

## Разработка высокопрочных полимерных материалов на основе политетрафторэтилена

М.А. Маркова\*, П.Н. Петрова, А.Л. Федоров, С.Н. Попов

*Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия*

*\*markovamusya@mail.ru*

**Аннотация.** Представлены результаты исследований физико-механических показателей полимерных материалов на основе политетрафторэтилена и его композитов с углеродными волокнами марки УВИС-АК-П, технология получения которых заключается в пластическом деформировании полимерных заготовок путем сжатия, сопровождающемся изменением толщины при постоянстве ширины заготовки. Установлено, что использование данной технологии позволяет не только повысить прочность при растяжении ПТФЭ в 2,7–3,3 раза при коэффициенте сжатия 3–4,3, но и снизить его деформацию ползучести в 22–29 раз по сравнению с исходным полимером. Предлагаемая технология апробирована также на ПТФЭ-композите, содержащем углеродный волокнистый материал марки УВИС-АК-П в количестве 5 мас.%. Показано, что и в этом случае прочность композита повышается в 3 раза, а деформация ползучести снижается в 8,3 раза по сравнению с исходным композитом, который не подвергался пластической деформации. Предлагаемая технология получения фторопластовых композитов позволяет расширить области их применения, и разработанные материалы могут использоваться в различных узлах трения, в особенности для схем нагружения с высокими растягивающими нагрузками.

**Ключевые слова:** политетрафторэтилен, углеродные волокна, деформация, ползучесть, износостойкость, прочность.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки РФ (Рег. № НИОКР АААА-А17-117040710038-8)

### Введение

Материалы на основе политетрафторэтилена имеют ряд преимуществ перед другими полимерами: высокую термическую стойкость, исключительную химическую инертность, низкий коэффициент трения, хорошие электроизоляционные свойства [1]. Изделия из ПТФЭ и композиты на их основе благодаря своим уникальным свойствам получили широкое распространение в конструкциях подвижных и неподвижных уплотнений, работающих в широком диапазоне температур и давлений как жидких, так и газообразных высокоагрессивных сред [2]. Однако применение ПТФЭ и ПТФЭ-композитов ограничено из-за наличия таких недостатков, как относительно низкая прочность и ползучесть (хладотекучесть) и при растягивающих усилиях, и при сжатии, что ограничивает ресурс работы и возможность широкого использования без модифицирования различными наполнителями и методами [3–6].

Существует множество различных способов устранения этих недостатков, преимущественно

путем введения дисперсных и волокнистых армирующих наполнителей. Однако использование армирующих наполнителей не всегда позволяет добиваться необходимого улучшения физико-механических свойств получаемых композитов при повышении их износостойкости [7–13]. В связи с этим до сих пор актуальными остаются исследования, связанные с поиском новых эффективных технологических способов улучшения свойств ПТФЭ и композитов на его основе. Одним из способов получения композитов с высокими прочностными и сниженной ползучестью является твердофазная структурная модификация полимеров, основанных на пластической деформации, в большинстве случаев направленных на создание высокоориентированного состояния [14]. К этим методам относятся одно- или двухосная вытяжка, одноосное сжатие, прокатка, волочение, плоскодеформационное сжатие или прокатка, плунжерная и гидростатическая экструзия и др. Методы твердофазной молекулярной ориентации можно разделить на две группы. В первую входят мето-

ды, основанные на деформировании полимерной заготовки, сопровождающемся ее формоизменением (вытяжкой). Вторую группу составляют процессы, не связанные с изменением формы и размеров и основанные на интенсивной пластической деформации (ИПД), осуществляемой в условиях простого сдвига [15, 16].

Наиболее известны из этих методов равноканальная угловая экструзия (РКУЭ) [17] и ее модифицированный вариант – равноканальная многоугловая экструзия (РКМУЭ) [18]. Особенностью таких методов интенсивной пластической деформации (ИПД) является способность создания различных маршрутов деформации с целью генерации разнообразных форм молекулярной ориентации. Однако использование данных методов для получения ориентированной структуры кристаллизующихся полимеров более сложная в осуществлении и требует проектирования специального инструмента. В связи с этим в данной работе предлагается более упрощенная технология получения материалов на основе ПТФЭ, обладающих сочетанием повышенной прочности при растяжении и сниженной ползучести, путем деформирования полимерной заготовки, сопровождающемся ее формоизменением, основанная на одноосном сжатии уже готовых полимерных заготовок.

