

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕН/СаF<sub>2</sub>-ОКСИФТОРИДНОЕ СТЕКЛО

© О. Ж. Аюрова, Н. М. Кожевникова, В. Н. Корнопольцев, Д. М. Могнонов

Байкальский институт природопользования СО РАН,  
670047, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6  
E-mail: chem88@mail.ru

Поступила в Редакцию 10 февраля 2022 г.

После доработки 14 марта 2022 г.

Принята к публикации 5 апреля 2022 г.

*Путем модификации политетрафторэтилена оксифторидным стеклом состава  $18CaF_2-31SiO_2-19B_2O_3-24BaO-8TiO_2$  получены полимерные композиты. Изучена термическая устойчивость разработанных композитов, определены термомеханические характеристики. Введение в политетрафторэтилен оксифторидного наполнителя способствует устойчивости композита при повышенных температурах и обеспечивает повышение модуля накопления на 50–65% в сравнении с исходным политетрафторэтиленом.*

Ключевые слова: *политетрафторэтилен; полимерные композиты; оксифторидное стекло; термостабильность; термомеханические свойства*

DOI: 10.31857/S0044461822030057, EDN: DEWDAL

Полимерные композиты на основе политетрафторэтилена и оксифторидных стекол могут быть использованы в качестве материалов триботехнического назначения [1, 2]. Роль оксифторидного наполнителя в таких системах сводится к регулированию процесса структурообразования композита, возможности управления физико-механическими характеристиками материала. Структурные изменения в композитах при введении в полимер оксифторидного стекла обуславливают повышение прочности, твердости, термической стабильности полученных композитных материалов [3, 4]. Определение теплофизических характеристик материалов позволит установить допустимые нагрузки при их эксплуатации и соответственно области практического применения.

Цель работы — синтез полимерных композитов состава политетрафторэтилен/СаF<sub>2</sub>-оксифторидное стекло и изучение их теплофизических свойств.

### Экспериментальная часть

Политетрафторэтилен марки ПН 1704 (ООО ТД «Кирово-Чепецкая химическая компания») использовали в качестве полимерной матрицы.

Оксифторидное стекло состава (мас%)  $18CaF_2-31SiO_2-19B_2O_3-24BaO-8TiO_2$  синтезировали путем введения кристаллической фазы СаF<sub>2</sub> при термической обработке боросиликатного стекла в температурном интервале стеклования 500–850°C. В качестве исходных компонентов для синтеза оксифторидного стекла применяли В<sub>2</sub>О<sub>3</sub>, ВаО, ТiО<sub>2</sub> (все — ч.д.а., АО «Вектон»), SiO<sub>2</sub> (ч.д.а., ЗАО «Унихим»), СаF<sub>2</sub> (ос.ч. с содержанием основного компонента не менее 99.99%, ЗАО «Унихим»). Достижение равновесия в образцах стекла контролировали рентгенографически на автодифрактометре D8 ADVANCE (Bruker). Оксифторидное стекло измельчали в планетарной

мельнице МПП 1-4 (ООО «Вибротехник») и просеивали через сито 0.25 (ООО «Крафт»).

Полимерные композиты готовили смешением политетрафторэтилена и  $\text{CaF}_2$ -оксифторидного стекла в высокоскоростном измельчителе, спроектированном и изготовленном в Малом инновационном предприятии «Мегаресурс» при Байкальском институте природопользования СО РАН ( $\omega = 3000 \text{ об} \cdot \text{мин}^{-1}$ ,  $\tau = 30 \text{ с}$ ). Массовая доля оксифторидного наполнителя в композитах составляла 2.5, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30%.

Возможные взаимодействия полимерной матрицы с оксифторидным наполнителем анализировали методом инфракрасной спектроскопии на ИК-спектрометре ALPHA (Bruker). Для каждого образца проведены в общей сложности 32 сканирования в диапазоне поглощения от 2000 до  $400 \text{ см}^{-1}$  при разрешении  $2.5 \text{ см}^{-1}$ .

