругости и относительного удлинения при разрыве выбрано время активации полимера 5 мин. Как

Таблица 2. Зависимость физико-механических характеристик модифицированного ПТФЭ от вида планетарной мельницы

Table 2. Dependence of the physical and mechanical characteristics of modified PTFE on the type of planetary mill

Образец	$\sigma_p$ , МПа	$\varepsilon_p$ , %	E, МПа	$\sigma_{сж}$ при 25 %, МПа	$E_{сж}$ , МПа
(ПТФЭ+10 % акт. ПТФЭ) 5 мин в «АГО-2»	24–25	410–430	569	25	310
(ПТФЭ+10 % акт. ПТФЭ) 5 мин в планетарной мельнице «Pulverisette 5»	24–25	410–430	610	26	453

Таблица 3. Зависимость физико-механических и триботехнических характеристик модифицированной матрицы от времени активации

Table 3. Dependence of the physical, mechanical and tribological characteristics of the modified matrix on the activation time

Образец	$\sigma_p$ , МПа	$\epsilon_p$ , %	E, МПа	$\sigma_{сж}$ , МПа			Есж, МПа	I, мг/ч	f
				5 %	10 %	25 %			
ПТФЭ	20	310	470	10	14	25	320	161	0,20
(ПТФЭ+10 % акт. ПТФЭ) 5 мин	25	430	610	13	16	26	453	171	0,21
(ПТФЭ+10 % акт. ПТФЭ) 10 мин	23	398	631	13	17	26	416	155	0,21
(ПТФЭ+10 % акт. ПТФЭ) 15 мин	21	379	587	13	16	26	431	176	0,20
(ПТФЭ+10 % акт. ПТФЭ) 20 мин	22	397	398	13	16	25	428	137	0,20
(ПТФЭ+10 % акт. ПТФЭ) 30 мин	20	420	606	13	16	25	419	214	0,20

видно из таблицы, в целом активация некоторой части полимера положительно отражается на повышении деформационно-прочностных показателей и модуля упругости ПТФЭ.

Сопоставление ИК-спектров исходного и механоактивированного ПТФЭ (рис. 1) показало, что при таком внешнем механическом воздействии не происходит разрушения молекулярной цепи ПТФЭ. Зарегистрированы только характерные полосы для ПТФЭ: наиболее интенсивные полосы относятся к валентным колебаниям групп  $CF_2$  (1200 и 1145  $cm^{-1}$ ) и колебанию  $\nu(C-C)$ , проявляющемуся в виде перегиба при  $\sim 1233 cm^{-1}$ . В области ниже 650  $cm^{-1}$  (638  $cm^{-1}$ , 553  $cm^{-1}$ , 503  $cm^{-1}$ ) располагаются деформационные и внеплоскостные колебания групп  $CF_2$  [13].

Далее выбранную полимерную матрицу модифицировали углеродным наполнителем Сибунит. Выбор Сибунита в качестве наполнителя для апробирования полимерной матрицы обусловлен тем, что при его добавлении в ПТФЭ даже в малых количествах (0,5–1 мас.%) на-

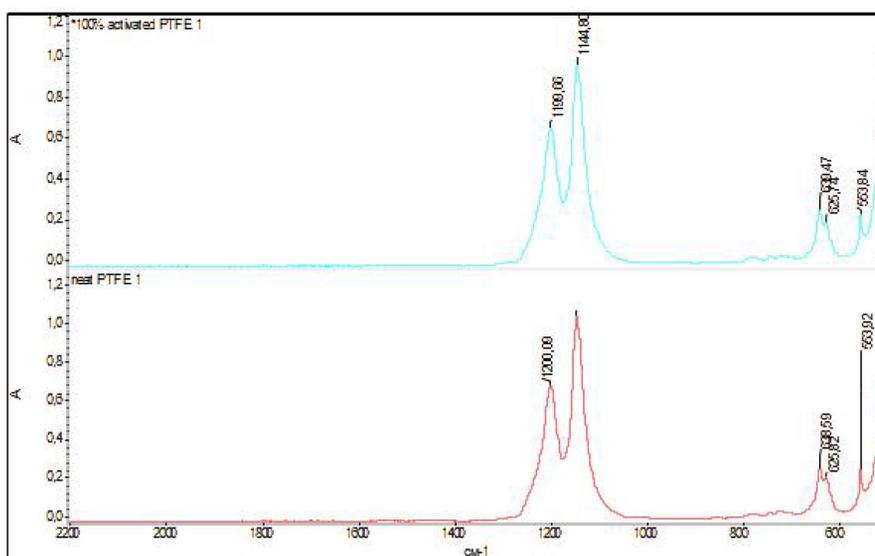


Рис. 1. Сопоставление ИК-спектров исходного ПТФЭ и механоактивированного ПТФЭ

Fig. 1. Comparison of the IR spectra of the original PTFE and mechanically activated PTFE

