



Самоармированные полимерные композиты на основе политетрафторэтилена

О.Ж. Аюрова^{*,**✉}, В.Н. Корнопольцев^{***}, Е.В. Ковтунец^{***},
М.А. Неводов^{*}, Э.Т. Павлова^{*}, Б.З. Гармаев^{**}

^{*}Бурятский государственный университет им. Д. Банзарова, Улан-Удэ, Российская Федерация

^{**}Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Российская Федерация

^{***}Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ, Российская Федерация

Аннотация. Перспективным направлением в области переработки полимерных материалов является разработка самоармированных полимерных композитов, представляющих относительно новую группу композиционных материалов. Метод самоармирования позволяет комбинировать материалы одного полимера с различными молекулярными, супрамолекулярными и структурными особенностями. При этом высокие адгезионные и механические свойства самоармированных композитов обуславливаются образованием гомогенной системы с отсутствием межфазной границы. Вместе с тем самоармирование рассматривает возможность использования полимерных отходов для создания высокопрочных композитов, что обеспечивает снижение экологической нагрузки. Целью проведенного исследования являлось изучение фазового состава и свойств самоармированных полимерных композитов на основе политетрафторэтилена. Самоармированные композиты готовили смешением порошков промышленного и переработанного политетрафторэтилена, а затем подвергали компрессионному формованию и свободному спеканию. Методом рентгенофазового анализа рассчитывали степень кристалличности полученных материалов (41–68%). Результаты динамического механического анализа показали, что при введении порошка регенерированного политетрафторэтилена в промышленный политетрафторэтилен модуль упругости значительно увеличивается (до 2,0–3,1 ГПа). Исследование деформационно-прочностных характеристик показало возможность использования до 30 масс.% переработанного политетрафторэтилена, полученного путем механического истирания, для создания композитов с хорошими эксплуатационными свойствами. Итоги работы также иллюстрируют факт того, что фазовое состояние материала зависит от способа переработки полимерных отходов и является определяющим для теплостойкости и механических свойств полученных самоармированных полимерных композитов.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, самоармированные композиты, структура, полимерные отходы, теплофизические свойства

Благодарности. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования Бурятского государственного университета им. Доржи Банзарова, Центра коллективного пользования Байкальского института природопользования СО РАН.

Финансирование. Исследование проведено в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Полимерные системы биомедицинского и конструкционного назначения» Бурятского государственного университета им. Доржи Банзарова, государственного задания Института физического материаловедения СО РАН (проект № 124041100130-3), государственного задания Байкальского института природопользования СО РАН (проекты № 0273-2021-0007 и 0273-2021-0008).

Для цитирования: Аюрова О.Ж., Корнопольцев В.Н., Ковтунец Е.В., Неводов М.А., Павлова Э.Т., Гармаев Б.З. Самоармированные полимерные композиты на основе политетрафторэтилена // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2025. Т. 15. N 1. С. 128–136. DOI: 10.21285/achb.960. EDN: PTTNHY.

Self-reinforced polymer composites based on polytetrafluoroethylene

Oksana Zh. Ayurova^{*,**✉}, Vasily N. Kornopoltsev^{***}, Evgeny V. Kovtunets^{***},
Mikhail A. Nevodov^{*}, Erzhen T. Pavlova^{*}, Bair Z. Garmaev^{**}

^{*}Banzarov Buryat State University, Ulan-Ude, Russian Federation

^{**}Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation

^{***}Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation

Abstract. The development of self-reinforced polymer composites, representing a relatively new group of composite materials, is a promising direction in the field of polymer chemistry. The method of self-reinforcement is used to combine the materials of a single polymer possessing different molecular, supramolecular, and structural features. The high adhesion and mechanical properties of such self-reinforced composites are achieved by the formation of a homogeneous system without an interfacial boundary. In addition, self-reinforcement offers the opportunity of using polymer waste for manufacturing high-strength composites, thus contributing to environmental load mitigation. In this work, we investigate the phase composition and properties of self-reinforced polymer composites based on polytetrafluoroethylene. Self-reinforced composites were prepared by mixing powders of industrial and recycled polytetrafluoroethylene followed by compression molding and pressureless sintering. The crystallinity degree of the as-obtained materials calculated by X-ray phase analysis equaled 41–68%. The performed dynamic mechanical analysis showed that the introduction of a powder of regenerated polytetrafluoroethylene into industrial polytetrafluoroethylene increases the elastic modulus of the obtained materials significantly (up to 2.0–3.1 GPa). The study of deformation and strength characteristics confirmed the feasibility of using up to 30 wt% of recycled polytetrafluoroethylene, obtained by mechanical abrasion, for manufacturing composites with good performance properties. The findings also indicate that the phase composition of the material depends on the method of polymer waste processing, determining the heat resistance and mechanical properties of the obtained self-reinforced polymer composites.

Keywords: polytetrafluoroethylene, self-reinforced composites, structure, polymer waste, thermophysical properties

Acknowledgments. The equipment of the Center for Collective Use of the Banzarov Buryat State University and the Center for Collective Use of the Baikal Institute of Nature Management SB RAS was used for this work.

Funding. The work was carried out within the framework of the research work “Polymer systems for biomedical and structural purposes” of the Banzarov Buryat State University, state assignment of the Institute of Physical Materials Science SB RAS (project no. 124041100130-3), state assignment of the Baikal Institute of Nature Management SB RAS (projects no. 0273-2021-0007 and 0273-2021-0008).