Термические характеристики исходного политетрафторэтилена и композитов на его основе определяли на синхронном термическом анализаторе STA 449C (Netzsch) в корундовых тиглях при скорости подъема температуры  $5 \text{ град} \cdot \text{мин}^{-1}$  в воздушной атмосфере.

Образцы полимерных композитов для термомеханических испытаний получали прессованием под давлением 50 МПа и последующим спеканием образцов при  $T = 370 \pm 5^\circ\text{C}$  в печи в воздушной атмосфере по стандартной технологии (скорость нагрева  $100 \text{ град} \cdot \text{ч}^{-1}$ , выдержка 0.5 ч на 1 мм толщины образца, охлаждение в закрытой печи, нормализация при комнатной температуре в течение 1 сут).

Термомеханические свойства (модуль накопления  $E'$ , модуль потерь  $E''$ , тангенс угла механиче-

ских потерь  $\text{tg} \delta$ ) образцов определяли с помощью динамического механического анализатора DMA 242 C (Netzsch). Система позволяет проводить испытания при температуре от  $-150$  до  $650^\circ\text{C}$  в режимах изгиба, сжатия, растяжения, сдвига и пенетрации. Испытания были проведены с помощью держателя образца для пенетрации с диаметром проникающего конца пуансона 3 мм. Измерения проводились в температурном интервале  $25\text{--}500^\circ\text{C}$  при скорости нагрева  $5 \text{ град} \cdot \text{мин}^{-1}$ .

### Обсуждение результатов

В ИК-спектре полимерной матрицы регистрируются полосы поглощения в области  $1700\text{--}1600$  и при  $1390 \text{ см}^{-1}$ , характерные для колебаний концевых групп  $\text{—CF=CF}_2$ . Полосы поглощения при  $1212$  и  $1150 \text{ см}^{-1}$  относятся к колебаниям  $\nu(\text{CF}_2)$ , полосы в виде плеча при  $1250 \text{ см}^{-1}$  — к колебанию  $\nu(\text{CC})$ , при  $640$  и  $500 \text{ см}^{-1}$  — к внеплоскостным колебаниям групп  $\text{CF}_2$  (рис. 1). Аналогичные полосы поглощения были зафиксированы при изучении строения политетрафторэтилена [5, 6].

ИК-спектр оксифторидного стекла характеризуется группой полос поглощения в области  $1650\text{--}750 \text{ см}^{-1}$ , связанных с колебаниями тригональных боратных единиц с различным числом концевых групп. Поглощение при  $1540 \text{ см}^{-1}$  вызвано колебаниями атомов группы  $\text{B—O—Si}$ . Полосы поглощения в области  $1280\text{--}1240$  и  $720\text{--}640 \text{ см}^{-1}$  связаны с колебаниями связей  $\nu(\text{B—O—B})$  и  $\delta(\text{B—O}\approx\text{B})$  в  $[\text{BO}_3]$ -треугольниках

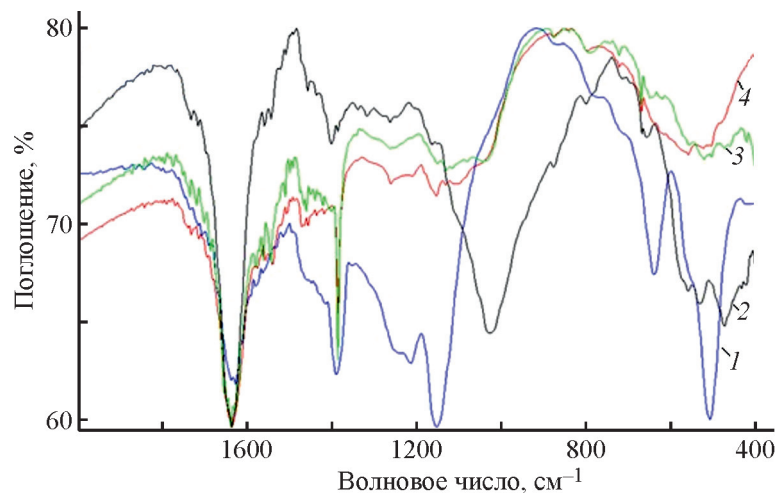


Рис. 1. ИК-спектры.