**Целью** данной работы является исследование зависимости физико-механических свойств полимерного композиционного материала (ПКМ) на основе ПТФЭ и углеродных волокон марки УВИС-АК-П от метода пластической деформации, сопровождающей ее формоизменением.

### Объекты и методы исследования

В качестве углеродного наполнителя ПТФЭ использован углеродный волокнистый активированный материал марки УВИС-АК-П на основе гидратцеллюлозного углеродного волокна производства ООО НПЦ «УВИКОМ» (Россия).

Образцами служили заготовки из ПТФЭ марки ПН (ГОСТ 10007-80) и композиты, содержащие углеродные волокна марки УВИС-АК-П в количестве 5 мас. %. Полимерные композиты с УВ получены с использованием метода поэтапного введения УВ через концентрат, где массовое соотношение системы концентрат–полимер составляло 50/50, а также с использованием совместной механической активации компонентов при скорости вращения барабанов 400 об./мин в течение 2 минут (рис. 1). На разработанную технологию получен патент РФ № 2675520.

Результаты физико-механических и триботехнических испытаний ПТФЭ и композитов на его основе с УВИС-АК-П, полученные по представленной выше технологии, представлены в табл. 1, где  $\sigma_p$  – предел прочности при растяжении;  $\varepsilon_p$  – относительное удлинение при разрыве;  $E$  – модуль упругости при разрыве;  $I$  – скорость массового изнашивания, мг/ч;  $f$  – коэффициент трения.

Как видно из табл. 1, ПКМ на основе ПТФЭ и 5 мас.% УВИС-АК-П для испытаний выбран как самый износостойкий материал состава ПТФЭ-УВИС-АК-П при содержании УВ в композите от 1 до 10 мас.%, при этом этот материал характеризуется несколько повышенными деформационно-прочностными характеристиками по сравнению с исходным ПТФЭ. Однако, несмотря

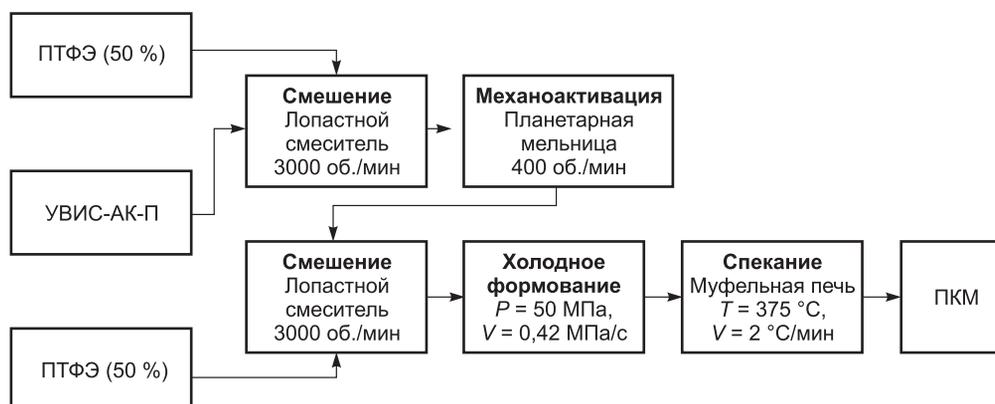


Рис. 1. Технология изготовления образцов ПКМ.

Fig. 1. Manufacturing technology of PCM samples.

Зависимость физико-механических характеристик ПКМ

Table 1

Dependence of physical and mechanical characteristics of PCM

Состав	$\sigma_p$ , МПа	$\varepsilon_p$ , %	$E$ , МПа	$I$ , мг/ч	$f$
ПТФЭ	20–21	300–320	450–469	160–162	0,20–0,22
ПТФЭ+3 мас.% УВИС-АК-П	15–16	340–350	500–510	2,00–2,20	0,17–0,19
ПТФЭ+5 мас.% УВИС-АК-П	19–20	345–354	500–514	0,08–0,10	0,23–0,25
ПТФЭ+7 мас.% УВИС-АК-П	12–13	100–105	340–346	3,00–3,10	0,18–0,20
00ПТФЭ+10 мас.% УВИС-АК-П	8–9	30–32	280–285	1,30–1,40	0,18–0,20

на улучшение физико-механических характеристик и повышенную износостойкость полученных композитов до 20–40 раз по сравнению с исходным ПТФЭ, данная технология получения композитов недостаточно обеспечивает повышение устойчивости материала к ползучести, хотя эти материалы характеризуются сниженной ползучестью по сравнению с ненаполненным ПТФЭ в 1,8 раза (см. ниже рис. 4). Повышенная износостойкость у полимерных материалов ценна в подвижных соединениях, но для использования их при повышенных напряжениях сжатия и растяжения необходимо, чтобы композиты обладали повышенными прочностными и вязкоупругими свойствами.

