



## Ползучесть модификаций политетрафторэтилена при различных режимах нагружения

И.П. Николаева<sup>1</sup>, Л.И. Огородов<sup>2</sup>, Е.Л. Яковлева<sup>3\*</sup>

<sup>1-3</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

Информация о статье	История	Ключевые слова
УДК 69	Подана в редакцию: 09.12.2016	ползучесть политетрафторэтилен уравнение механических состояний статика цикличность плоское напряженное состояние предельные деформации
doi: 10.18720/CUBS.54.1		

### АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментального исследования деформирования и ползучести политетрафторэтилена (ПТФЭ) в условиях линейного и плоского напряженного состояния. В процессе экспериментов поддерживались заданные значения истинных напряжений с учетом текущих деформаций. Построено уравнение механических состояний, учитывающее мгновенноупругую, вязкоупругую, мгновеннопластическую и вязкопластическую составляющие полной деформации. Уравнение используется для описания деформаций ПТФЭ (Ф-4, Ф-4Д, Ф-4Д0) при стационарных и нестационарных режимах циклического нагружения в условиях плоского напряженного состояния с применением условия постоянства объема материала, условия подобия девиаторов напряжений и деформаций, а также с введением параметров, являющихся функциями вида девиатора напряжений. Актуальными и отличающимися от работ других авторов являются результаты исследования ползучести модификаций ПТФЭ при значениях истинных напряжений, достигающих предельных. Приведены данные по предельным деформациям ползучести модификаций ПТФЭ.

### Содержание

1.	Введение	8
2.	Обзор литературы	8
3.	Задачи исследования	8
4.	Материалы и методика испытаний с заданной интенсивностью истинных напряжений	9
5.	Результаты испытаний	10
6.	Обсуждение	12
7.	Заключение	12

#### Контактная информация:

- 1 +7(812)535-07-85, [inna4i4n@mail.ru](mailto:inna4i4n@mail.ru) (Николаева Инна Павловна, канд. техн. наук, доцент)  
 2 +7(981)827-13-55, [l.ogorodov@mail.ru](mailto:l.ogorodov@mail.ru) (Огородов Леонид Иванович, канд. техн. наук, доцент)  
 3\* +7(812)552-63-03, [helena47@mail.ru](mailto:helena47@mail.ru) (Яковлева Елена Леонидовна, канд. техн. наук, доцент)

## 1. Введение

Одним из направлений развития теории инженерных расчетов на долговечность элементов конструкций является учет реономных свойств материалов с целью описания процессов длительного деформирования и разрушения. Для проведения расчетов на ползучесть и длительную прочность элементов конструкций из материалов с реологическими свойствами необходимо располагать с одной стороны уравнением механических состояний, описывающим сложные деформационные процессы, а с другой стороны кинетическим уравнением повреждений, в частности, деформационного типа. Материалы проявляют реономные, в том числе и наследственные черты, как в отношении процессов деформирования, так и в отношении процессов длительного разрушения. Несмотря на наличие большого числа теоретических и экспериментальных исследований, вопрос о выборе адекватного метода описания деформационных процессов для тех или иных классов полимерных материалов при нестационарном нагружении и сложном напряженном состоянии не может считаться окончательно решенным, что в первую очередь относится к наиболее сложным термомеханическим нагружениям [1-8]. Требования практической пригодности построенного уравнения механических состояний заставляет в некоторых случаях при циклическом нагружении идти на компромисс с точностью описания сложных деформационных процессов. Задача состоит в сведении этого компромисса к разумному минимуму.

Развитие моделей циклической ползучести обеспечивает новые возможности для постановки задач экспериментальных исследований, делает эксперимент целенаправленным, позволяет подобрать программы испытаний для проверки теории. Исследование процессов ползучести при циклическом нагружении имеет важное значение для проектирования реальных элементов конструкций.

## 2. Обзор литературы

В механической лаборатории кафедры сопротивления материалов Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого выполнен целый ряд экспериментальных работ по исследованию процессов деформирования и разрушения полимерных и композитных материалов при длительном стационарном и циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния [5, 8-14]. Исследованию процессов ползучести полимерных и других материалов по-прежнему уделяется большое внимание [15-25]. При изучении долговременной ползучести широко используются модели нелинейно-наследственной вязкоупругости и различные феноменологические подходы [15, 16]. Актуальными остаются вопросы изучения процессов ползучести и релаксации напряжений материалов в условиях чередования нагружения с разгрузками [17, 18], нестационарного температурного воздействия [21, 22, 25] и воздействия среды [23].

## 3. Задачи исследования

Актуальным остается изучение ползучести частично кристаллических полимерных и композитных материалов на полимерной основе. Влияние сложного статического и циклического напряженного состояния и нестационарности режимов нагружения на деформационные процессы остается во многом неясным.

Задачи исследования формируются следующим образом:

1. Построить по данным опытов на кратковременное монотонное нагружение, прямую и обратную ползучесть для трех модификаций тетрафторэтилена уравнение механических состояний в терминах истинных напряжений и деформаций при сложном напряженном состоянии.
2. Исследовать и описать ползучесть тех же материалов в условиях нестационарного статического и циклического стационарного и нестационарного нагружения.
3. Оценить интенсивность истинных предельных деформаций модификаций политетрафторэтилена в условиях линейного и плоского напряженного состояния при статических и циклических режимах нагружения.
4. Дать заключение о возможности формулировки деформационного критерия разрушения для исследованных материалов.