1 — политетрафторэтилен, 2 —  $\text{CaF}_2$ -оксифторидное стекло, 3 — полимерный композит состава политетрафторэтилен/ $\text{CaF}_2$ -оксифторидное стекло 70/30 (мас./мас.), 4 — полимерный композит состава политетрафторэтилен/ $\text{CaF}_2$ -оксифторидное стекло 97.5/2.5 (мас./мас.).

соответственно. В области  $1100\text{--}770\text{ см}^{-1}$  наблюдаются полосы поглощения, обусловленные колебаниями тетраэдров  $\text{SiO}_4$ ,  $1460\text{--}1350\text{ см}^{-1}$  — группировок  $[\text{BO}_3]$ ,  $750\text{--}400\text{ см}^{-1}$  —  $\delta(\text{Si—O—Si})$  и при  $540\text{ см}^{-1}$  — связи  $\text{CaF}$ . Такие же эффекты отмечены при исследованиях боросиликатных систем [7–9].

В ИК-спектре полученного композита присутствуют полосы поглощения в области  $1200\text{--}1000$  и  $800\text{--}400\text{ см}^{-1}$ , относящиеся к спектру неорганического компонента, обусловленные появлением колебаний связей  $\text{B—O—B}$  в треугольниках  $[\text{BO}_3]$  и групп  $\text{Si—O—Si}$ .

Ранее нами была исследована термическая устойчивость композитов на основе политетрафторэтилена и  $\text{LiF-}$ ,  $\text{BaF}_2$ -оксифторидного стекла. Показано стабилизирующее влияние добавок оксифторидного стекла на устойчивость политетрафторэтилена при повышенных температурах [10, 11]. В связи с этим в настоящей работе изучена термоокислительная деструкция полимерного композита на основе политетрафторэтилена и  $\text{CaF}_2$ -оксифторидного стекла в динамических условиях. Наименьшая потеря массы при термообработке к началу деструкции наблюдается у композита состава политетрафторэтилен/ $\text{CaF}_2$ -оксифторидное стекло (70/30), наибольшая — у базового полимера. Температуры  $\tau_5$  и  $\tau_{10}$ , при которых происходят соответственно 5 и 10%-ные потери массы образца, составляют для политетрафторэтилена 515 и  $524^\circ\text{C}$ , для композитов состава политетрафторэтилен/ $\text{CaF}_2$ -оксифторидное стекло 97.5/2.5 (мас./мас.), политетрафторэтилен/ $\text{CaF}_2$ -оксифторидное стекло 70/30 (мас./мас.) — 520 и 530, 529 и  $535^\circ\text{C}$  соответственно (рис. 2, а).

При деструкции композита состава политетрафторэтилен/ $\text{CaF}_2$ -оксифторидное стекло зафиксиро-