Таблица 4. Зависимость физико-механических характеристик ПКМ от концентрации Сибунита

Table 4. Dependence of the physical and mechanical characteristics of PCM on the concentration of Sibunit

Состав	$\sigma_p$ , МПа	$\epsilon_p$ , %	$E_p$ , МПа	$\sigma_{сж}$ при деформации 25 %, МПа	I, мг/ч	f
ПТФЭ+Сибунит 0,5 %	15	293	514	25	32	0,16
ПТФЭ+Сибунит 1 %	14,5	270	504	25	21	0,16
ПТФЭ+Сибунит 2 %	12	212	495	25	20	0,16

блюдается резкое снижение деформационно-прочностных показателей полимерных композиционных материалов (ПКМ) и не столь явное повышение износостойкости (табл. 4).

Это скорее связано с тем, что Сибунит является высокодисперсным углеродным материалом с размерами частиц 10–100 мкм и вследствие высокой удельной поверхности (240 м<sup>2</sup>/г) в процессе хранения подвергается агломерации, из-за чего характеризуется неравномерным распределением частиц по размерам. Введение агломерированных частиц Сибунита в объем полимера вызывает напряжение на границе раздела фаз полимер-наполнитель, что приводит к снижению деформационно-прочностных показателей ПКМ.

В связи с этим Сибунит также активировали в планетарной мельнице «Pulverisette-5» в течение 2 мин при скорости вращения барабанов 400 об/мин. Размеры частиц Сибунита до и после механоактивации измерили с помощью лазерного анализатора размера частиц «Analysette 22» (Fritsch) (рис. 2).

Из рис. 2 видно, порошок Сибунита до активации характеризуется широким распределением частиц по размерам от 0,3 до 300 мкм, а при активации происходит диспергирование, размеры крупных частицы уменьшаются до 6 раз, гранулометрический состав становится более однородным.

Показано, что добавление 0,5–2 мас.% активированного Сибунита в полимерную матрицу не приводит к снижению деформационно-прочностных показателей по сравнению с исходным ПТФЭ, износостойкость ПКМ при этом повышается в 6–56 раз (табл. 5). Это, видимо, связано с тем, что при активации частицы Сибунита диспергируются, а также модифици-

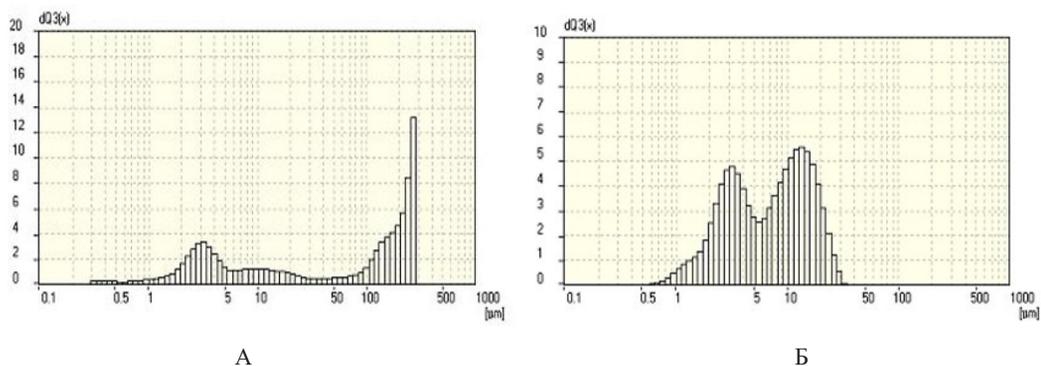


Рис. 2. Диаграмма распределения частиц Сибунита по размерам: А) до и Б) после активации

Fig. 2. Diagram of Sibunit particle size distribution: A) before and B) after activation

Таблица 5. Зависимость физико-механических и триботехнических характеристик ПКМ от концентрации Сибунита