#### 4. Материалы и методика испытаний с заданной интенсивностью истинных напряжений

Образцы изготавливались из трубчатых заготовок политетрафторэтилена Ф-4, Ф-4Д путем токарной обработки на токарном станке, причем часть заготовок Ф-4Д подвергалась отжигу; для заготовок Ф-4Д0 осуществлялся нагрев до 800С с последующим охлаждением в печи. Степень кристалличности материалов определена по методу Германа-Вейдингера и составляет: для заготовок Ф-4 – 30%, Ф-4Д – 45%, Ф-4Д0 – на внутренней поверхности 38% и на наружной поверхности – 25%. Плотность Ф-4 -2.25 г/см<sup>3</sup>, Ф-4Д и Ф-4Д0 – 2.23 г/см<sup>3</sup>.

Образцы представляли собой тонкостенные трубки с толщиной стенки  $t_0 = 1.0$  мм в рабочей части и длиной рабочей части  $l_p = 120$  мм. Наружный диаметр ( $D_0$ ) рабочей части образцов Ф-4 и Ф-4Д равен 23.5 мм, для Ф-4Д0 – 26 мм. Колебания толщины стенки по длине рабочей части не превышали 0.05 мм. Колебания длин рабочей части были в пределах  $\pm 1$  мм, а колебания наружного диаметра в пределах  $\pm 0.1$  мм. Образцы закреплялись в специальных герметизирующих захватах.

Испытания образцов проводились на установках [26, 27], позволяющих изучать механические свойства материалов в условиях двухосного напряженного состояния при статическом и циклическом нагружении.

Продольная деформация образца измерялась на базе  $l_0 = 50$  мм с помощью оптического китстомера с ценой деления 0.01 мм. Поперечная деформация замерялась стрелочным индикатором. Температура поддерживалась равной  $22 \pm 10$ С.

Интенсивность истинных напряжений для плоского напряженного состояния при статическом нагружении трубчатого образца определялась по формуле:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\bar{\sigma}_x - \bar{\sigma}_\theta)^2 + \bar{\sigma}_x^2 + \bar{\sigma}_\theta^2} \quad (1)$$

а при циклическом нагружении интенсивность максимальных за цикл напряжений по формуле:

$$\sigma_i^{max} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\bar{\sigma}_x^{max} - \bar{\sigma}_\theta^{max})^2 + (\bar{\sigma}_x^{max})^2 + (\bar{\sigma}_\theta^{max})^2} \quad (2)$$

Компоненты истинных напряжений (осевого  $\bar{\sigma}_x$  и тангенциального  $\bar{\sigma}_\theta$ ) определялись с учетом текущих значений наружного диаметра ( $D$ ) и толщины стенки ( $t$ ). Толщина стенки определялась из условия постоянства объема. Соотношения между компонентами главных напряжений  $n = \sigma_x / \sigma_\theta$  устанавливалось выбором плунжерной пары установки [26]. Время запаздывания регулировки нагрузки составляло не более 2-х минут, причем колебания интенсивности напряжений составляли не более 5% от заданного значения интенсивности напряжений  $\sigma_i$  или  $\sigma_i^{max}$ , а колебания  $n$  – не более 6%.

Полученные экспериментальные данные при кратковременном нагружении и при ползучести в условиях статического нагружения представлены в виде кривых деформирования в координатах  $\sigma_i - \varepsilon_i$  и кривых ползучести в координатах  $\varepsilon_i - \tau$ . При циклическом нагружении кривые ползучести строились в координатах  $\varepsilon_i^{max} - \tau$ . Интенсивность истинных (логарифмических) деформаций определялась по формуле:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_x)^2} \quad (3)$$

Компоненты истинных деформаций  $\varepsilon_x$  (осевая деформация),  $\varepsilon_\theta$  (тангенциальная деформация),  $\varepsilon_r$  (радиальная деформация) находились с учетом текущих размеров образца  $D$  и  $t$  и текущей базы  $l$  (длины образца) на основании следующих зависимостей:

$$\varepsilon_x = \ln \frac{l}{l_0}; \quad \varepsilon_\theta = \ln \frac{D - t}{D_0 - t_0}; \quad \varepsilon_r = \ln \frac{t}{t_0}, \quad (4)$$

где:  $l_0$  – база испытания,  $t_0$  – толщина стенки образца,  $D_0$  – наружный диаметр рабочей части образца.

Определялся параметр Лоде для напряжений:

$$\mu_s = 2 \frac{\sigma_2}{\sigma_1} - 1, \quad (5)$$

где:  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – главные напряжения.

## 5. Результаты испытаний

### Деформирование политетрафторэтилена в условиях кратковременного нагружения

Опыты на кратковременное деформирование ПТФЭ проводились при линейном и плоском напряженных состояниях с различными соотношениями осевого и тангенциального напряжений ( $n = \sigma_x/\sigma_\theta$ ) в условиях пропорционального нагружения. Для ПТФЭ отмечается влияние вида напряженного состояния (т.е. изменение соотношения между осевым и тангенциальным напряжениями, а также соответствующими деформациями) на кривую деформирования, причем наибольшую жесткость материал проявляет при соотношениях  $\sigma_x/\sigma_\theta$  близких к равноосному растяжению и наименьшую - в условиях линейного напряженного состояния. Изменение скорости нагружения в пределах от 0.03 МПа/с до 0.3 МПа/с оказывает на кривые деформирования незначительное влияние.