вано несколько эндотермических эффектов в интервале температур  $300\text{--}1000^\circ\text{C}$  (рис. 2, б). Эндозффект при  $330^\circ\text{C}$  обусловлен плавлением полимера. Разложение композита протекает в три стадии при температурах  $535\text{--}640^\circ\text{C}$  с интенсивным экзотермическим эффектом с максимумом при  $550^\circ\text{C}$ . Второй узкий экзозффект соответствует температуре  $590^\circ\text{C}$ , третий экзозффект при  $640^\circ\text{C}$  размыт и характеризуется низкой интенсивностью. Потеря массы в интервале  $550\text{--}560^\circ\text{C}$  в композите, содержащем 30%  $\text{CaF}_2$ -стекла, составляет 46%, при  $610^\circ\text{C}$  — 80%,  $815^\circ\text{C}$  — 85%,  $894^\circ\text{C}$  — 92%. Деструкция композита, в составе которого содержится 2.5%  $\text{CaF}_2$ -стекла, протекает в две стадии ( $530\text{--}582^\circ\text{C}$ ) с изменением массы 75%, при  $600^\circ\text{C}$  потеря массы составляет 80%, при  $895^\circ\text{C}$  — 90%, при  $1000^\circ\text{C}$  — 92%. Интенсивность второго экзозффекта ( $600^\circ\text{C}$ ) уменьшается в 2 раза, что подтверждает частичное окисление продуктов разложения композита. В интервале температур  $750\text{--}800^\circ\text{C}$  зафиксированы слабые широкие экзотермические эффекты, обусловленные кристаллизацией стекла. Эндотермические эффекты в области  $840\text{--}860^\circ\text{C}$  связаны с плавлением  $\text{CaF}_2$ -оксифторидного наполнителя. Массопотери полимера в интервале температур  $550\text{--}580^\circ\text{C}$  при добавлении 30%  $\text{CaF}_2$ -стекла уменьшаются на 29% в сравнении с композитом, содержащим 2.5% наполнителя (рис. 2).

Порядок реакции термоокислительной деструкции равен  $1/3$ ,  $E_a$  (энергия активации) реакции разложения композита, содержащего 2.5 мас%  $\text{CaF}_2$ -стекла, составляет  $373\text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ , с содержанием 30 мас% —  $379\text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$  (см. таблицу).

Наибольшие динамические потери наблюдаются в температурных диапазонах как фазовых переходов — твердотельного (дублет при  $\sim 26\text{--}40^\circ\text{C}$ ) и плав-

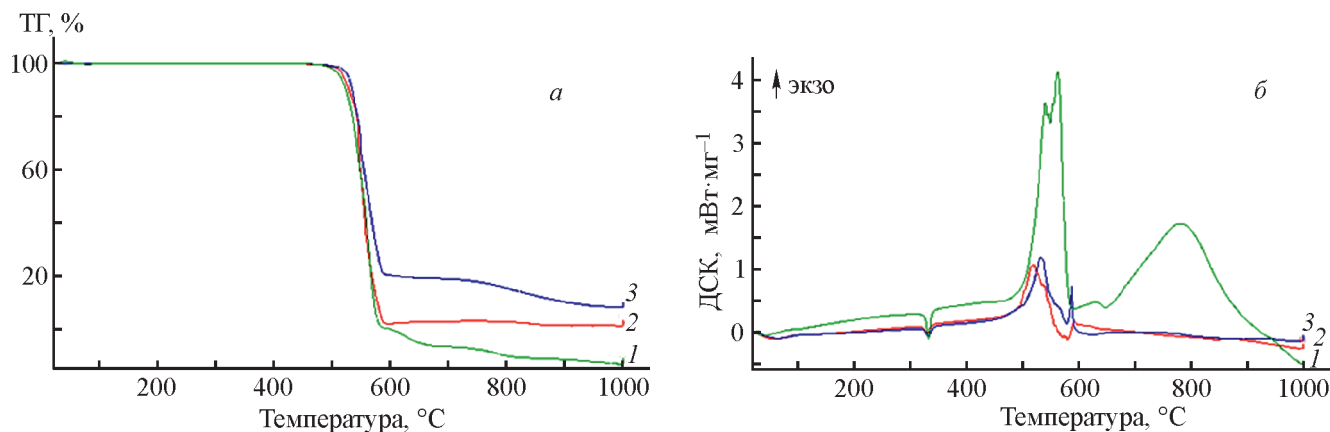


Рис. 2. Кривые термогравиметрии (а) и дифференциально-сканирующей калориметрии (б).

1 — политетрафторэтилен, 2 — полимерный композит состава политетрафторэтилен/ $\text{CaF}_2$ -оксифторидное стекло 97.5/2.5 (мас./мас.), 3 — полимерный композит состава политетрафторэтилен/ $\text{CaF}_2$ -оксифторидное стекло 70/30 (мас./мас.).