В связи с этим в данной работе проведены исследования влияния технологии пластической деформации готовых полимерных заготовок на их физико-механические показатели. Суть метода пластической деформации заключается в предварительном нагреве до 200–210 °С полимерной за-

готовки при постоянной ширине, сжатием максимум до 1/5 начальной толщины (рис. 2).

Сущность метода и его осуществимость иллюстрируется следующим образом: порошок ПТФЭ марки ПН, представляющий собой белый, рыхлый порошок со степенью кристалличности до спекания 95–98 %, после спекания 50–70 % и плотностью 2,17–2,19 г/см<sup>3</sup>,  $T_{пл}$  327 °С, сушили в муфельной печи при температуре –180 °С в течение 3 ч. Формование заготовок из ПТФЭ проводили путем прессования в пресс-формах с помощью гидравлического пресса при комнатной температуре при удельном давлении прессования 50 МПа. Выдержка под давлением составляла 2 мин. Спекание образцов проводили в муфельной печи по следующей температурной программе: нагревание от комнатной температуры до 300 °С со скоростью 3 °С/мин с выдержкой 30 мин; нагревание до 380 °С со скоростью 2 °С/мин с выдержкой 90 мин; охлаждение до 200 °С со скоростью 1 °С/мин; свободное охлаж-

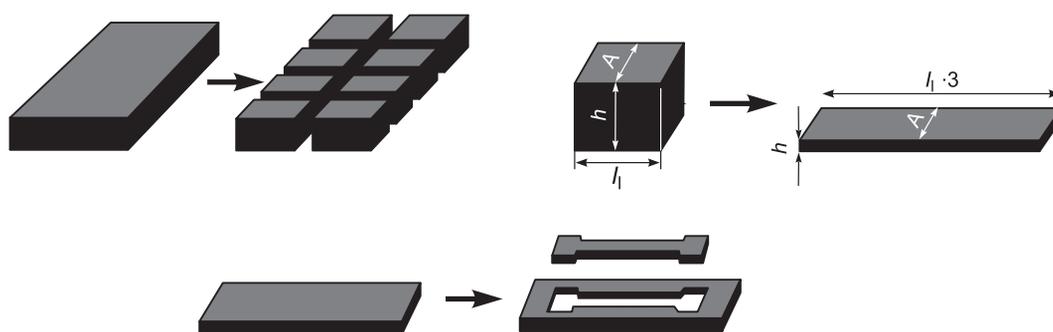


Рис. 2. Этапы метода пластической деформации.

Fig. 2. Stages of the method of plastic deformation.

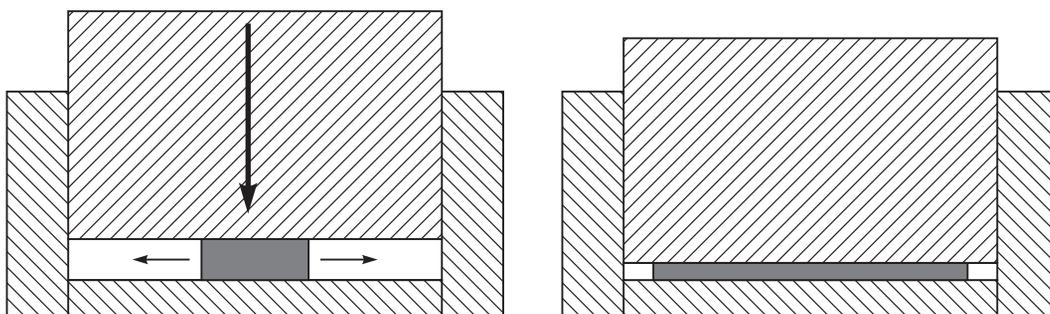


Рис. 3. Схема деформирования полимерной заготовки на основе ПТФЭ.

Fig. 3. Scheme of deformation of a polymer billet based on PTFE.