For citation: Ayurova O.Zh., Kornopoltsev V.N., Kovtunets E.V., Nevodov M.A., Pavlova E.T., Garmaev B.Z. Self-reinforced polymer composites based on polytetrafluoroethylene. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2025;15(1):128-136. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.960. EDN: PTTHNY.

ВВЕДЕНИЕ

Использование вторичного сырья в качестве новой ресурсной базы – одно из наиболее динамично развивающихся направлений переработки полимерных материалов в мире [1, 2]. Самоармирование является одним из перспективных методов переработки материалов, позволяющим изготавливать высокопрочные термопластичные полимерные композиты [3, 4]. Самоармированные полимерные композиты имеют множество преимуществ, включая термоформуемость, высокую прочность и жесткость, отличную ударпрочность при низкой плотности, высокую биоразлагаемость [3, 5, 6]. Отличительной особенностью этого типа композитов является возможность их полной переработки, поскольку самоармированный полимерный композит изготавливается из одного полимерного материала, который

служит одновременно и матрицей, и армирующим элементом, что позволяет повторно переработать использованные изделия из самоармированных композитов без необходимости разделения, как в других видах композиционных материалов [7–9]. Благодаря относительной однородности в этой однокомпонентной системе достигается идеальное взаимодействие между матрицей и армирующим компонентом (это невозможно в гетерогенных композитах), что обеспечивает лучшую адгезию и облегчает передачу напряжения между матрицей и наполнителем [3]. Для получения самоармированных полимерных композитов могут быть использованы разные кристаллические формы аморфно-кристаллических полимеров (полиморфизм), разные супрамолекулярные структуры или разные сорта одного полимера. Например, монополимерный композит

может содержать более жесткую фазу в качестве армирующего элемента и менее жесткую фазу в качестве матрицы. Продукты переработки полимерных отходов также можно рассматривать в производстве самоармированных полимерных композитов в зависимости от требуемых свойств композита [3, 10].

Целью проведенного исследования являлась оценка возможности использования продуктов переработки отходов политетрафторэтилена для создания самоармированных композитов, а также изучение свойств полученных материалов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве матрицы использовали промышленный политетрафторэтилен (ПТФЭ_{пром.}) производства ООО ТД «Кирово-Чепецкая химическая компания»¹. В качестве армирующего компонента – порошок переработанного политетрафторэтилена (ПТФЭ_{изм.}, Томфлон), полученный разными методами переработки отходов полимера. ПТФЭ_{изм.} представляет собой порошок политетрафторэтилена, полученный переработкой отходов полимера путем механического истирания на обдирочном корундовом круге (линейная скорость скольжения 27 м/с при нагрузке 1 МПа на спроектированной и изготовленной установке) [11]. Томфлон, в свою очередь, это ультрадисперсный политетрафторэтилен торговой марки ТОМФЛОНTM, представляющий рыхлый рассыпчатый порошок белого цвета с размером частиц ~5 мкм² производства ООО «Фторполимерные технологии» (г. Томск, Россия), который получают комбинационным методом переработки отходов политетрафторэтилена, сочетаящим радиационную и механическую обработку [12].

Самоармированные полимерные композиты готовили путем смешения порошков промышленного и переработанного политетрафторэтилена (ПТФЭ_{изм.}, Томфлон) на высокоскоростной лопастной мельнице при скорости 2800 об/мин. Содержание переработанного политетрафторэтилена в полимерном композите составляло 5, 10, 20, 30 масс.%. Полимерную смесь формовали методом холодного прессования (27 °С, 50 МПа) с последующим свободным спеканием при 370±5 °С в печи

в воздушной атмосфере (скорость нагрева 100 °С/ч, выдержка 0,5 ч на 1 мм толщины образца, охлаждение в закрытой печи).

Размеры частиц переработанного политетрафторэтилена (ПТФЭ_{изм.}) определяли на наносайзере SALD-7500nano (Shimadzu, Япония), а также методом растровой электронной микроскопии на микроскопе высокого разрешения JEOL JSM-6000.

Рентгенофазовый анализ образцов проводили на порошковых дифрактометрах D2 PHASER (Bruker, Германия) и TDM-20 (Tongda, Китай) в интервале $2\theta = 4-70^\circ$ с шагом сканирования $0,02^\circ$ (CuK α -излучение, комнатная температура). Обработку экспериментальных данных методами полнопрофильного анализа и расчет степени кристалличности выполняли с использованием программного комплекса TOPAS 4.2 [12].

Теплофизические свойства (модуль накопления E', модуль потерь E'', тангенс угла механических потерь tg δ) образцов определяли на динамическом механическом анализаторе DMA 242 C (Netzsch, Германия) в температурном интервале 25–500 °С при скорости нагрева 5 К·мин⁻¹ в режиме пенетрации, диаметр проникающего конца пуансона составлял 3 мм.

Определение прочности и свойств деформации материала вплоть до его разрушения проводили по ГОСТ 11262-80³ на испытательной машине Instron 3367 (Instron, США) при скорости движения траверсов 200 мм/мин. Для испытаний использовали образцы в виде лопатки (тип 2).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 1 представлено микроизображение измельченного порошка отходов политетрафторэтилена. Размеры частиц порошка ПТФЭ_{изм.}, получаемого механическим истиранием, имеют большой разброс и находятся в диапазоне 0,5–250 мкм. Согласно диаграмме (см. рис. 1, b), средний размер частиц составляет 17 мкм.