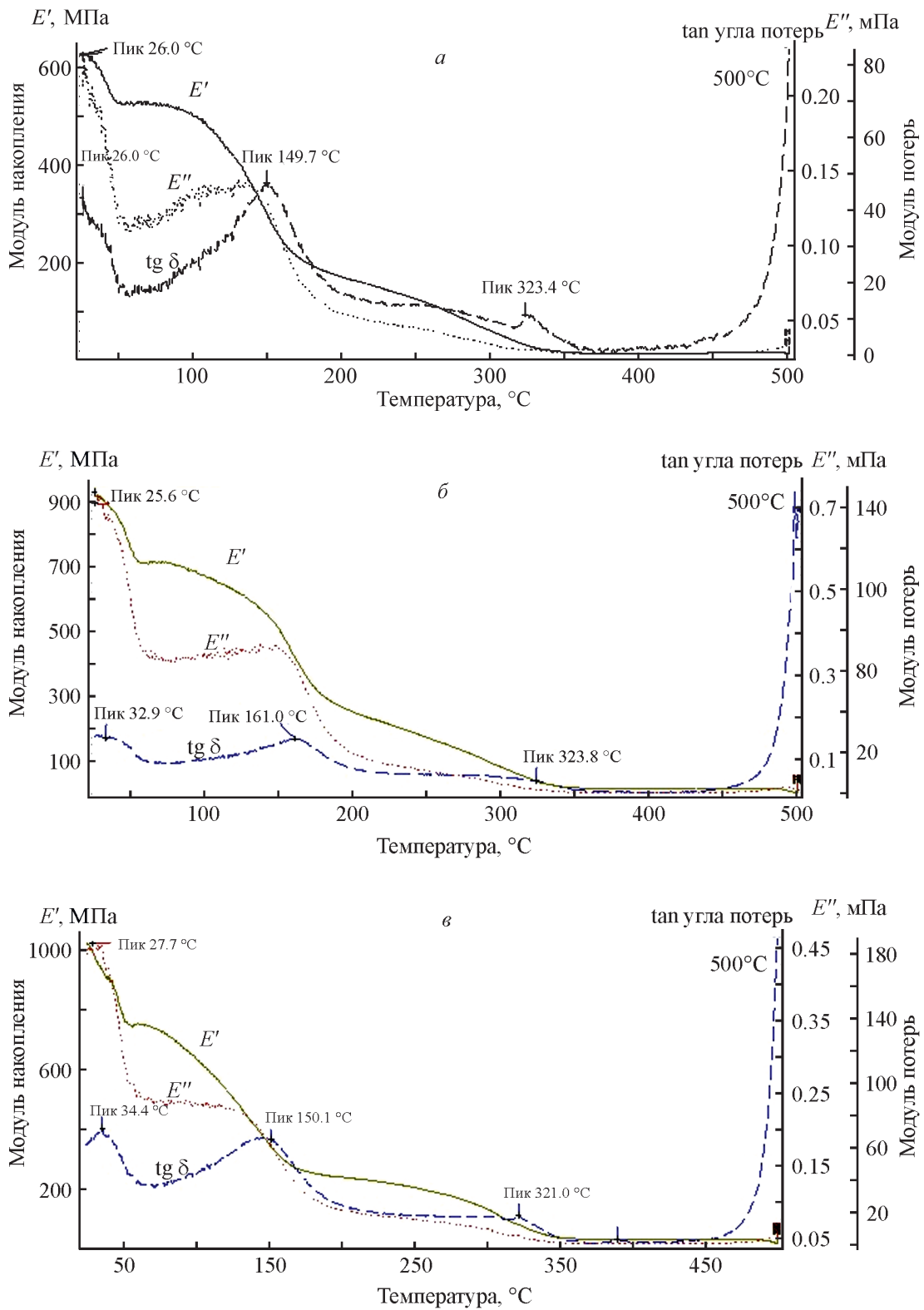


Рис. 3. Термомеханические свойства.