дение до комнатной температуры без контроля скорости. Из полученных заготовок вырезали бруски размерами 16×10×30 мм, которые нагревали при температуре 200–210 °С в течение 2 ч вместе с формой, предназначенной для получения ориентированных образцов, и прилагали усилие до сжатия заготовки в форме до 1/5 исходной толщины (рис. 3). После сжатия образец в форме охлаждали до комнатной температуры.

Обоснование выбора температурного диапазона для получения образцов методом сжатия заключается в том, что при температурах ниже 200 °С заготовка из ПТФЭ обладает недостаточной способностью к деформации, и это при попытке его сжатия приводит к разрушению образца. При температурах выше 210 °С заготовка характеризуется повышенной текучестью, из-за чего при сжатии происходит его вытекание через щели между деталями пресс-формы. Таким образом, оптимальный диапазон температуры деформирования полимерной заготовки составляет 200–210 °С.

Полученные таким образом образцы подвергались следующим испытаниям: определение физико-механических свойств по ГОСТ 11262-80 на испытательной машине UTS-20K при комнатной температуре и скорости перемещения подвижных захватов 50 мм/мин, ползучесть определялась по ГОСТ 18197-2014.

### Обсуждение результатов

Результаты испытаний представлены в табл. 2, где  $K$  – коэффициент сжатия образца;  $\sigma_p$  – прочность при растяжении;  $\varepsilon_p$  – относительное удлинение при разрыве;  $E$  – модуль упругости при растяжении.

Прочность при растяжении повышается в 2,7–3,3 раза при коэффициенте сжатия 3–4,3 по сравнению с исходным ПТФЭ. Прочность ПКМ повышается в 3 раза по сравнению с исходным

композитом, который не подвергался пластической деформации.

Коэффициент сжатия образца ( $K$ ) определяется отношением начальной толщины к толщине образца после деформирования:  $K = \delta_{\text{нач}} / \delta_{\text{после деформирования}}$ . Толщина получаемого образца регулируется (контролируется) по опусканию пуансона до определенной величины. В наполненной системе с армирующими наполнителями очагов напряжения образуется больше по сравнению с ненаполненным полимером, что может повысить вероятность разрушения материала с образованием микротрещин. По этой причине у композитов, содержащих углеродные волокна, коэффициент сжатия равнялся 3.

На рис. 4 приведены данные по изменению относительного удлинения полимерных материалов под нагрузкой во времени. Установлено, что при использовании метода пластической деформации ползучесть снижается в 12 раз в случае исходного ПТФЭ (см. рис. 4, а) и в 3,6 раза в случае с композитом, содержащим 5 мас. % УВИС-АК-П (рис. 4, б), по сравнению с материалами, которые не подвергались пластической деформации.

Таким образом, разработанная технология упрочнения ПТФЭ и композитов на его основе является эффективным решением, позволяющим получить материалы с улучшенными прочностными свойствами и сниженной ползучестью при растяжении. Применение данного способа получения высокопрочных полимерных материалов на основе ПТФЭ позволит повысить ресурс работы изделий в технике и оборудовании и расширить их область применения.

### Заключение

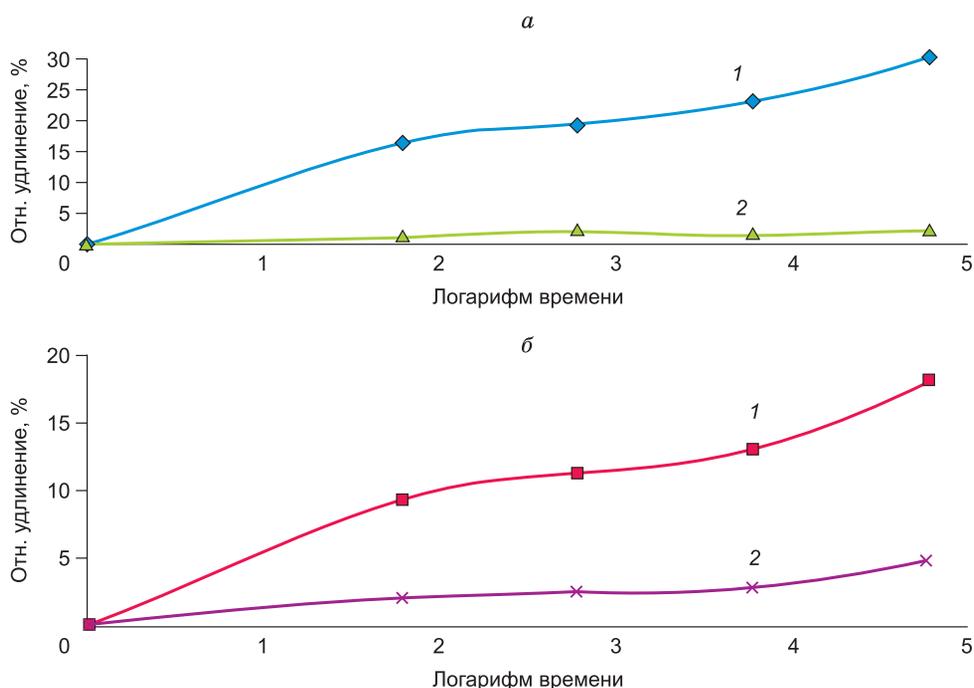
В результате проведенных исследований показана эффективность использования технологического приема пластической деформации, обес-