Рентгенографическим методом определена степень кристалличности полученных самоармированных полимерных композитов. Результаты профильного анализа исследованных образцов представлены в таблице.

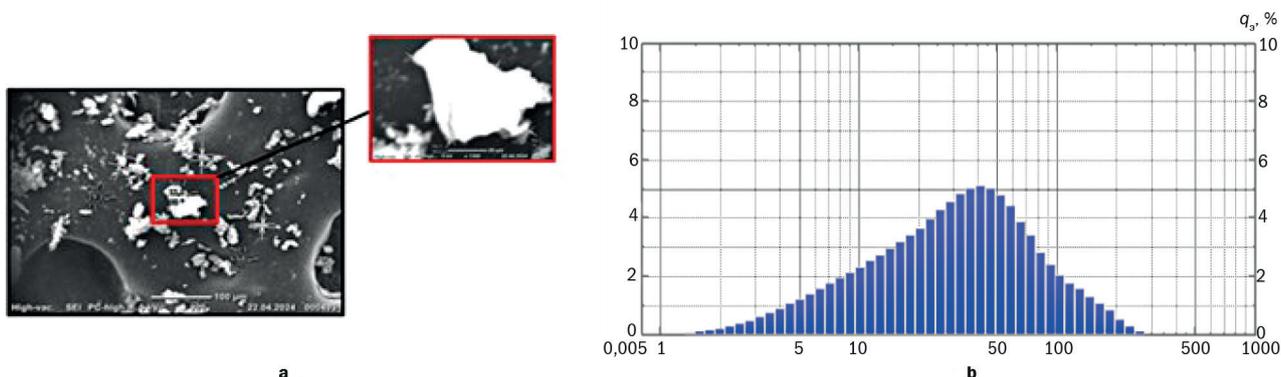


Рис. 1. Микроизображение (а) и диаграмма (b) измельченного порошка отходов политетрафторэтилена

Fig. 1. Microimage (a) and diagram (b) of the ground polytetrafluoroethylene waste powder

¹ ГОСТ 10007-80. Фторопласт-4. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2008. 16 с.

² ТУ 2213-001-12435252-03. Порошок РТФЕ Томфлон.

³ ГОСТ 11262-80 (СТ СЭВ 1199-80). Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М.: Издательство стандартов, 1986. 16 с.

Фазовый состав полученных полимерных материалов

Phase composition of the obtained polymer materials

Образец	Фазовая область	Площадь
ПТФЭ _{пром.} /ПТФЭ _{изм.} (80/20 масс.%)	Аморфная область I (17,55° 2θ)	6148,2595
	Аморфная область II (38,62° 2θ)	11151,8073
	Кристаллическая область	4410,188
Степень кристалличности = 41,8%		
ПТФЭ _{пром.} /Томфлон (80/20 масс.%)	Аморфная область I (18,04° 2θ)	8256,87617
	Аморфная область II (38,76° 2θ)	15611,7727
	Кристаллическая область	8788,76292
Степень кристалличности = 57,7%		
ПТФЭ _{пром.} /ПТФЭ _{изм.} (70/30 масс.%)	Аморфная область I (16,27° 2θ)	1601,54357
	Аморфная область II (37,48° 2θ)	9018,54478
	Кристаллическая область	2185,21767
Степень кристалличности = 51,7%		
ПТФЭ _{пром.} /Томфлон (70/30 масс.%)	Аморфная область I (9,8° 2θ)	2215,12779
	Аморфная область II (37,13° 2θ)	7116,64923
	Кристаллическая область	4841,37617
Степень кристалличности = 68,6%		

Примечание. Степень кристалличности рассчитывали как отношение доли кристаллической области к долям кристаллической и аморфной области I.

На основании полученных данных были рассчитаны количественные соотношения кристаллической и аморфных областей самоармированных полимерных композитов составов ПТФЭ_{пром.}/ПТФЭ_{изм.} и ПТФЭ_{пром.}/Томфлон, а также степени кристалличности в зависимости от технологии переработки (см. таблицу). Во многих исследованиях сообщается об изменении степени кристалличности полимеров в зависимости от способов переработки [13–15]. Тем не менее данные о кристалличности полимерных смесей с использованием переработанных полимеров отсутствуют.

Исследование теплофизических свойств полученных самоармированных полимерных композитов позволит определить температурные условия переработки полимерных материалов в готовые изделия, а также температурные режимы эксплуатации изделий.

На рис. 2 представлен вязкоупругий отклик полученных самоармированных полимерных композитов на механическое воздействие при постоянной частоте в интервале температур 25–500 °С. Показано, что значительные динамические потери наблюдаются в интервалах температур фазовых (~25–40 и ~325–327 °С) и релаксационного (~150 °С) переходов (см. рис. 2). В интервале ~25–40 °С наблюдается β-релаксация, связанная с твердофазными превращениями I и II рода, происходящими в кристаллической области полимера. Твердофазный переход I рода при 25–30 °С вызван изменениями параметров элементарной ячейки кристаллита. Твердофазный переход II рода при ~40 °С связан с потерей спиральной хиральности длинноцепочечной молекулы кристалла политетрафторэтилена, то есть элемента симметрии кристалла [16, 17]. В работе [18] сообщается, что при атмосферном давлении и температуре в пределах нескольких десятков градусов Цельсия политетрафторэтилен находится в трех твердофазных состояниях (II, IV и I). В фазе II при температуре ниже 19 °С полимер имеет хорошо упорядоченную триклинную элементарную ячейку. Макромолекулы имеют спиральную конформацию 13/6 (единиц на виток). При 19 °С происходит