*a* — политетрафторэтилен, *б* — полимерный композит состава политетрафторэтилен/ $\text{CaF}_2$ -оксифторидное стекло 97.5/2.5 (мас./мас.), *в* — полимерный композит состава политетрафторэтилен/ $\text{CaF}_2$ -оксифторидное стекло 70/30 (мас./мас.).

Константы скорости термоокислительной деструкции полимерного композита состава политетрафторэтилен/СаF<sub>2</sub>-оксифторидное стекло

T, °C	Константа скорости реакции K, мин <sup>-1</sup> , 10 <sup>-3</sup>	
	политетрафторэтилен/СаF <sub>2</sub> -оксифторидное стекло 97.5/2.5 (мас./мас.)	политетрафторэтилен/СаF <sub>2</sub> -оксифторидное стекло 70/30 (мас./мас.)
500	1.36	1.28
530	1.59	1.44
540	1.98	1.85
600	5.76	5.62
650	7.21	7.11

ления (~321–323°C), так и релаксационных переходов (~147–161, 390, 500°C) (рис. 3). Дублет в температурном интервале 26–40°C представлен твердофазными термодинамическими переходами I и II рода, что обусловлено процессами, происходящими в кристаллической области полимера. Фазовый переход I рода при 26–34°C вызван изменениями параметров элементарной ячейки кристаллита. Твердофазный переход II рода при ~40°C связан с потерей спиральной хиральности длинноцепочечной молекулы кристалла политетрафторэтилена, т. е. с потерей элемента симметрии кристалла [12].

Увеличение содержания оксифторидного стекла, диспергированного в матрице политетрафторэтилена, приводит к значительному росту жесткости (модуля накопления  $E'$ ) всех композитов на 50–65%, что объясняется сильным адгезионным взаимодействием компонентов (рис. 3) [4]. Упрочняющий эффект максимален в области выше температуры релаксационного перехода полимерной матрицы ~26°C. Для композита с 30%-ным содержанием наполнителя наблюдается незначительное смещение температуры релаксационного перехода в область высоких температур в температурном интервале 25–40°C, возможно обусловленное ростом степени кристалличности и связанное с переориентацией структурных элементов. Повышенная упругость материала ( $E'$ ) при 26–34°C сопровождается максимальными потерями механической энергии ( $E''$ ) за счет ее диссипации в виде тепла.

При ~100°C (начало) наблюдается изменение наклона кривой модуля накопления. Происходит стеклование аморфной фазы материала, выражающееся в появлении пика при 149.7°C (161.0 и 151.1°C) [13]. С увеличением степени кристалличности пик расширяется, становясь асимметричным, и сдвигается в область более высоких температур (рис. 3, б, в). Это свидетельствует о том, что наличие оксифторидного

стекла в композите приводит к значительным ограничениям подвижности сегментов полимерных цепей в аморфной области материала, обуславливающим этот релаксационный процесс\* [14, 15].

В аморфной фазе при температуре выше температуры стеклования начинаются интенсивные молекулярные движения, в то время как в кристаллической фазе эти поступательные движения значительно слабее. Существенные изменения свойств кристаллических полимеров наблюдаются в области фазового перехода I рода. При температуре плавления 321–323°C кристаллическая фаза полимера исчезает, и деформируемость образца резко возрастает (рис. 3, а–в).

При температуре 390°C наблюдается релаксационный процесс (рис. 3, в), вероятно вызванный перестройкой связей макромолекул с поверхностью частиц наполнителя, и при 500°C — релаксационный процесс, связанный с перестройкой химических связей, главным образом межмолекулярных (начало процессов деструкции), что коррелирует с результатами дифференциально-сканирующей калориметрии.

## Выводы

Введение оксифторидного стекла в политетрафторэтилен способствует снижению сегментальной подвижности полимерной цепи, что оказывает влияние на изменение термомеханических свойств и термоокислительной стабильности полученных композитов состава политетрафторэтилен/СаF<sub>2</sub>-оксифторидное стекло. С увеличением содержания наполнителя жесткость термостабильных композитных материалов повышается на 50–65%, что объясняется сильным адгезионным взаимодействием полимерной матрицы с оксифторидным стеклом.