Table 5. Dependence of the physical, mechanical and tribological characteristics of PCM on the concentration of Sibunit

Состав ПКМ	$\sigma_p$ , МПа	$\varepsilon_p$ , %	E, МПа	$\sigma_{сж}$ при деформации 25 %, МПа	$E_{сж}$ , МПа	I, мг/ч	$f$
ПТФЭ+0,5 мас.% акт. Сибунит	20	298	476	24	393	27,0	0,16
(ПТФЭ+10 мас.% акт. ПТФЭ)+ +0,5мас.% акт. Сибунит	21	366	502	23	385	22,0	0,16
(ПТФЭ+10 мас.% акт. ПТФЭ)+ +1мас.% акт. Сибунит	20	321	518	28	475	11,5	0,23
(ПТФЭ+10 мас.% акт. ПТФЭ)+ +2мас.% акт. Сибунит	21	310	496	27	506	2,9	0,21
(ПТФЭ+10 мас.% акт. ПТФЭ)+ +5мас.% акт. Сибунит	14	147	421	28	402	1,5	0,21

рованная матрица характеризуется улучшенными значениями деформационно-прочностных характеристик, что компенсирует негативное влияние наполнителя на эти показатели при наполнении содержания Сибунита до 2 мас.%. Повышение содержания активированного Сибунита до 5 мас.% приводит к снижению прочности при растяжении на 30 %, относительного удлинения при разрыве почти в 2 раза. Однако при этом необходимо отметить, что несмотря на снижение деформационно-прочностных показателей, характер разрушения композита нехрупкий, образцы вытягиваются по всей длине рабочей части лопатки вплоть до разрыва, как и исходный образец ПТФЭ, т.е. осуществляется режим пластической деформации при растяжении. Известно, что проявление такого режима при растяжении образцов приводит к повышению сопротивляемости материала к ударным и усталостным нагрузкам, что обеспечивает надежность и безопасность изделий из них [14]. При этом износостойкость композита повышается в 107 раз.

Снижение деформационно-прочностных показателей ПКМ при введении 5 мас.% активированного Сибунита, возможно, связано с частичной утратой сегментальной подвижности макромолекул полимера в результате их сорбции на поверхности Сибунита, который характеризуется высокой адсорбционной способностью. Это неизбежно приводит к уменьшению удлинения ПКМ при разрыве. Ограничение подвижности сегментов цепи может способствовать заметному возрастанию внутренних напряжений на поверхности раздела, что, в свою очередь, также может привести к снижению прочностных характеристик композиционного материала.

### Выводы

Установлено, что у полимерной смеси ПТФЭ с 10 мас.% активированного ПТФЭ в планетарной мельнице в течение 5 минут повышаются деформационно-прочностные показатели и модуль упругости. Показано, что добавление 0,5–2 мас.% активированного Сибунита в полимерную матрицу не приводит к снижению деформационно-прочностных показателей по сравнению с исходным ПТФЭ, износостойкость полимерных композиционных материалов ПКМ при этом повышается в 6–56 раз. Это, видимо, связано с тем, что при активации частицы

Сибунита диспергируются, а также модифицированная матрица характеризуется с улучшенными значениями деформационно-прочностных характеристик, что компенсирует негативное влияние наполнителя на эти показатели при наполнении содержания Сибунита до 2 мас.%. Увеличение концентрации до 5 мас.% Сибунита приводит к повышению износостойкости в 107 раз, но к снижению деформационно-прочностных показателей ПКМ.

Таким образом, на основании проведенных исследований показана перспективность использования полимерной смеси ПТФЭ-активированный ПТФЭ, содержащий до 10 мас.% активированного полимера в планетарной мельнице, для сохранения или повышения прочности и пластичности наполненных композитов на уровне исходного полимера, особенно в тех случаях, когда при добавлении наполнителя значительно снижаются деформационно-прочностные показатели композита.

### Список литературы / References

[1] Аммосова О.А. и др. *Модифицированные полимерные и композиционные материалы для северных условий*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 217. [Ammosova O. A. et al. *Modified polymeric and composite materials for northern conditions*. Novosibirsk. Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2017, 127 (in Rus.)]