переход «порядок – беспорядок», представляющий собой переориентацию (вращение) макромолекул вокруг их осей. Молекулы слегка раскручиваются и принимают конформацию 15/7. Эта промежуточная фаза (IV) имеет метрически-гексагональную элементарную ячейку и сохраняется до 30 °С. При температуре выше 30 °С происходит дальнейшее вращательное разупорядочение и раскручивание спиралей (по мере увеличения температуры). В этой фазе I спиральная конформация 15/7 постепенно уступает место усредненной конформации 2/1 (плоский зигзаг). На рис. 2, с видно, что интенсивность пиков β-релаксации полимерных композитов увеличивается с повышением кристалличности. Подобные результаты показаны в работе [16].

Для полученных самоармированных композитов с повышением степени кристалличности наблюдается увеличение модуля упругости E' в 2–4 раза по сравнению с промышленным политетрафторэтиленом (см. рис. 2, а). Возможно, это объясняется тем, что образуются кристаллиты с новой морфологией [17]. В исследовании [19] авторами показано, что модуль упругости увеличивается с концентрацией кристаллитов и чем меньше размер кристаллитов, тем большим модулем упругости обладает полимер. Наибольшая жесткость (E'), наблюдаемая в интервале 25–34 °С, сопровождается плохой способностью материалов рассеивать энергию (E'') (см. рис. 2, b). На зависимости для модуля упругости с повышением температуры наблюдается постепенное снижение жесткости, связанное с переходом материала из стеклообразного состояния в высокоэластичное. В области ~150 °С полученные полимерные композиты характеризуются одним α-релаксационным переходом, связанным со стеклованием аморфной области полученного композита, что аналогично поведению гомогенных однородных полимеров (см. рис. 2, с) [20, 21]. В то же время с увеличением степени кристалличности полимерных композитов α-переход расширяется, становится асимметричным (см. рис. 2, с), а интенсивность пика уменьшается. Это свидетельствует о том, что в компо-

