

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФТОРОПЛАСТА-4 И КОМПОЗИТОВ НА ЕГО ОСНОВЕ

^{1,2}Хохлов А.В., ³Бабайцев А.В., ²Гулин В.В., ^{1,2}Вотинова О.С., ¹Тарасова П.Н., ¹Ушканов А.А.

¹*Институт естественных наук СВФУ им. М. К. Аммосова, Якутск*

²*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва*

³*Московский авиационный институт (НИУ), Москва*

Политетрафторэтилен (ПТФЭ, фторопласт-4) широко используется в машиностроении, строительстве, медицине, электротехнике, химической промышленности, военной и аэрокосмической технике благодаря уникальному набору полезных физико-механических свойств: очень низкий коэффициент трения, гидрофобность, устойчивость к воздействию воды, света, УФ-излучения, агрессивных сред, природных загрязнений, физиологическая нейтральность, электроизоляционная способность, стабильность свойств в широком диапазоне температур (от -260°C до +260°C). К недостаткам ПТФЭ можно отнести высокую ползучесть под нагрузкой даже при комнатной температуре (хладотекучесть), низкую износостойкость, низкую стойкость к радиации. Для улучшения свойств и расширения области применения в матрицу ПТФЭ вводят разные наполнители: углеродные и базальтовые волокна, силикаты, детонационные наноалмазы, порошки бронзы, дисульфида молибдена, графита, кокса, слюды, меди, нитрида бора.

В докладе приведены данные нескольких серий квазистатических испытаний на растяжение с постоянными скоростями движения траверсы и на ползучесть и восстановление по двухступенчатым программам растяжения образцов из чистого ПТФЭ и ряда композитов на его основе с повышенной износостойкостью, полученных в последние годы в лабораториях «Технологии полимерных нанокомпозитов» и «Полимерные композиты для Севера» Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова введением в качестве наполнителей слоистых силикатов (механоактивированные каолин и серпентин) и коротких базальтовых волокон [1–4]. Образцы имели форму лопаток с длиной рабочей части 70 мм и площадью поперечного сечения 32 мм². Эти испытания проводились в НИУ МАИ на машине Instron 5969, а испытания на износостойкость – в СВФУ на универсальном высокотемпературном трибометре CETR UMT-3 по схеме трения "палец-диск".

Построены и проанализированы семейства диаграмм деформирования с разными скоростями растяжения (различающимися в 600 раз) и кривых ползучести и восстановления (КПВ) при разных уровнях напряжения. Исследованы особенности шейкообразования и разрушения, скоростная чувствительность диаграмм деформирования композитов, зависимость модуля упругости, напряжения течения, напряжения и деформация при разрыве от скорости растяжения и от вида и содержания наполнителя. В испытаниях обнаружены высокая деформативность фторопласта (кратность растяжения более 4 при скорости движения траверсы 1 мм/мин, кратность растяжения около 2 при скорости 600 мм/мин), способность материалов течь при постоянной нагрузке, выраженные наследственные свойства и высокая скоростная чувствительность: при увеличении скорости растяжения в 600 раз измеряемые напряжения увеличились почти в 2 раза, а деформация при разрушении уменьшилась в 2 раза (с 425% до 215%). Все эти свойства становятся менее выраженными при наполнении фторопласта слоистыми силикатами до определенной концентрации. Подобраны содержания наполнителей, обеспечивающие наибольшее снижение ползучести и повышение жесткости (мгновенного модуля), прочности и износостойкости.

По семейству построенных КПВ осуществлена проверка индикаторов применимости [5,6] к описанию деформирования исследуемых материалов физически нелинейного определяющего соотношения (ОС) вязкоупругопластичности типа Максвелла с двумя материальными функциями, детально изученного ранее в цикле статей [5–12].

$$\varepsilon(t) = E^{-1}F(\sigma(t)) + \eta^{-1} \int_0^t V(\sigma(\tau)) d\tau \quad (1)$$