Закон мгновенного деформирования исследовался опытами на быструю разгрузку образцов от определенного уровня интенсивности напряжений при различных видах напряженного состояния. Нелинейные зависимости мгновенноупругой деформации от интенсивности напряжений для исследованных фторопластов представлены в работе [28]. Результаты измерения коэффициента поперечной деформации в условиях осевого растяжения определяют пределы изменения его от 0.3 до 0.48.

Для подбора закона мгновеннопластического деформирования (этот термин условен) использовались данные опытов на многократное нагружение со скоростью нагружения  $d\sigma_i/dt = 0.1 - 0.3$  МПа/с с регистрацией уровня  $\sigma_i$  и  $\varepsilon_i$  и с последующим мгновенным разгрузением образца. Существенно, что все испытания при кратковременном нагружении и при выходе на другие режимы поддерживались в том же интервале. После выдержки не менее одного часа, замерялись остаточные (так называемые мгновеннопластические) деформации. Зависимость мгновеннопластических деформаций фторопластов от интенсивности напряжений представлена в работе [28]. Мгновеннопластические деформации фторопластов зависят от вида напряженного состояния.

### Прямая и обратная ползучесть при статическом нагружении

Под прямой ползучестью понимают рост деформаций во времени при постоянных истинных напряжениях (то есть при постепенно снижающихся нагрузках). Полная деформация является суммой четырех составляющих: мгновенноупругой, мгновеннопластической, вязкоупругой и вязкопластической [8-14]. Для исследования вязкоупругой деформации ползучести ставились опыты на обратную ползучесть (возврат после разгрузки).

В результате получено полное уравнение механических состояний в интенсивностях напряжений и деформаций ( $\sigma_i, \varepsilon_i$ ) при стационарном нагружении, причем выполняется условие подобия девиаторов напряжений и скоростей деформаций [29]:

$$\varepsilon_i = \frac{2(1+\nu)\sigma_i}{3E_0(1-\frac{\sigma_i}{\sigma_{**}})} + \gamma \left[ (\alpha - \beta\mu_s) e^{m(\frac{\sigma_i}{\sigma_x})} - 1 \right] + \int_0^\tau (a - b\mu_s) c \frac{\sigma_i}{\sigma_*} \left[ A_1 e^{-\frac{\tau}{\mu_1}} + A_2 e^{-\frac{\tau}{\mu_2}} \right] d\theta + \int_0^\tau (d - l\mu_s) k \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_*} - \delta \right) \left[ A_3 e^{-\frac{\tau}{\alpha}} \right] d\tau \quad (6)$$

Таблица 1. Постоянные уравнения механических состояний

Параметры	Исследуемые материалы		
	Ф-4	Ф-4Д	Ф-4Д <sub>0</sub>
E <sub>0</sub> , МПа	800	900	615
σ <sub>**</sub> , МПа	27.5	28.5	22.5
ν	0.48/0.50	0.48/0.50	0.48/0.50
γ	1*10 <sup>-2</sup>	1*10 <sup>-2</sup>	1*10 <sup>-2</sup>
α	0.05	0.20	0.25
β	0.03	0.06	0.08
m	2.80	1.65	2.20
σ <sub>*</sub> , МПа	10	10	10
a	1	1	1
b	0.1	0.1	0.6
c	0.30	0.08	0.26
n	3.2	3.7	2.8
A <sub>1</sub>	5.5*10 <sup>-2</sup>	11*10 <sup>-4</sup>	9.5*10 <sup>-4</sup>
A <sub>2</sub>	1.7*10 <sup>-2</sup>	1.8*10 <sup>-4</sup>	1.8*10 <sup>-4</sup>
μ <sub>1</sub> , с.	110	110	85
μ <sub>2</sub> , с.	2475	3200	3000

Параметры	Исследуемые материалы		
	Ф-4	Ф-4Д	Ф-4Д <sub>0</sub>
d	1	1	1
l	0.3	0.3	0.5
δ	1.05	1.18	1.17
k	3.95	1.89	4.00
A <sub>3</sub>	7*10 <sup>-6</sup>	14*10 <sup>-6</sup>	26*10 <sup>-6</sup>
æ, с.	14.0*10 <sup>-3</sup>	14.1*10 <sup>-3</sup>	1.5*10 <sup>-3</sup>

### Нестационарные режимы статического нагружения исследуемых материалов

Режимы нестационарного статического нагружения приведены на рис. 1-3. Здесь же показаны зависимости интенсивности истинных деформаций от времени. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает, что расчет в целом воспроизводит процесс ползучести при сложном режиме нагружения с удовлетворительной точностью. Исследование показало, что расхождения прежде всего связаны с недостаточно точной аппроксимацией функций  $A_1 e^{-\frac{\tau}{\mu_1}} + A_2 e^{-\frac{\tau}{\mu_2}}$ . Для более точного описания вязкоупругой составляющей полной деформации в указанной функции следовало бы взять не две, а может, три или четыре экспоненты. Одна из дополнительных экспонент должна иметь время релаксации в интервале  $10 \cdot 10^3 \text{ с} \leq \mu \leq 15 \cdot 10^3 \text{ с}$ .

### Ползучесть при циклическом нагружении с различными частотами

Ползучесть фторопластов Ф-4, Ф-4Д и Ф-4Д<sub>0</sub> при циклическом нагружении с частотами 2.5 Гц, 5.0 Гц, и 10.0 Гц исследовалась в условиях постоянства максимальной за цикл интенсивности напряжений с коэффициентом асимметрии цикла  $r = \sigma_i^{min} / \sigma_i^{max} = 0.5$ , при температуре  $22 \pm 1^\circ \text{C}$ . Форма цикла – синусоидальная. Для сравнения полных деформаций ползучести при статическом и циклическом нагружении строились изохронные зависимости  $\sigma_i - \varepsilon_i$  и  $\sigma_i^{max} - \varepsilon_i^{max}$  при определении времени ползучести  $t = 5 \cdot 10^3 \text{ с}$ .