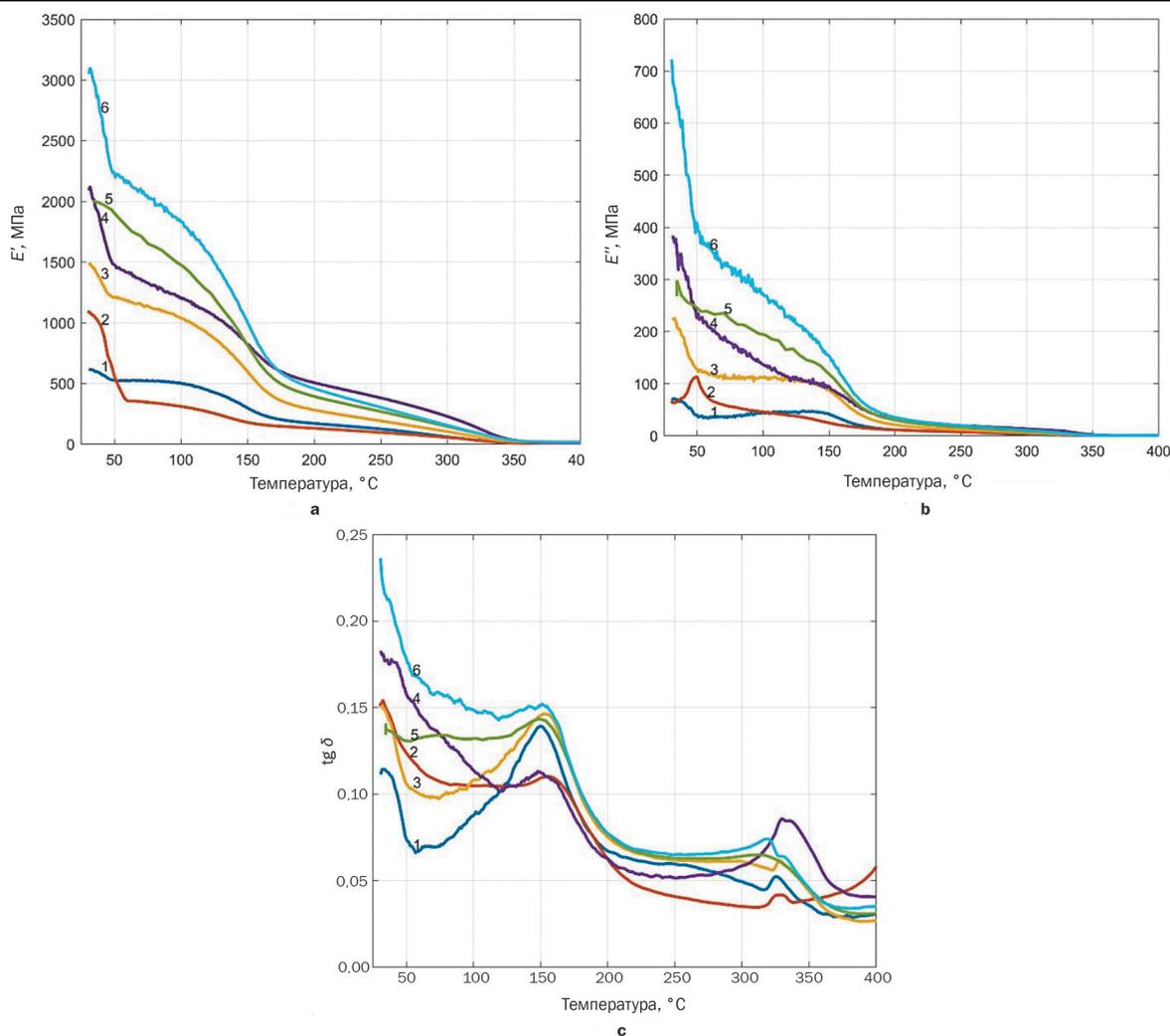


Рис. 2. Теплофизические свойства: а – модуль упругости; б – модуль потерь; с – тангенс угла механических потерь (1–3 – фторполимеры: 1 – ПТФЭ_{пром.}, 2 – ПТФЭ_{изм.}, 3 – Томфлон; 4–6 – самоармированные полимерные композиты различного состава: 4 – ПТФЭ_{пром.}/Томфлон (80/20 масс.%), 5 – ПТФЭ_{пром.}/ПТФЭ_{изм.} (80/20 масс.%), 6 – ПТФЭ_{пром.}/Томфлон (70/30 масс.%))

Fig. 2. Thermophysical properties: a – elastic modulus; b – loss modulus; c – mechanical loss tangent (1–3 – fluoropolymers: 1 – PTFE_{man}, 2 – PTFE_{gr}, 3 – Tomflon; 4–6 – self-reinforced polymer composites of the composition: 4 – PTFE_{man}/Tomflon (80/20 wt.%), 5 – PTFE_{man}/PTFE_{gr} (80/20 wt.%), 6 – PTFE_{man}/Tomflon (70/30 wt.%))

зитах происходит частичное упорядочение аморфной фазы [21]. Существенное изменение свойств самоармированных полимерных композитов наблюдается в области температуры плавления 325–327 °С. Оно связано с тем, что кристаллическая фаза материала исчезает и упругость образца резко уменьшается (см. рис. 2).

Рассмотрено влияние армирования промышленного политетрафторэтилена переработанным полимером на механические свойства. Установлено, что прочность при разрыве δ_p и относительное удлинение при разрыве ϵ_p полученных самоармированных композитов для всего диапазона составов отличаются от соответствующих величин промышленного политетрафторэтилена (рис. 3), уменьшаясь с увеличением содержания регенерированного полимера. Так, при наполнении 5 масс.% для самоармированного полимерного композита состава ПТФЭ_{пром.}/ПТФЭ_{изм.} механические свойства находятся на уровне свойств промышленного политетрафторэтилена

($\sigma_p = 23,5$ МПа; $\epsilon_p = 418\%$), тогда как при использовании порошка Томфлон уже при малом наполнении происходит резкое снижение деформационно-прочностных свойств. При наполнении порошком ПТФЭ_{изм.} наблюдается ухудшение механических свойств в меньшей степени, нежели при применении порошка Томфлон, что связано с технологией переработки полимерных отходов. При переработке отходов политетрафторэтилена простым истиранием возможна частичная механодеструкция полимера, что сопровождается незначительным уменьшением молекулярной массы. При радиационном способе получения порошка Томфлон, деструкция полимера происходит в результате разрыва макромолекул под действием потока электронов или γ -квантов, что приводит к уменьшению молекулярной массы примерно в 10–30 раз и, как следствие, к снижению физико-механических свойств [12].

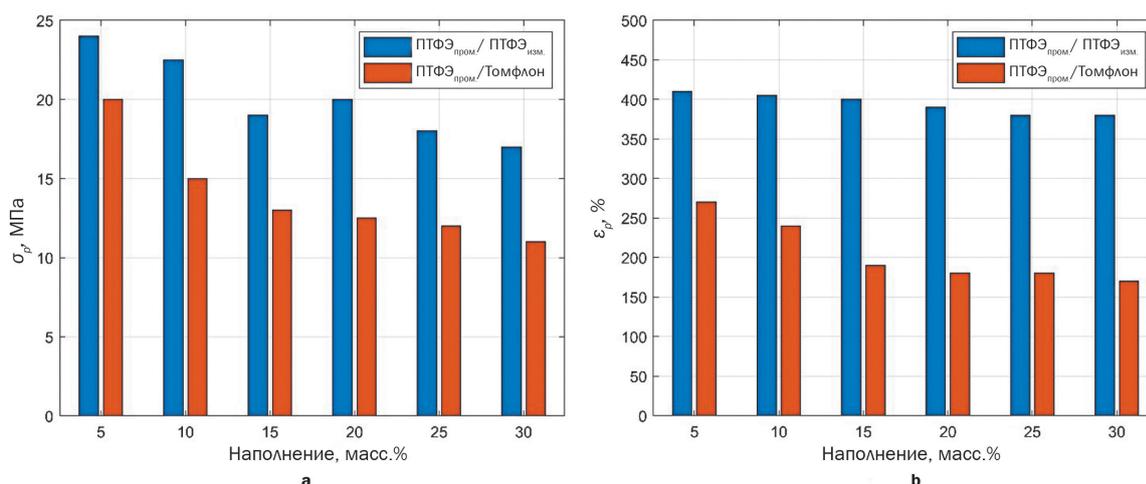


Рис. 3. Прочность при разрыве (а) и относительное удлинение при разрыве (б) самоармированных полимерных композитов
Fig. 3. Tensile strength (a) and relative elongation at break (b) of self-reinforced polymer composites

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования получены самоармированные полимерные композиты на основе политетрафторэтилена и продуктов переработки его отходов. Сравнительное исследование композитов показало, что теплофизические и механические свойства зависят от способа переработки и содержания армирующего наполнителя. С повышением степени кристалличности наблюдается увеличение модуля упругости материалов в 2–4 раза, вероятно, обусловленное образованием мелких кристаллитов.