Это ОС сочетает относительную простоту и широту области применимости: оно обобщает ряд классических моделей (за счёт произвольности материальных функций $F(x)$ и $V(x)$), управляющих упругой и вязкопластической компонентами деформации в (1)) и описывает широкий круг реологических эффектов, типичных для многих реономных материалов, проявляющих вязкоупругие и пластические свойства. Установлено, что базовые индикаторы применимости [5, 6] этого определяющего соотношения выполняются с хорошей точностью, а экспериментальные зависимости скорости установившейся ползучести и пластической деформации от уровня напряжения хорошо приближаются степенными и экспоненциальными функциями. Проведены определение двух материальных функций ОС (1) в классах степенных функций (найлены параметры, задающие степенные материальные функции) и отработка двух методик идентификации ОС (1) по КПВ [5], указан способ улучшения исходной методики идентификации путем предварительного приведения (посредством аппроксимации) экспериментальных кривых к качественному виду теоретических кривых, порождаемых ОС (1). Выполнена верификация ОС с найденными материальными функциями, продемонстрировано, что оно вполне удовлетворительно описывает КПВ исследованных материалов при деформациях, не превышающих 50%, намечены пути усовершенствования методик идентификации ОС (1).

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-13-20056, rscf.ru/project/22-13-20056.

1. Слепцова С.А., Лазарева Н.Н., Капитонова Ю.В., Лаукканен Э.А.С., Афанасьева Е.С. Полимерные композиты на основе политетрафторэтилена и природных слоистых силикатов для уплотнительных устройств техники Севера // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2020. Т. 7, № 2. С. 170–176.
2. Ушканов А.А., Слепцова С.А., Горохова С.В. Разработка фторопластовых композитов, армированных волокнами на основе базальта // *Ползуновский вестник*. 2021. № 4. С. 110–114.
3. Лаукканен С., Слепцова С.А., Тарасова П.Н., Федосеева В.И., Дьяконов А.А. Влияние механо-активированных каолина и шпинели магния на свойства политетрафторэтилена // *Южно-Сибирский научный вестник*. 2020. № 3 (21). С. 18–23.
4. Тарасова П.Н., Слепцова С.А., Лаукканен С., Дьяконов А.А. Уплотнительные материалы на основе политетрафторэтилена для авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). С. 51–64. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-51-64.
5. Хохлов А.В. Индикаторы применимости и методики идентификации нелинейной модели типа Максвелла для реономных материалов по кривым ползучести при ступенчатых нагружениях // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*. 2018. № 6. С.92–112. DOI: 10.18698/1812-3368-2018-6-92-112.
6. Хохлов А.В. Индикаторы применимости и методики идентификации нелинейной модели упруговязкопластичности типа Максвелла по двойным кривым обратной ползучести // *Проблемы прочности и пластичности*. 2021. Т.83, №4. С. 443–450. DOI:10.32326/1814-9146-2021-83-4-433-450.
7. Хохлов А.В. Идентификация нелинейной модели упруговязкопластичности типа Максвелла по диаграммам нагружения с постоянными скоростями // *Деформация и разрушение материалов*. 2018. №4. С. 2–10. DOI: 10.31044/1814-4632-2018-4-2-10.
8. Хохлов А.В. Нелинейная модель вязкоупругопластичности типа Максвелла: моделирование влияния температуры на кривые деформирования, релаксации и ползучести // *Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. физ.-мат. науки*. 2017. Т.21. №1. С. 160-179. doi: 10.14498/vsgtu1524.
9. Хохлов А.В. Нелинейная модель вязкоупругопластичности типа Максвелла: свойства семейства кривых релаксации и ограничения на материальные функции // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естеств. науки*. 2017. № 6. С. 31-55. DOI: 10.18698/1812-3368-2017-6-31-55.
10. Хохлов А.В. Нелинейная модель вязкоупругопластичности типа Максвелла: скорость накопления пластической деформации при циклических нагружениях // *Деформация и разрушение материалов*. 2017. № 7. С. 7–19. DOI: 10.31044/1814-4632-2017-7-7-19.
11. Хохлов А.В. Свойства диаграмм нагружения и разгрузки, порождаемых нелинейным определяющим соотношением типа Максвелла для реономных материалов // *Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*. 2018. Т.22, № 2. С. 293-324. doi: 10.14498/vsgtu1573.
12. Хохлов А.В. О возможности описания знакопеременности и немонотонности зависимости от времени коэффициента Пуассона при ползучести с помощью нелинейной модели вязкоупругопластичности типа Максвелла // *Деформация и разрушение матер.* 2019. № 3. С. 16–24. DOI: 10.31044/1814-4632-2019-3-16-24.