**Прочности и относительное удлинение при разрыве образцов ПТФЭ  
в зависимости от коэффициента сжатия**

Table 2

**Strength and elongation at break of PTFE samples depending on compression ratio**

Композит	К	$\sigma_p$ , МПа	$\epsilon_p$ , %	$E$ , МПа
Исходный ПТФЭ	1	20–21	300–320	400–410
ПТФЭ, подвергнутый пластической деформации	1,2	27–28	180–185	560–571
	1,4	29–30	135–137	510–518
	1,5	39–41	150–157	510–520
	1,6	39–40	118–121	480–492
	1,9	42–44	106–110	545–552
	2,3	51–53	72–75	510–518
	2,8	49–50	29–31	450–466
	2,9	59–61	48–50	575–582
	3,0	60–62	55–57	450–462
	4,3	70–72	26–28	–
ПТФЭ+5 мас. % УВИС-АК-П	1	20–21	355–364	500–514
ПТФЭ+5 мас. % УВИС-АК-П, подвергнутый пластической деформации	3,0	60–61	55–57	630–637



**Рис. 4.** Кривые зависимости «относительное удлинение – время» без (1) и при напряжении 5 МПа (2) от состава композитов:

*а* – исходный ПТФЭ; *б* – композит с 5 мас.% УВИС-АК-П.

**Fig. 4.** “Elongation – time” dependency curves without (1) and at a voltage of 5 MPa (2) on the composition of composites: *а* – initial PTFE; *б* – composite with 5 wt.% CF.

печивающего повышение физико-механических характеристик ПТФЭ и ПКМ. Установлено, что при повышении коэффициента сжатия ПТФЭ повышается прочность при растяжении до 3,4 раза, модуль упругости при растяжении повышается на 41 %, а ползучесть снижается в 12 раз по сравнению с ПТФЭ, полученным стандартным способом. Значительное изменение прочности и ползучести у ПТФЭ связано, на наш взгляд, с тем, что при деформировании полимерных заготовок в них происходит перестройка надмолекулярной структуры с формированием высокоориентированного состояния, что способствует значительному упрочнению полимера. Выявлено, что при деформировании композитов на основе ПТФЭ с 5 мас. % УВИС-АК-П прочность при растяжении повышается до 3 раз, модуль упругости при растяжении повышается на 24 % и ползучесть снижается в 3,6 раза по сравнению с ПКМ, который не подвергался пластической деформации по разработанной технологии.

Таким образом, разработан технологический подход, основанный на применении метода пластической деформации, и способствующий повышению эксплуатационных характеристик полимерных материалов на основе ПТФЭ. Разработанные материалы могут применяться для изготовления различных деталей узлов трения машин и механизмов, в особенности для схем нагружения в узлах трения с высокими растягивающими нагрузками. В дальнейшем планируется продолжить исследование влияние свойства ПКМ в зависимости от способа их получения.

### Литература

1. *Shasha Feng, Zhaoxiang Zhong, Yong Wang, Weihong Xing, Drioli E.* Progress and perspectives in PTFE membrane: Preparation, modification, and applications // *Journal of Membrane Science*. 2018. V. 549. P. 332–349, doi/10.1016/j.memsci.2017.12.032
2. *Bocklenberg L., Winkler K., Mark P., Rybarz S.* Low Friction Sliding Planes of Greased PTFE for High Contact Pressures // *Open Journal of Civil Engineering*. 2016. Vol. 6, No. 2. P. 105–116. DOI: 10.4236/ojce.2016.62010
3. *Воропаев В.В.* Инновации и ресурсосбережение при производстве высокопрочных износостойких карбоносодержащих композитов на основе фторопластовых матриц // *Новые горизонты. Сборник материалов III Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума*. Минск: БНТУ, 2016. С. 78–79.
4. *Болдырев В.В., Охлопкова А.А., Попов С.Н., Петрова П.Н. и др.* Фундаментальные основы меха-

нической активности, механосинтеза и механохимических технологий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 343 с.