Результаты деформационно-прочностных характеристик показали возможность использования переработанного политетрафторэтилена, полученного путем механического истирания, в диапазоне наполнения от 5 до 30 масс.% для создания композитов с хорошими эксплуатационными свойствами ($\sigma_p = 17\text{--}24$ МПа; $\epsilon_p = 370\text{--}410\%$). Деформационно-прочностные свойства порошком политетрафторэтилена, армированного промышленного Томфлон, уменьшаются практически в 2 раза, что связано с низкой молекулярной массой переработанного полимера.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Keskiisaari A., Butylina S., Kärki T. Use of construction and demolition wastes as mineral fillers in hybrid wood-polymer composites // *Journal of Applied Polymer Science*. 2016. Vol. 133, no. 19. DOI: 10.1002/app.43412.
2. Singh M.K., Mohanty A.K., Misra M. Upcycling of waste polyolefins in natural fiber and sustainable filler-based biocomposites: a study on recent developments and future perspectives // *Composites Part B: Engineering*. 2023. Vol. 263. P. 110852. DOI: 10.1016/j.compositesb.2023.110852.
3. Babu K., Mensah R.A., Shanmugam V., Rashedi A., Athimoolam P., Aseer J.R., et al. Self-reinforced polymer composites: an opportunity to recycle plastic wastes and their future trends // *Journal of Applied Polymer Science*. 2022. Vol. 139, no. 46. P. e53143 DOI: 10.1002/app.53143.
4. Kmetty Á., Bárány T., Karger-Kocsis J. Self-reinforced polymeric materials: a review // *Progress in Polymer Science*. 2010. Vol. 35, no. 10. P. 1288–1310. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2010.07.002.
5. Swolfs Y., Zhang Q., Baets J., Verpoest I. The influence of process parameters on the properties of hot compacted self-reinforced polypropylene composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014. Vol. 65. P. 38–46. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.05.022.
6. Ku H., Wang H., Pattarachaiyakooop N., Trada M. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites // *Composites Part B: Engineering*. 2011. Vol. 42, no. 4. P. 856–873. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.01.010.
7. Andrzejewski J., Przyszczykowski P., Szostak M. Development and characterization of poly(ethylene terephthalate) based injection molded self-reinforced composites. Direct reinforcement by overmolding the composite inserts // *Materials & Design*. 2018. Vol. 153. P. 273–286. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.04.084.
8. Zhao Z.H., Chen J.N. Preparation of single-polytetrafluoroethylene composites by the processes of compression molding and free sintering // *Composites Part B: Engineering*. 2011. Vol. 42, no. 5. P. 1306–1310. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.01.005.
9. Törmälä P. Biodegradable self-reinforced composite materials; manufacturing structure and mechanical properties // *Clinical Materials*. 1992. Vol. 10, no. 1-2. P. 29–34. DOI: 10.1016/0267-6605(92)90081-4.
10. Zhang M., Tian X., Cao H., Liu T., Zia A.A., Li D. 3D printing of fully recyclable continuous fiber self-reinforced composites utilizing supercooled polymer melts // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2023. Vol. 169. P. 107513. DOI: 10.1016/j.compositesa.2023.107513.
11. Корнопольцев В.Н., Аюрова О.Ж., Дашицыренова М.С., Ильина О.В., Могнонов Д.М. Получение, исследование и применение композитов на основе фторполимерных отходов // *Журнал прикладной химии*. 2021. Т. 94. N 7. С. 818–823. DOI: 10.31857/S004446182107001X. EDN: OQUWJS.
12. Ayurova O., Kornopol'tsev V., Khagleev A., Kurbatov R., Mishigdorzhyn U., Dyakonov A., et al. Wear-resistant elasto-

meric composites based on unvulcanized rubber compound and recycled polytetrafluoroethylene // *Lubricants*. 2024. Vol. 12, no. 2. P. 29. DOI: 10.3390/lubricants12020029.

13. Лебедев Ю.А., Королев Ю.М., Ребров А.В., Игнатъева Л.Н., Антипов Е.М. Рентгеновское исследование кристаллической фазы в образцах политетрафторэтилена // *Кристаллография*. 2010. Т. 55. N 4. С. 657–662. EDN: MSQJUT.

14. Yassien K.M., El-Zahhar A.A. Investigation on the properties of gamma irradiated of polytetrafluoroethylene fibers // *Microscopy: Research & Technique*. 2019. Vol. 82, no. 12. P. 2054–2060. DOI: 10.1002/jemt.23377.

15. Lunkwitz K., Lappan U., Scheler U. Modification of perfluorinated polymers by high-energy irradiation // *Journal of Fluorine Chemistry*. 2004. Vol. 125, no. 6. P. 863–873. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2004.01.020.

16. Brown E.N., Rae P.J., Orler E.B., Gray G.T., Dattelbaum D.M. The effect of crystallinity on the fracture of polytetrafluoroethylene (PTFE) // *Materials Science and Engineering: C*. 2006. Vol. 26, no. 8. P. 1338–1343. DOI: 10.1016/j.msec.2005.08.009.