Можно сформулировать некоторые выводы. При частотах 2.5 Гц и 5.0 Гц экспериментальные точки, относящиеся к данному материалу и данному виду напряженного состояния, не совсем совпадают с экспериментальными точками, относящимся к условиям стационарного статического нагружения. При этом наблюдается некоторая тенденция к повышению жесткости материала при циклическом нагружении, по сравнению со статическим, если максимальная за период цикла интенсивность переменных напряжений равна интенсивности постоянных напряжений при стационарном нагружении. Эта тенденция видна при всех исследованных видах напряженного состояния. Кроме того, при частоте нагружения 10 Гц намечается существенное повышение жесткости по сравнению со статическим нагружением и частотами 2.5 Гц и 5.0 Гц. Особенно сильно жесткость материалов повышается при  $n = \sigma_x / \sigma_\theta$ , близком к  $n = \infty$  (линейное растяжение), то есть в тех условиях, когда при статическом нагружении наблюдается наиболее интенсивное развитие вязкопластических деформаций.

Примеры кривых ползучести при циклическом нагружении представлены на рис. 4,5. Характер этих кривых отличается от такового для условий статического нагружения. Применяем к условиям циклического нагружения уравнение, используемое в предыдущем разделе для различных случаев статического нагружения. Мгновенноупругая и мгновеннопластическая составляющие интенсивности деформаций вычисляются по максимальным за период цикла напряжениям, а вязкоупругая составляющая вычисляется непосредственно подстановкой переменных значений  $\sigma_i$  выражение:

$$\varepsilon_i^{BY} = (a - b\mu_s) \int_0^\tau c \left( \frac{\sigma_{im} + \sigma_{ia} \sin 2\pi f \theta}{\sigma_*} \right)^n k(\tau - \Delta) d\theta \quad (7)$$

Если расчет трех первых составляющих полной деформации не вызывает логических затруднений, то расчет вязкопластической составляющей представляется далеко не ясным. Сделан ряд попыток в представлении функций вязкопластической составляющей (в том числе в направлении эмпирических поправок) применительно к циклическому нагружению. Для расчетов при циклических режимах нагружения предлагается эмпирическая зависимость:

$$\varepsilon_i^{max} = \frac{2(1 + \nu)\sigma_i^{max}}{3E_0(1 - \frac{\sigma_i^{max}}{\sigma_{**}})} + \gamma[(\alpha - \beta\mu_s)e^{m(\sigma_i^{max} - \sigma_*)} - 1] + (a - b\mu_s)\lambda_2 c \left( \frac{\sigma_i^{max}}{\sigma_*} \right)^n \int_0^\tau [A_1 e^{-\frac{\tau}{\mu_1}} + A_2 e^{-\frac{\tau}{\mu_2}}] d\theta \quad (8)$$

$$+ (d - l\mu_s)k \left( \frac{\sigma_i^{max}}{\sigma_*} - \delta \right) \int_0^\tau A_3 e^{-\frac{\tau}{\alpha}} d\tau$$



В третье слагаемое, описывающее вязкоупругую составляющую полной деформации вносится эмпирический коэффициент  $\lambda_2$  (для Ф-4  $\lambda_2 = 0.58$ , для Ф-4Д  $\lambda_2 = 0.65$ , для Ф-4Д<sub>о</sub>  $\lambda_2 = 0.5$ ). Расчетные кривые ползучести, полученные на основании этого уравнения представлены на рис. 4,5.

Сделана попытка использовать эмпирическую зависимость также и для представления деформации ползучести при нестационарных режимах циклического нагружения в виде нескольких блоков циклов с различными значениями  $\sigma_i^{max}$ .

### **Предельные деформации фторопластов при статическом и циклическом нагружении**

Исследование предельных деформаций важно прежде всего с точки зрения вопроса о возможности формулировки некоторых деформационных критериев разрушения для полимерных материалов [8]. Экспериментальные данные по предельным деформациям материалов позволяют объективно оценить допускаемые деформации ползучести элементов конструкций. На рис. 6 нанесены экспериментальные значения интенсивности полных предельных деформаций при плоском напряженном состоянии, характеризующиеся соотношениями  $n = \sigma_x / \sigma_\theta = 1.25$  (примерно одинаковые растягивающие напряжения в двух перпендикулярных направлениях для Ф-4Д<sub>о</sub>  $n = 1.15$ ). В данном случае прослеживается определенная стабильность интенсивности полных деформаций для всех трех испытанных модификаций фторопластов. Однако экспериментальные данные, представленные на рис.7, свидетельствуют о том, что при других значениях  $n$  (там, где разрушение имеет место) получаются другие значения интенсивности предельных деформаций и проявляется отчетливая тенденция снижения этой интенсивности с ростом времени до разрушения. Для фторопластов в достаточно широком диапазоне значений  $n$  не существует постоянства предельных деформаций. В целом ряде случаев нестационарного нагружения текущие деформации  $\varepsilon_i(\varepsilon_i^{max})$  достигают зоны предельных значений уже на первых ступенях нагружения (рис. 8). Это также свидетельствует против деформационного критерия разрушения.