5. *Маишков Ю.К., Овчар З.Н., Байбарацкая М.Ю., Мамаев О.А.* Полимерные композиционные материалы в триботехнике. М.: ООО Недра-Бизнесцентр, 2004. 262 с.

6. *Sokolova M.D., Davydova M.L., Shadrinov N.V.* Processing to increase the structural activity of zeolite in polymer-elastomer composites // *Int. Polymer Sci. And Technol*. 2011. V. 38, No. 5. P. 25–29.

7. *Ле Тху Ми Хуен, Панин С.В., Корниенко Л.А., Алексенко В.О., Иванова Л.П.* Механические и триботехнические свойства композитов на основе полифениленсульфида, армированных различными микро-волоконками // *Перспективные материалы конструкционного и медицинского назначения: сборник трудов Международной научно-технической молодежной конференции*. Томск: Изд-во ТПУ, 2018. С. 243–245.

8. *Marycheva A.N., Guzeva T.A., P'e P.M. et al.* Reinforcing Fillers for Polymer Composites Based on Organic Unwoven Materials. *Polym. // Sci. Ser.* 2019. V. D 12. P. 170–173. <https://doi.org/10.1134/S1995421219020138>

9. *Al-ghamdi A.M.S., Mark J.E.* Zeolites as reinforcing fillers in an elastomer // *Polymer Bulletin*. 1988. V. 20. P. 537–542. <https://doi.org/10.1007/BF00263669>

10. *Ly E.B., Lette M.J., Diallo A.K. et al.* Effect of Reinforcing Fillers and Fibres Treatment on Morphological and Mechanical Properties of Typha-Phenolic Resin Composites // *Fibers Polym.* 2019. V. 20. P. 1046–1053. <https://doi.org/10.1007/s12221-019-1087-y>

11. *Ovdak O.V., Kalinin Y.E., Kudrin A.M. et al.* The Influence of Content of Reinforcing Filler on Mechanical Properties of Carbon-Glass Fiber Reinforced Plastics in Matrix T-107. *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2018. V. 9. P. 108–113. <https://doi.org/10.1134/S2075113318010215>

12. *Sergeev V.P., Chuvashov Y.N., Galushchak O.V. et al.* Basalt fibers — A reinforcing filler for composites // *Powder Metall Met. Ceram.* 1995. V. 33. P. 555–557. <https://doi.org/10.1007/BF00559548>

13. *Beckford S., Cai J., Fleming R.A. et al.* The Effects of Graphite Filler on the Tribological Properties of Polydopamine/PTFE Coatings // *Tribol. Lett.* 2016. V. 64. 42 p. <https://doi.org/10.1007/s11249-016-0777-5>

14. *Возняк Ю.В.* Влияние маршрута деформирования на свойства политетрафторэтилена после равноканальной угловой экструзии // *Физика и техника высоких давлений*. 2012. Т. 22, № 2. С. 118–124.

15. *Патент РФ № 2527782* Процесс изготовления упрочненных прутковых изделий из аморфно-кристаллических полимеров / Белошенко В.А., Возняк А.В., Возняк Ю.В.

16. *Чередниченко В. С.* Технология конструкционных материалов: 2-е изд., Перераб. М.: Омега-Л, 2006. 752 с.

17. Белошенко В.А., Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н. Твердофазная экструзия полимеров. Киев: Наукова думка, 2008. 207 с.

18. Segal V.M. Equal-Channel Angular Extrusion: From Macromechanics to Structure Formation // Mater. Sci. Eng. 1999. V. A271. P. 322–333.