17. Henri V., Dantras E., Lacabanne C., Dieudonne A., Koliatene F. Thermal ageing of PTFE in the melted state: Influence

of interdiffusion on the physicochemical structure // *Polymer Degradation and Stability*. 2020. Vol. 171. P. 109053. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.109053.

18. Holt D.B., Farmer B.L. Modeling of helix reversal defects in polytetrafluoroethylene: II. Molecular dynamics simulations // *Polymer*. 1999. Vol. 40, no. 16. P. 4673–4684. DOI: 10.1016/S0032-3861(99)00076-2.

19. Аскадский А.А., Мацевич Т.А. Влияние степени кристалличности на модуль упругости в высокоэластическом состоянии полимеров // *Пластические массы*. 2022. N 3-4. С. 11–15. DOI: 10.35164/0554-2901-2022-3-4-11-15. EDN: NJJZWP.

20. Blumm J., Lindemann A., Meyer M., Strasser C. Characterization of PTFE using advanced thermal analysis techniques // *International Journal of Thermophysics*. 2010. Vol. 31. P. 1919–1927. DOI: 10.1007/s10765-008-0512-z.

21. Аюрова О.Ж., Кожевникова Н.М., Корнопольцев В.Н., Могнонов Д.М. Теплофизические свойства полимерного композита политетрафторэтилен/CaF₂-оксифторидное стекло // *Журнал прикладной химии*. 2022. Т. 95. N 3. С. 337–343. DOI: 10.31857/S0044461822030057. EDN: DEWDAL.

REFERENCES

1. Keskiisaari A., Butylina S., Kärki T. Use of construction and demolition wastes as mineral fillers in hybrid wood-polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2016;133(19). DOI: 10.1002/app.43412.

2. Singh M.K., Mohanty A.K., Misra M. Upcycling of waste polyolefins in natural fiber and sustainable filler-based biocomposites: a study on recent developments and future perspectives. *Composites Part B: Engineering*. 2023;263:110852. DOI: 10.1016/j.compositesb.2023.110852.

3. Babu K., Mensah R.A., Shanmugam V., Rashedi A., Athimoolam P., Aseer J.R., et al. Self-reinforced polymer composites: an opportunity to recycle plastic wastes and their future trends. *Journal of Applied Polymer Science*. 2022;139(46):e53143 DOI: 10.1002/app.53143.

4. Kmetty Á., Bárány T., Karger-Kocsis J. Self-reinforced polymeric materials: a review. *Progress in Polymer Science*. 2010;35(10):1288-1310. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2010.07.002.

5. Swolfs Y., Zhang Q., Baets J., Verpoest I. The influence of process parameters on the properties of hot compacted self-reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014;65:38-46. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.05.022.

6. Ku H., Wang H., Pattarachaiyakoo P., Trada M. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*. 2011;42(4):856-873. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.01.010.

7. Andrzejewski J., Przyszczykowski P., Szostak M. Development and characterization of poly(ethylene terephthalate) based injection molded self-reinforced composites. Direct reinforcement by overmolding the composite inserts. *Materials & Design*. 2018;153:273-286. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.04.084.

8. Zhao Z.H., Chen J.N. Preparation of single-polytetrafluoroethylene composites by the processes of compression molding and free sintering. *Composites*

Part B: Engineering. 2011;42(5):1306-1310. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.01.005.

9. Törmälä P. Biodegradable self-reinforced composite materials; manufacturing structure and mechanical properties. *Clinical Materials*. 1992;10(1-2):29-34. DOI: 10.1016/0267-6605(92)90081-4.

10. Zhang M., Tian X., Cao H., Liu T., Zia A.A., Li D. 3D printing of fully recyclable continuous fiber self-reinforced composites utilizing supercooled polymer melts. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2023;169:107513. DOI: 10.1016/j.compositesa.2023.107513.

11. Kornopol'tsev V.N., Ayurova O.Z., Dashitsyrenova M.S., Il'ina O.V., Mognonov D.M. Preparation, study, and use of composites based on fluoropolymer waste. *Zhurnal prikladnoi khimii*. 2021;94(7):873-878. (In Russian). DOI: 10.31857/S004446182107001X. EDN: OQUWJS.

12. Ayurova O., Kornopol'tsev V., Khagleev A., Kurbatov R., Mishigdorzhyn U., Dyakonov A., et al. Wear-resistant elastomeric composites based on unvulcanized rubber compound and recycled polytetrafluoroethylene. *Lubricants*. 2024;12(2):29. DOI: 10.3390/lubricants12020029.

13. Lebedev Yu.A., Korolev Yu.M., Rebrov A.V., Ignat'eva L.N., Antipov E.M. X-ray study of the crystalline phase in polytetrafluoroethylene samples. *Kristallografiya*. 2010;55(4):657-662. (In Russian). EDN: MSQJUT.

14. Yassien K.M., El-Zahhar A.A. Investigation on the properties of gamma irradiated of polytetrafluoroethylene fibers. *Microscopy: Research & Technique*. 2019;82(12):2054-2060. DOI: 10.1002/jemt.23377.

15. Lunkwitz K., Lappan U., Scheler U. Modification of perfluorinated polymers by high-energy irradiation. *Journal of Fluorine Chemistry*. 2004;125(6):863-873. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2004.01.020.

16. Brown E.N., Rae P.J., Orler E.B., Gray G.T., Dattelbaum D.M. The effect of crystallinity on the fracture of polytetrafluoroethylene (PTFE). *Materials Science and Engineering: C*. 2006;26(8):1338-1343. DOI: 10.1016/j.msec.2005.08.009.