[2] Охлопкова А.А., Стручкова Т.С., Алексеев А.Г., Васильев А.П. Разработка и исследование полимерных композиционных материалов на основе активации политетрафторэтилена и углеродных наполнителей, *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*, 2015, 4(48), 51–63 [Okhlopkova A. A., Struchkova T. S., Alekseev A. G., Vasiliev A. P. Development and research of polymer composite materials based on the activation of polytetrafluoroethylene and carbon fillers, *Vestnik of North-Eastern Federal University*, 2015, 4(48), 51–63 (in Rus.)]

[3] Panin S.V., Kornienko L.A., Alexenko V.O., Ivanova L.R., Shilko S.V. Influence of Nano- and Microfillers on the Mechanical and Tribotechnical Properties of “UHMWPE-PTFE” Composites, *Key Engineering Materials*, 2016, 712, 161–165.

[4] Berladir K., Sviderskiy V. Designing and examining polytetrafluoroethylene composites for tribotechnical purposes with activated ingredients, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, 6(6), 14–21.

[5] Будник О.А., Сви́дерский В.А., Берладир К.В., Будник А.Ф., Руденко П.В. Влияние механической активации политетрафторэтиленовой матрицы на ее физико-химические и эксплуатационные свойства, *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*, 2014, 5, 176–179 [Budnik O. A., Sviderskiy V. A., Berladir K. V., Budnik A. F., Rudenko P. V. Effect of mechanical activation of a polytetrafluoroethylene matrix on its physicochemical and operational properties, *Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2014, 5, 176–179 (in Rus.)]

[6] Hewitt, S.A., Kibble, K. A. Effects of ball milling time on the synthesis and consolidation of nanostructured WC–Co composites, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2009, 27, 937–948.

[7] Sharafi S., Gomari S. Effects of milling and subsequent consolidation treatment on the microstructural properties and hardness of the nanocrystalline chromium carbide powders, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2012, 30, 57–63.

[8] Lee J.S., Choi M.S., Hung N.V., Kim Y.S., Kim I.W., Park E.C. Effects of high energy ball-milling on the sintering behavior and piezoelectric properties of PZT based ceramics, *Ceramics International*, 2007, 33, 1283–1286.

[9] Болдырев В.В., Аввакумов Е.Г., Болдырева Е.В. и др. *Фундаментальные основы механической активации, механосинтеза и механохимических технологий*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 343. [Boldyrev V.V., Avvakumov E.G., Boldyreva E.V. etc. *Fundamental bases of mechanical activation, mechanochemical synthesis and mechanochemical technologies*. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2009, 343 (in Rus.)]

[10] Berladir K., Gusak O., Demianenko M., Zajac J., Ruban A. Functional properties of PTFE-Composites produced by mechanical activation, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2020, 391–401.

[11] Плаксин Г. В., Бакланова О. Н., Лавренев А. В., Лихолобов В. А. Углеродные материалы семейства Сибунит и некоторые методы регулирования их свойств, *Журнал физической химии*, 2011, 85, 9, 1645–1649 [Plaksin G. V., Baklanova O. N., Lavrenov A. V., Likholobov V. A. Carbon materials of the Sibunit family and some methods for controlling their properties, *Journal of Physical Chemistry*, 2011, 85, 9, 1645–1649 (in Rus.)]

[12] Малкин А. И., Киселев М.Р., Ключев В.А., Лознецова Н.Н., Гагина И.А., Топоров Ю.П. Влияние механоактивации на термостойкость порошкообразного политетрафторэтилена, *Журнал физической химии*, 2011, 85, 9, 1645–1649 [Malkin A.I., Kiselev M.R., Klyuev V.A., Loznetsova N.N., Gagina I.A., Toporov Yu. Effect of mechanical activation on the thermal stability of powdered polytetrafluoroethylene, *Journal of Physical Chemistry*, 2011, 85, 9, 1645–1649 (in Rus.)]

[13] Игнатьева Л. Н., Бузник В.М. ИК-спектроскопические исследования политетрафторэтилена и его модифицированных форм, *Российский химический журнал*, 2008, 3, 139–146 [Ignatieva L.N., Buznik V.M. IR spectroscopic studies of polytetrafluoroethylene and its modified forms, *Russian Journal of General Chemistry*, 2008, 3, 139–146 (in Rus.)]

[14] Гольдаде В.А., Пинчук Л.С. *Физика конденсированного состояния*. Минск: Беларус. Навука, 2009. 657 [Goldade V.A., Pinchuk L.S. *Condensed matter physics*. Minsk: Belorussian Navuka, 2009, 657 (in Rus.)]