\* Уорд И. Механические свойства твердых полимеров. М.: Химия, 1975. 350 с.

### Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования Байкальского института природопользования СО РАН.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Байкальского института природопользования СО РАН (проекты №0273-2021-0007 и 0273-2021-0008).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

### Информация о вкладе авторов

О. Ж. Аюрова провела сбор данных литературы, провела исследования образцов методом ИК-спектроскопии, теплофизических свойств образцов; Н. М. Кожевникова провела сбор данных литературы, синтезировала оксифторидные стекла, изучила кинетику термоокислительной деструкции полимерных композитов; В. Н. Корнопольцев синтезировал полимерные композиты, подготовил образцы для испытаний; Д. М. Могнонов — изучение процессов стеклообразования в оксифторидных системах.

### Информация об авторах

Аюрова Оксана Жимбеевна, к.т.н.,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4772-9133>

Кожевникова Нина Михайловна, д.х.н., проф.,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3621-1611>

Корнопольцев Василий Николаевич, к.т.н.,

РИНЦ AuthorID: 177224

Могнонов Дмитрий Маркович, д.х.н., проф.,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3562-6284>

### Список литературы

- [1] Sathishkumar T. P., Satheeshkumar S., Naveen J. Glass fiber-reinforced polymer composites — a review // *J. Reinf. Plast. Compos.* 2014. V. 33. N 13. P. 1258–1275. <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>
- [2] Morampudi P., Namala K. K., Gajjala Y. K., Barath M., Prudhvi G. Review on glass fiber reinforced polymer composites // *Mater. Today: Proceedings.* 2021. V. 43. Part. 1. P. 314–319. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.669>
- [3] Игнатьева Л. Н., Савченко Н. Н., Лалаян В. М., Зверев Г. А., Усольцева Т. И., Устинов А. Ю., Шаулов А. Ю., Берлин А. А., Бузник В. М. Структура композиционного материала на основе оксифторидного стекла и низкоплавкого фторопласта // *ЖФХ.* 2016. Т. 90. № 9. С. 1374–1380. <https://doi.org/10.7868/S0044453716090120> [Ignat'eva L. N., Savchenko N. N., Zverev G. A., Usol'tseva T. I., Ustinov A. Y., Lalayan V. M., Shaulov A. Y., Berlin A. A., Buznik V. M. Structure of a composite material based on oxyfluoride glass and low-melting fluoroplast // *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2016. V. 90. N 9. P. 1828–1834. <https://doi.org/10.1134/S0036024416090120>].
- [4] Лалаян В. М., Стегно Е. В., Грачев А. В., Игнатьева Л. Н., Гончарук В. К., Шаулов А. Ю., Берлин А. А., Бузник В. М. Композиционные материалы на основе фторполимеров и оксифторидных стекол // *ДАН.* 2016. Т. 468. № 6. С. 648–651. <https://doi.org/10.7868/S0869565216180158> [Lalayan V. M., Stegno E. V., Grachev A. V., Shaulov A. Y., Berlin A. A., Ignat'eva L. N., Goncharuk V. K., Buznik V. M. Composite materials based on fluoropolymers and oxyfluoride glasses // *Doklady Chem.* 2016. V. 468. N 2. P. 187–190. <https://doi.org/10.1134/S0012500816060070>].
- [5] Odochian L., Moldoveanu C., Mocan A. M., Carja G. Contributions to the thermal degradation mechanism under nitrogen atmosphere of PTFE by TG-FTIR analysis. Influence of the additive nature // *Thermochim. Acta.* 2011. V. 526. N 1–2. P. 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.09.019>
- [6] Wang R., Xu G., He Y. Structure and properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) fibers // *e-Polymers.* 2017. V. 17. N 3. P. 215–220. <https://doi.org/10.1515/epoly-2016-0059>
- [7] Egorysheva A. V., Volodin V. D., Skorikov V. M. Glass formation in the Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–BaO system // *Inorg. Mater.* 2008. V. 44. N 11. P. 1261–1265. <https://doi.org/10.1134/S0020168508110228>
- [8] Еремяшев В. Е., Осипов А. А., Осипова Н. Л. Структура боросиликатных стекол при замещении катиона натрия катионами щелочноземельных металлов // *Стекло и керамика.* 2011. № 7–8. С. 3–6 [Eremyashev V. E., Osipov A. A., Osipova N. L. Borosilicate glass structure with rare-earth-metal cations substituted for sodium cations // *Glass and Ceramics.* 2011. V. 68. N 7–8. P. 205–208. <https://doi.org/10.1007/s10717-011-9353-5>].
- [9] Eremyashev V. E., Mironov A. B. Effect of Fe on the structure of potassium borosilicate glasses // *Inorg. Mater.* 2015. V. 51. N 2. P. 177–181. <https://doi.org/10.1134/S0020168515020065>
- [10] Аюрова О. Ж., Кожевникова Н. М., Могнонов Д. М., Дашицыренова М. С., Корнопольцев В. Н., Ильина О. В., Номоев А. В. Состав, структура и свойства композиционного материала на основе политетрафторэтилена и оксифторидной стекло-