Представляет интерес изучение характера разрушения образцов ПТФЭ марки Ф-4. При статическом нагружении с преобладающим растягивающим осевым напряжением разрушение происходит по поперечному сечению трубчатого образца без видимой локализации вязкопластической деформации (при поддержании заданного истинного напряжения с учетом изменяющейся деформации). При двухосном напряженном состоянии, при  $n = 1.25$ , в месте разрушения возникают поры, свидетельствующие о сильном разрыхлении материала. Иногда поры наблюдаются и при условии осевого растяжения. Можно предположить, что подобное разрыхление предшествует разрыву образцов по плоскости поперечного сечения. При циклическом нагружении происходит аналогичное разрыхление материала и лишь в некоторых случаях при  $n = 1.25$  характер разрушения отличается от описанного. При этом образованию видимых пор предшествует появление небольшого пузыря на поверхности поврежденного материала образца.

Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы для оценки предельной жесткости элементов конструкций из исследованных полимерных материалов.

## **6. Обсуждение**

В статье приводятся описание деформационных процессов политетрафторэтилена на основе управления механических состояний, предложенного на кафедре сопротивления материалов Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Авторами не ставилась задача расчета кривых ползучести на основе экспериментальных данных отечественных и зарубежных источников. Следует отметить, что в экспериментальных данных других авторов нет достаточной информации по параметрам опытов для проведения подобных расчетов [3,7,17-19,21,22,24,30-32]. И особенно следует отметить, что механические характеристики материалов в данных работах естественно отличаются от таковых для политетрафторэтилена, а также и существенное отличие в используемых для теоретического расчета уравнений механических состояний материала.

Также следует отметить, что испытание ползучести фторопластов, описанные в данной статье, выполнены при предельных напряжениях, что отличает данную работу от описания ползучести в работах других авторов [17-19,21,22].

## **7. Заключение**

Деформации ползучести фторопластов (Ф-4, Ф-4Д, Ф-4Д<sub>о</sub>) при стационарном и нестационарном нагружении удовлетворительно описываются уравнением механических состояний, учитывающим

мгновенноупругую, вязкоупругую, мгновеннопластическую и вязкопластическую составляющие деформации, с использованием условия постоянства объема, условия подобия девиаторов напряжений и деформаций, а также при введении параметров, являющихся функциями вида девиатора напряжений.

В условиях циклического нагружения со знакопостоянным изменением интенсивности истинных напряжений скорость ползучести меньше, чем в условиях такого статического нагружения, при котором интенсивность постоянных напряжений  $\sigma_i$  равна интенсивности  $\sigma_i^{max}$  максимальных за период цикла переменных напряжений. Изменение частоты от 2.5 до 10 Гц, не приводит к существенному изменению деформационных свойств политетрафторэтилена, за исключением случая одноосного растяжения при частоте в 10 Гц, когда наблюдается повышение жесткости материала по сравнению с другими частотами во время испытания и другими значениями  $n = \sigma_x / \sigma_\theta$ .

Применение уравнения механических состояний, построенного на основании результатов статистических испытаний, к режиму циклического нагружения дает несколько заниженные значения расчетных деформаций ползучести. Предложена эмпирическая поправка к указанному уравнению механических состояний.

Для фторопластов в достаточно широком диапазоне  $n = \sigma_x / \sigma_\theta$  не существует постоянства предельных деформаций. Текущие деформации достигают зоны предельных значений уже на первых ступенях нагружения, причем разрушения при этом не происходит. Это также свидетельствует против деформационного критерия разрушения.

Представленное уравнение накопления повреждений может быть использовано для расчетов деформации ползучести фторопластов при стационарном и нестационарном нагружении.

## Литература

- [1] Илюшин А.А., Победря Б.Е. Основы математической теории вязкоупругости. М.: Наука, 1970. 280 с.
- [2] Москвитин В.В. Сопrotивление вязкоупругих материалов. М.: Наука, 1972,. 327 с.
- [3] Бугаков И.И. Ползучесть полимерных материалов. М.: Наука, 1973. 288 с.
- [4] Гольдман А.Я. Прочность конструкционных пластмасс. Л.: Машиностроение, 1979. 320 с.
- [5] Павлов П.А. Механические состояния и прочность материалов. Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. 176 с.
- [6] Айбиндер С.Б., Тюнина Э.Л., Цируле К.И. Свойства полимеров при различных напряженных состояниях. М.: Химия, 1981. 232 с.
- [7] Гольдман А.Я. Прогнозирование деформационно-прочностных свойств полимерных и композиционных материалов. Л.: Химия, 1988. 272 с.
- [8] Павлов П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность. Л.: Машиностроение, 1988. 252 с.
- [9] Павлов П.А., Андреев А.В. Исследование ползучести фторопласта-4 в условиях плоского циклического напряженного состояния // Механика полимеров. – 1976. - №6. – С.1099-1103.
- [10] Павлов П.А., Крутских Н.А. Феноменологическое описание и экспериментальное исследование деформационных процессов при сложном термомеханическом нагружении частично кристаллических материалов // Механика композитных материалов. 1984. №6. С. 974-979.
- [11] Павлов П.А., Яковлева Е.Л., Крутских Н.А. Аналитическое описание процессов деформирования и разрушения элементов конструкций из полимерных материалов // Труды ЛПИ. 1983. №393. С. 3-7.
- [12] Павлов П.А., Косов К.А. Сопrotивление частично кристаллических полимерных материалов циклическому нагружению при плоском напряженном состоянии // Механика композитных материалов. 1986. №6. С. 978-986.
- [13] Белан-Гайко В.Н. Экспериментальное исследование ползучести полимерного материала при пропорциональном нестационарном нагружении в условиях плоского напряженного состояния // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1992. №1. С.105-109.
- [14] Николаева И.П., Огородов Л.И., Красиков С.В. Ползучесть полиэтилена высокой плотности при различных режимах нагружения // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №12(27). С.50-63.
- [15] Krollmann Norbert. Verhalten von EPS-Hartschaumstoffen unter langzeitiger Druckbeanspruchung//Dauphgs:k. 2006. 28. №3. P.184-191.
- [16] Beake Ben/ Mogelling indentation creep of polymers: a phenomenological approach //J. Phys. D. 2006. 39. №20. P.4478-4485.