17. Henri V., Dantras E., Lacabanne C., Dieudonne A., Koliatene F. Thermal ageing of PTFE in the melted state: Influence of interdiffusion on the physicochemical structure. *Polymer Degradation and Stability*. 2020;171:109053. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.109053.

18. Holt D.B., Farmer B.L. Modeling of helix reversal defects in polytetrafluoroethylene: II. Molecular dynamics simulations. *Polymer*. 1999;40(16):4673-4684. DOI: 10.1016/S0032-3861(99)00076-2.

19. Askadskii A.A., Matseevich T.A. Influence of the degree of crystallinity on the elastic modulus in rubbery state of polymers. *Plasticheskie massy*. 2022;3-4:11-15.

(In Russian). DOI: 10.35164/0554-2901-2022-3-4-11-15. EDN: NJJZWP.

20. Blumm J., Lindemann A., Meyer M., Strasser C. Characterization of PTFE using advanced thermal analysis techniques. *International Journal of Thermophysics*. 2010;31:1919-1927. DOI: 10.1007/s10765-008-0512-z.

21. Ayurova O.Zh., Kozhevnikova N.M., Kornopol'tsev V.N., Mogonov D.M. Thermophysical properties of the polymer composite polytetrafluoroethylene/CaF₂-oxyfluoride glass. *Zhurnal prikladnoi khimii*. 2022;95(3):337-343. DOI: 10.31857/S0044461822030057. EDN: DEWDAL.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аюрова Оксана Жимбеевна,

к.т.н.,
доцент,
Бурятский государственный
университет им. Д. Банзарова,
670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а,
Российская Федерация,
старший научный сотрудник,
Институт физического
материаловедения СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6,
Российская Федерация,
✉ chem88@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4772-9133>

Корнопольцев Василий Николаевич,

к.т.н., научный сотрудник,
Байкальский институт
природопользования СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6,
Российская Федерация,
kompo@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-1970-2945>

Ковтунец Евгений Викторович,

научный сотрудник,
Байкальский институт
природопользования СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6,
Российская Федерация,
kovtunets@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-1301-1983>

Невовод Михаил Александрович,

магистрант,
Бурятский государственный
университет им. Д. Банзарова,
670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а,
Российская Федерация,
misha.nevodov@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-4318-5423>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oksana Zh. Ayurova,

Cand. Sci. (Engineering),
Associate Professor,
Banzarov Buryat State University,
24a, Smolin St., Ulan-Ude, 670000,
Russian Federation;
Senior Researcher,
Institute of Physical Materials
Science SB RAS,
6, Sakh'yanova St., Ulan-Ude, 670047,
Russian Federation,
✉ chem88@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4772-9133>

Vasily N. Kornopol'tsev,

Cand. Sci. (Engineering), Researcher,
Baikal Institute of Nature
Management SB RAS,
6, Sakh'yanova St., Ulan-Ude, 670047,
Russian Federation,
kompo@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-1970-2945>

Evgeny V. Kovtunets,

Researcher,
Baikal Institute of Nature
Management SB RAS,
6, Sakh'yanova St., Ulan-Ude, 670047,
Russian Federation,
kovtunets@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-1301-1983>

Mikhail A. Nevodov,

Master's Student,
Banzarov Buryat State University,
24a, Smolin St., Ulan-Ude, 670000,
Russian Federation,
misha.nevodov@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-4318-5423>

Павлова Эржена Тугденовна,
к.х.н., доцент, заведующий кафедрой,
Бурятский государственный
университет им. Д. Банзарова,
670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а,
Российская Федерация,
erzhen@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7468-4391>

Гармаев Баир Заятуевич,
к.ф.-м.н., заведующий лабораторией,
Институт физического
материаловедения СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6,
Российская Федерация,
bair.garmaev@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6086-3658>

Вклад авторов

О.Ж. Аюрова – разработка концепции,
проведение исследования, написание
рукописи – рецензирование и редактирование.
В.Н. Корнопольцев – проведение исследования.
Е.В. Ковтунец – программное обеспечение.
М.А. Неводов – проведение исследования.
Э.Т. Павлова – проведение исследования.
Б.З. Гармаев – формальный анализ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.*

Информация о статье

*Поступила в редакцию 02.10.2024.
Одобрена после рецензирования 01.11.2024.
Принята к публикации 28.02.2025.*

Erzhena T. Pavlova,
Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,
Head of the Department,
Banzarov Buryat State University,
24a, Smolin St., Ulan-Ude, 670000,
Russian Federation,
erzhen@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7468-4391>

Bair Z. Garmaev,
Cand. Sci. (Physics and Mathematics),
Head of the Laboratory,
Institute of Physical Materials
Science SB RAS,
6, Sakh'yanova St., Ulan-Ude, 670047,
Russian Federation,
bair.garmaev@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6086-3658>

Contribution of the authors

Oksana Zh. Ayurova – conceptualization,
investigation, writing – review & editing.
Vasily N. Kornopoltsev – investigation.
Evgeny V. Kovtunets – software.
Mikhail A. Nevodov – investigation.
Erzhena T. Pavlova – investigation.
Bair Z. Garmaev – formal analysis.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.*

Information about the article

*The article was submitted 02.10.2024.
Approved after reviewing 01.11.2024.
Accepted for publication 28.02.2025.*