Поступила в редакцию 02.04.2020

Принята к публикации 19.05.2020

*Об авторах*

МАРКОВА Марфа Алексеевна, инженер, Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677000, Якутск, Автоторожная, 20, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-3000-1560>, [markovamusya@mail.ru](mailto:markovamusya@mail.ru);

ПЕТРОВА Павлина Николаевна, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677000, Якутск, Автоторожная, 20, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-1859-8034>, [ppavlina@yandex.ru](mailto:ppavlina@yandex.ru);

ФЕДОРОВ Андрей Леонидович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677000, Якутск, Автоторожная, 20, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-1718-2643>, E-mail: [gelvirb@mail.ru](mailto:gelvirb@mail.ru)

ПОПОВ Савва Николаевич, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677000, Якутск, Автоторожная, 20, Россия, <http://orcid.org/0000-0001-5897-149X>, [inm@ysn.ru](mailto:inm@ysn.ru).

*Информация для цитирования*

Маркова М.А., Петрова П.Н., Федоров А.Л., Попов С.Н. Разработка высокопрочных полимерных материалов на основе политетрафторэтилена // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020. Т. 25, № 2. С. 157–166. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-13>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-2-13

## **Development of high-strength polymer materials based on polytetrafluoroethylene**

M.A. Markova \*, P.N. Petrova, A.L. Fedorov, S.N. Popov

*Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Yakutsk, Russia*

*\*markovamusya@mail.ru*

**Abstract.** *The results of studies into the physicomachanical properties of polymeric materials based on polytetrafluoroethylene and its composites with carbon fibres of the UVIS-AK-P brand are presented. The technology of these composites involves the plastic deformation of polymer materials by compression, accompanied by the change of thickness at a constant width of the workpiece. It was found that the use of this technology allows not only to increase the tensile strength of PTFE by a factor of 2.7–3.3 with a compression ratio of 3–4.3, but also to reduce its creep deformation by a factor of 22–29, compared to the original polymer. The proposed technology is also tested on a PTFE composite containing a carbon fiber material of the UVIS-AK-P brand in the amount of 5 mass %. It is shown that in this case, the strength of the composite increases by a factor of 3, and the creep deformation decreases by a factor of 8.3, compared to the original composite, which was not subjected to plastic deformation. The proposed technology for producing fluoroplast composites allows expanding the scope of their application, and the developed materials can be used in various friction points, especially for loading schemes with high tensile loads.*

**Key words:** polytetrafluoroethylene, carbon fibers, deformation, creep, wear resistance, strength.

**Acknowledgements.** *The work was performed as part of the State Assignment of the Ministry of Science of the Russian Federation (Reg. No. Research and development work AAAA-A17-117040710038-8)*