- [17] Демидов А.В., Макаров А.Г., Столевич А.М. Варианты математического моделирования деформационных процессов полимерных материалов // Вопросы материаловедения. 2006. №3. С.101-110. Шерстнев В.А., Гольдман А.Я. Установка для испытания полимерных материалов на усталость в условиях плоского напряженного состояния // Проблемы прочности. 1976. №12. С. 111-113.
- [18] Yoda Mitsuo, Nakamura Tadayuki, Saito Yuichi, Nakamura Takayuki/ Creep crack growth characteristics in polyethylene film at various stresses and temperatures.// Nihon rairyo kyodo gakkaiishi = J.Jap. Soc. Strength and Fract. Mater. 2006. 40. №2. P. 27-34.
- [19] Girard D., Castagnet S., Gacougnolle J.L., Hosehstetter G. On the relevance of a notch creep test for the comprehension and prediction of slow crack growth in PVDE // Polym. Test. 2007. 26. №7. P. 937-948.
- [20] Dian G. Modelling non-linear creep behavior of an epoxy adhesive // Jnt. J. Adhes and Adhes. 2007. 27. №8. P.636-646.
- [21] Ростовцева Н.Г., Литвинов А.М., Федорова С.В., Макаров А.Г. Прогнозирование деформационных процессов полимерных материалов в условиях меняющейся температуры//Дизайн. Материалы. Технологии. 2009. №3. С. 69-71. Голудин Е.П. Вариант стохастической модели неизотермической ползучести поливинилхлоридного пластика// Вест. Самар.гос.техн. ун-та. Сер.Физ-мат.науки. 2009. №1. С.114-121.
- [22] Голудин Е.П. Вариант стохастической модели неизотермической ползучести поливинилхлоридного пластика // Вест. Самар.гос.техн. ун-та. Сер.Физ-мат.науки. 2009. №1. С.114-121.
- [23] Mourad A.-H. J., Fouad H., Elleithy Rabeh. Impact of same environmental conditions on the tensile, creep-recovery, relaxation, melting and crystallinity behavior of UHMWPE-GUR 410-medical grade // Mater. and Des. 2009. 30. №10. P. 4112-4119.
- [24] Elksnite J., Maksimov R.D., Zicans J. Mevi R. The effect of small additions of a lignid-crystalline polymer on the mechanical properties of polyethylene.// Mech. Compos. Mater. 2010. 46. №1 P.77-88.
- [25] Chen Jian, Bell Gerard A., Djng Hanshan, Smith James F., Beake Ben D. // J. Phys. D. 2010. 43. №42. P.404-425.
- [26] Шерстнев В.А., Гольдман А.Я. Установка для испытания полимерных материалов на усталость в условиях плоского напряженного состояния//Проблемы прочности. 1976. №12. С. 11-113.
- [27] Огородов Л.И. Установка для испытаний полимерных материалов в условиях плоского напряженного состояния при статическом и циклическом нагружении// Механика: РЖ.1979.№1096Деп.
- [28] Огородов Л.И., Котяков Л.Ф., Курилович Н.Н. Деформирование поликристаллических полимерных материалов в условиях кратковременного нагружения// Научно-технические проблемы развития производства химических волокон в Беларуси: Материалы третьей Белорусской научно-практической конференции. 2006. С.329-333.
- [29] Белан-Гайко В.Н., Огородова Л.И. Геометрическое подобие девиаторов напряжений и скоростей деформаций ползучести полимерных материалов в условиях линейного, сложного пропорционального и циклического режимов нагружения // Материалы десятой всероссийской конференции: Вузовская наука – региону. Вологда: ВоГТУ, 2012. С. 305-310.
- [30] Логинова И.И., Артамонова Д.А., Столяров О.Н., Мельников Б.Е. Влияние структуры на вязкоупругие свойства геосинтетических материалов // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 4(56). С. 11-18.



## Creep polytetrafluoroethylene modifications under various loading conditions

I.P. Nikolaeva<sup>1</sup>, L.I. Ogorodov<sup>2</sup>, E.L. Yakovleva<sup>3\*</sup>

<sup>1-3</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

---

Article info	Article history	Keywords
scientific article	Received 09.12.2016	creep polytetrafluoroethylene mechanical equation of states statics cyclical plane stress ultimate strains
doi: 10.18720/CUBS.54.1		

---

### ABSTRACT

Based on the experimental results, we construct an equation of mechanical states, taking into account instantly elastic, viscoelastic, and viscoplastic momentary-elastic strain components using the constancy of the volume of the material terms of the similarity of deviators stresses and strains, as well as the introduction of parameters which are functions of the form of the stress deviator. Equation satisfactorily describes the creep strain at stationary time-dependent static and cyclic loading. An experimental study of deformation and creep in polytetrafluoroethylene (PTFE) in a linear and plane stress was performed. In the process of the experiments true stress was supported, taking into account deformations. It was build the equations of mechanical state, taking into account instantly elastic, viscoelastic, instantaneous-plastic and visco-plastic components of the total deformation. The equation used to describe PTFE strain (F-4, F-4D, F-4D0) when stationary and non-stationary mode cyclic loading in flat tension conditions with condition constant volume of material and similarity of deviators of stresses and strains, as well as with the introduction of the parameters that are functions of the form of the stress deviator. Relevant and difference from the works of other authors are research results creep PTFE modifications at values true stress reaches the limit. The data on the limit creep PTFE modifications included.