- керамики // ЖПХ. 2018. Т. 91. № 4. С. 549–553  
[Ayurova O. Z., Kozhevnikova N. M., Mogonov D. M., Dashitsyrenova M. S., Kornopol'tsev V. N., Il'ina O. V., Nomoev A. V. Composition, structure, and properties of a composite material based on polytetrafluoroethylene and oxyfluoride glass–ceramic // Russ. J. Appl. Chem. 2018. V. 91. N 4. P. 618–622.  
<https://doi.org/10.1134/S1070427218040134>].
- [11] Аюрова О. Ж., Кожевникова Н. М., Могнонов Д. М., Ильина О. В., Дашицыренова М. С., Корнопольцев В. Н. Термоокислительная деструкция полимерного композитного материала на основе политетрафторэтилена и оксифторидного стекла // ЖПХ. 2020. Т. 93. № 7. С. 958–962.  
<https://doi.org/10.31857/S0044461820070051>  
[Ayurova O. Zh., Kozhevnikova N. M., Mogonov D. M., Il'ina O. V., Dashitsyrenova M. S., Kornopol'tsev V. N. Thermal oxidation degradation of a polymer composite material based on polytetrafluoroethylene and oxyfluoride glass // Russ. J. Appl. Chem. 2020. V. 93. N 7. P. 998–1002.  
<https://doi.org/10.1134/S1070427220060083>].
- [12] Егоров В. М., Якушев П. Н. Фазовые и релаксационные переходы в политетрафторэтилене // ФТТ. 2018. Т. 60. Вып. 9. С. 1824–1828.  
<https://doi.org/10.21883/FTT.2018.09.46405.060>  
[Egorov V. M., Yakushev P. N. Phase and relaxation transitions in poly(tetrafluoroethylene) // Phys. Solid State. 2018. V. 60. N 9. С. 1874–1878.  
<https://doi.org/10.1134/S1063783418090093>].
- [13] Blumm J., Lindemann A., Meyer M., Strasser C. Characterization of PTFE using advanced thermal analysis techniques // Int. J. Thermophys. 2010. V. 31. P. 1919–1927.  
<https://doi.org/10.1007/s10765-008-0512-z>
- [14] Эйсмонт Н. Г., Суриков Вал. И., Суриков Вад. И., Лях О. В. Роль молекулярной подвижности в формировании физико-механических свойств модифицированного политетрафторэтилена // Омск. науч. вестн. 2013. № 2 (120). С. 15–18.
- [15] Ревина И. В. Вязкоупругие свойства модифицированного политетрафторэтилена // Вестн. ВСГУТУ. 2014. № 3 (48). С. 22–27.
-