### References

1. Shasha Feng, Zhaoxiang Zhong, Yong Wang, Weihong Xing, Drioli E. Progress and perspectives in PTFE membrane: Preparation, modification, and applications // *Journal of Membrane Science*. 2018. V. 549. P. 332–349. doi/10.1016/j.memsci.2017.12.032
2. Bocklenberg L., Winkler K., Mark P., Rybarz S. Low Friction Sliding Planes of Greased PTFE for High Contact Pressures // *Open Journal of Civil Engineering*. 2016. Vol. 6, No. 2. P. 105–116. DOI: 10.4236/ojce.2016.62010
3. Voropaev V.V. Innovacii i resursoberezhenie pri proizvodstve vysokoprochnyh iznosostojkikh karbonosoderzhashchih kompozitov na osnove ftoroplastovoyh matric // *Novye gorizonty. Sbornik materialov III Belorussko-Kitajskogo molodezhnogo innovacionnogo foruma*. Minsk: BNTU, 2016. P. 78–79.
4. Boldyrev V.V., Ohlopkova A.A., Popov S.N., Petrova P.N. i dr. Fundamental'nye osnovy mekhanicheskoy aktivnosti, mekhanosinteza i mekhanohimicheskikh tekhnologij. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2009. 343 p.
5. Mashkov Yu.K., Ovchar Z.N., Bajbarackaya M.Yu., Mamaev O.A. Polimernye kompozicionnye materialy v tribotekhnike. M.: OOO Nedra-Biznescentr, 2004. 262 p.
6. Sokolova M.D., Davydova M.L., Shadrinov N.V. Processing to increase the structural activity of zeolite in polymer-elastomer composites // *Int. Polymer Sci. And Technol*. 2011. V. 38, No. 5. P. 25–29.
7. Le Thi Mi Hiep, Panin S.V., Kornienko L.A., Alekseenko V.O., Ivanova L.R. Mekhanicheskie i tribotekhnicheskie svoystva kompozitov na osnove polifenilensul'fida, armirovannyh razlichnymi mikrovoloknami // *Perspektivnye materialy konstrukcionnogo i medicinskogo naznacheniya: sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy molodezhnoj konferencii*. Tomsk: Izd-vo TPU, 2018. P. 243–245.
8. Marycheva A.N., Guzeva T.A., P'e P.M. et al. Reinforcing Fillers for Polymer Composites Based on Organic Unwoven Materials. *Polym. // Sci. Ser.* 2019. V. D 12. P. 170–173. https://doi.org/10.1134/S1995421219020138
9. Al-ghamdi A.M.S., Mark J.E. Zeolites as reinforcing fillers in an elastomer // *Polymer Bulletin*. 1988. V. 20. P. 537–542. https://doi.org/10.1007/BF00263669
10. Ly E.B., Lette M.J., Diallo A.K. et al. Effect of Reinforcing Fillers and Fibres Treatment on Morphological and Mechanical Properties of Typha-Phenolic Resin Composites // *Fibers Polym.* 2019. V. 20. P. 1046–1053. https://doi.org/10.1007/s12221-019-1087-y
11. Ovdak O.V., Kalinin Y.E., Kudrin A.M. et al. The Influence of Content of Reinforcing Filler on Mechanical Properties of Carbon-Glass Fiber Reinforced Plastics in Matrix T-107. *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2018. V. 9. P. 108–113. https://doi.org/10.1134/S2075113318010215
12. Sergeev V.P., Chuvashov Y.N., Galushchak O.V. et al. Basalt fibers — A reinforcing filler for composites // *Powder Metall Met. Ceram.* 1995. V. 33. P. 555–557. https://doi.org/10.1007/BF00559548
13. Beckford S., Cai J., Fleming R.A. et al. The Effects of Graphite Filler on the Tribological Properties of Polydopamine/PTFE Coatings // *Tribol. Lett.* 2016. V. 64. 42 p. https://doi.org/10.1007/s11249-016-0777-5
14. Voznyak Yu.V. Vliyanie marshruta deformirovaniya na svoystva politetraforetilena posle ravnokanal'noj uglovoj ekstruzii // *Fizika I tekhnika vysokih davlenij*. 2012. V. 22. No. 2. P. 118–124.
15. Patent RF No. 2527782 Process izgotovleniya uprochnennyh prutkovykh izdelij iz amorfno-kristallicheskikh polimerov / Beloshenko V.A., Voznyak A.V., Voznyak Yu.V.
16. Cherednichenko V.S. Tekhnologiya konstrukcionnyh materialov. 2-e izd., pererab. M.: Omega-L, 2006. 752 p.
17. Beloshenko V.A., Bejgel'zimer Ya.E., Varyuhin V.N. Tverdogfaznaya ekstruziya polimerov. Kiev: Naukova dumka, 2008. 207 p.
18. Segal V.M. Equal-Channel Angular Extrusion: From Macromechanics to Structure Formation // *Mater. Sci. Eng.* 1999. V. A271. P. 322–333.

### About the authors

MARKOVA Marfa Alekseevna, engineer, Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 20 Avtodorozhnaya str., Yakutsk, 677000, Russia,

<http://orcid.org/0000-0002-3000-1560>, [markovamusya@mail.ru](mailto:markovamusya@mail.ru);

PETROVA Pavlina Nikolaevna, candidate of technical sciences, associate professor, leading researcher, Institute of Oil and Gas Problems, SB RAS, 20 Avtodorozhnaya st., Yakutsk, 677000, Russia,

<http://orcid.org/0000-0002-1859-8034>, [ppavlina@yandex.ru](mailto:ppavlina@yandex.ru);

FEDOROV Andrew Leonidovich, candidate of technical sciences, senior researcher, Institute of Oil and Gas problems, SB RAS, 20 Avtodorozhnaya str., Yakutsk, 677000, Russia,

<http://orcid.org/0000-0002-1718-2643>, E-mail: [gelvirb@mail.ru](mailto:gelvirb@mail.ru);

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОПРОЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

ПОПОВ Savva Nikolaevich, doctor of technical sciences, associate professor, leading researcher, Institute of Oil and Gas Problems, SB RAS, 20 Avtodorozhnaya st., Yakutsk, 677000, Russia, <http://orcid.org/0000-0001-5897-149X>, [inm@ysn.ru](mailto:inm@ysn.ru).

*Citation*

*Markova M.A., Petrova P.N., Fedorov A.L., Popov S.N.* Development of high-strength polymer materials based on polytetrafluoroethylene // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020. Vol. 25, No. 2. P. 157–166. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-13>