---

#### Contact information:

- 1 +7(812)535-07-85, inna4i4n@mail.ru (Inna Nikolaeva, PhD, Associate Professor)  
2 +7(981)827-13-55, l.ogorodov@mail.ru (Leonid Ogorodov, PhD, Associate Professor)  
3\* +7(812)552-63-03, helena47@mail.ru (Elena Yakovleva, PhD, Associate Professor)

## References

- [1] Ilyushin A.A., Pobedrya B.Ye. Osnovy matematicheskoy teorii vyazkouprugosti [Fundamentals of the mathematical theory of viscoelasticity]. Moscow: Nauka, 1970. 280 p. (rus)
- [2] Moskvitin V.V. Soprotivleniye vyazkouprugikh materialov [Resistance of viscoelastic materials]. Moscow: Nauka, 1972. 327 p. (rus)
- [3] Bugakov I.I. Polzuchest polimernykh materialov [Creep of polymer materials]. Moscow: Nauka, 1973. 288 p. (rus)
- [4] Goldman A.Ya. Prochnost konstruktsionnykh plastmass [Strength of structural plastics]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1979. 320 p. (rus)
- [5] Pavlov P.A. Mekhanicheskiye sostoyaniya i prochnost materialov [Mechanical states and strength of materials]. Leningrad: Izd-vo LGU, 1980. 176 p. (rus)
- [6] Aybinder S.B., Tyunina E.L., Tsirole K.I. Svoystva polimerov pri razlichnykh napryazhennykh sostoyaniyakh [Properties of polymers under various stress states]. Moscow: Khimiya, 1981. 232 p. (rus)
- [7] Goldman A.Ya. Prognozirovaniye deformatsionno-prochnostnykh svoystv polimernykh i kompozitsionnykh materialov [Forecasting the deformation-strength properties of polymer and composite materials]. Leningrad: Khimiya, 1988. 272 p. (rus)
- [8] Pavlov P.A. Osnovy inzhenernykh raschetov elementov mashin na ustalost i dlitelnyuyu prochnost [Basics of engineering calculations of machine elements for fatigue and long-term strength]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1988. 252 p. (rus)
- [9] Pavlov P.A., Andreyev A.V. Issledovaniye polzuchesti ftoroplasta-4 v usloviyakh ploskogo tsiklicheskogo napryazhennogo sostoyaniya [Study of the creep of PTFE-4 under conditions of a plane cyclic stress state]. Mekhanika polimerov. 1976. No. 6. Pp. 1099-1103. (rus)
- [10] Pavlov P.A., Krutskikh N.A. Fenomenologicheskoye opisaniye i eksperimentalnoye issledovaniye deformatsionnykh protsessov pri slozhnom termomekhanicheskom nagruzhenii chastichno kristallicheskikh materialov [Phenomenological description and experimental study of deformation processes under complex thermomechanical loading of partially crystalline materials]. Mekhanika kompozitnykh materialov. 1984. No. 6. Pp. 974-979. (rus)
- [11] Pavlov P.A., Yakovleva Ye.L., Krutskikh N.A. Analiticheskoye opisaniye protsessov deformirovaniya i razrusheniya elementov konstruktsiy iz polimernykh materialov [Analytical description of the processes of deformation and destruction of structural elements from polymeric materials]. Trudy LPI. 1983. No. 393. Pp. 3-7. (rus)
- [12] Pavlov P.A., Kosov K.A. Soprotivleniye chastichno kristallicheskikh polimernykh materialov tsiklicheskomu nagruzheniyu pri ploskom napryazhennom sostoyanii [Resistance of partially crystalline polymeric materials to cyclic loading in plane stress state]. Mekhanika kompozitnykh materialov. 1986. No. 6. Pp. 978-986. (rus)
- [13] Belan-Gayko V.N. Eksperimentalnoye issledovaniye polzuchesti polimernogo materiala pri proporsionalnom nestatsionarnom nagruzhenii v usloviyakh ploskogo napryazhennogo sostoyaniya [Experimental study of the creep of polymeric material under proportional nonstationary loading under conditions of plane stress]. Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin. 1992. No. 1. Pp. 105-109. (rus)
- [14] Nikolayeva I.P., Ogorodov L.I., Krasikov S.V. Polzuchest polietilena vysokoy plotnosti pri razlichnykh rezhimakh nagruzheniya [Creep of high-density polyethylene under various loading conditions]. Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy. 2015. No. 12(27). Pp. 50-63. (rus)
- [15] Krollmann Norbert. Verhalten von EPS-Hartschaumstoffen unter langzeitiger Druckbeanspruchung. Dauphgs:k. 2006. Vol. 28. No. 3. Pp. 184-191.
- [16] Beake Ben. Mogelling indentation creep of polymers: a phenomenological approach. J. Phys. D. 2006. Vol. 39. No. 20. Pp. 4478-4485.
- [17] Demidov A.V., Makarov A.G., Stolevich A.M. Varianty matematicheskogo modelirovaniya deformatsionnykh protsessov polimernykh materialov [Variants of mathematical modeling of deformation processes of polymeric materials]. Voprosy materialovedeniya. 2006. No. 3. Pp. 101-110. (rus) Sherstnev V.A., Goldman A.Ya. Ustanovka dlya ispytaniya polimernykh materialov na ustalost v usloviyakh ploskogo napryazhennogo sostoyaniya. Problemy prochnosti. 1976. No. 12. Pp. 111-113. (rus)
- [18] Mitsuo Y., Tadayuki N., Yuichi S., Takayuki N. Creep crack growl characteristics in polyeth-ylene film at various stresses and temperatures. Nihon rairyo kyodo gakkaiishi = J.Jap. Soc. Strength and Fract. Ma-ter. 2006. Vol.40. No 2. Pp. 27-34.
- [19] Girard D., Castagnet S., Gacougnolle J.L., Hosehstetter G. On the relevance of a notcli creep test for the comprehension and prediction of slow crack growth in PVDE. Polym. Test. 2007. Vol.26. No. 7. Pp. 937-948.
- [20] Dian G. Modelling non-linear creep behavior of an epoxy adhesive. Jnt. J. Adhes and Adhes. 2007. 27. No 8. Pp.636-646.

- [21] Rostovtseva N.G., Litvinov A.M., Fedorova S.V., Makarov A.G. Prognozirovaniye deformatsionnykh protsessov polimernykh materialov v usloviyakh menyayushcheysya temperatury [Prediction of deformation processes of polymeric materials under conditions of varying temperature]. Dizayn. Materialy. Tekhnologii. 2009. No. 3. Pp. 69-71. (rus)
- [22] Goludin Ye.P. Variant stokhasticheskoy modeli neizotermicheskoy polzuchesti polivinilkhloridnogo plastika [Variant of the stochastic model of nonisothermal creep of PVC]. Vest. Samar.gos.tekhn. un-ta. Ser.Fiz-mat.nauki. 2009. No. 1. Pp.114-121. (rus)
- [23] Mourad A.-H. J., Fouad H., Elleithy Rabeh. Impact of same environmental conditions on the tensile, creep-recovery, relaxation, melting and crystallinity behavior of UHMWPE-GUR 410-medical grade. Mater. and Des. 2009. Vol. 30. No. 10. Pp. 4112-4119.
- [24] Elksnite J., Maksimov R.D., Zicans J. Mevi R. The effect of small additions of a lignid-crystalline polymer on the mechanical properties of polyethylene. Mech. Compos. Mater. 2010. Vol. 46. No. 1 Pp.77-88.
- [25] Chen Jian, Bell Gerard A., Djng Hanshan, Smith James F., Beake Ben D. J. Phys. D. 2010. Vol. 43. No. 42. Pp.404-425.
- [26] Sherstnev V.A., Goldman A.Ya. Ustanovka dlya ispytaniya polimernykh materialov na ustalost v usloviyakh ploskogo napryazhennogo sostoyaniya [Installation for testing polymeric materials for fatigue under conditions of plane stress]. Problemy prochnosti. 1976. No 12. Pp. 11-113. (rus)
- [27] Ogorodov L.I. Ustanovka dlya ispytaniy polimernykh materialov v usloviyakh ploskogo napryazhennogo sostoyaniya pri sticheskom i tsiklicheskom nagruzhenii [Installation for testing polymeric materials under conditions of plane stressed state under static and cyclic loading]. Mekhanika: RZh.1979. No 1096Dep. (rus)
- [28] Ogorodov L.I., Kotyakov L.F., Kurilovich N.N. Deformirovaniye polikristallicheskih polimernykh materialov v usloviyakh kratkovremennogo nagruzheniya [Deformation of polycrystalline polymer materials under short-term loading conditions]. Nauchno-tehnicheskiye problemy razvitiya proizvodstva khimicheskikh volokon v Belarusi: Materialy tretyey Belorusskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Scientific problems of development of chemicals fibres production in Republic of Belarus]. 2006. Pp.329-333. (rus)
- [29] Belan-Gayko V.N., Ogorodova L.I. Geometricheskoye podobiye deviatorov napryazheniy i skorostey deformatsiy polzuchesti polimernykh materialov v usloviyakh lineynogo, slozhnogo proporsionalnogo i tsiklicheskogo rezhimov nagruzheniya [Geometric similarity of deviators of stresses and rates of deformation of creep of polymeric materials under conditions of linear, complex proportional and cyclic loading regimes]. Materialy desyatoy vserossiyskoy konferentsii: Vuzovskaya nauka – regionu [Proceeding of IX Russian conference: High-education for region]. Vologda: VoGTU, 2012. Pp. 305-310. (rus)
- [30] Loginova I.I., Artamonova D.A., Stolyarov O.N., Melnikov B.Ye. Vliyaniye struktury na vyazkouprugiye svoystva geosinteticheskikh materialov [Influence of structure on viscoelastic properties of geosynthetic materials]. Magazine of Civil Engineering. 2015. No. 4(56). Pp. 11-18. (rus)

*Николаева И.П., Огородов Л.И., Яковлева Е.Л., Ползучесть модификаций политетрафторэтилена при различных режимах нагружения. Строительство уникальных зданий и сооружений, 2017, №3 (54). С. 7-17.*

*Nikolaeva I.P., Ogorodov L.I., Yakovleva E.L. Creep polytetrafluoroethylene modifications under various loading conditions. Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. 3 (54). Pp. 7-17. (rus)*