

Влияние знака нагрузки на характеристики микро- и нанометровых скачков скорости деформации γ -облученного политетрафторэтилена

© В.В. Шпейзман¹, П.Н. Якушев¹, Л.И. Трахтенберг², А.С. Смолянский³

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

² Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН,
Москва, Россия

³ Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова,
Москва, Россия

E-mail: shpeizm.v@mail.ioffe.ru, yak@pav.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 28 мая 2014 г.)

Методом лазерной доплеровской деформометрии впервые проведено прецизионное измерение скорости деформации в режиме одноосного растяжения образцов политетрафторэтилена (PTFE), необлученных и подвергнутых воздействию γ -излучения ⁶⁰Co до дозы 30 кГу при комнатной температуре на воздухе. Сопоставлены результаты деформационных испытаний образцов исходного и γ -облученного PTFE при растяжении и сжатии. Показано, что для скачков как нано-, так и микрометровых масштабов наблюдается тенденция к увеличению их амплитуды при растяжении по сравнению с полученными в условиях одноосного сжатия. Рассчитаны среднеквадратичные отклонения скорости деформации с учетом микромасштабных скачков по всему интервалу деформаций в зависимости от величины напряжений, а также для наномасштабных скачков в пределах перемещения $\Delta l_0 = 0.325 \mu\text{m}$. Обнаружено, что величина среднеквадратичного отклонения растет при переходе от режима испытаний в условиях одноосного сжатия к растяжению, а также больше для γ -облученных образцов, чем для необлученных. В качестве возможной причины зависимости характеристик скачков деформации от вида нагружения рассматриваются особенности поведения ансамбля нано- и микротрещин при растяжении и сжатии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 12-08-00437-а).

1. Введение

Влияние знака одноосной нагрузки на скорость деформации может быть вызвано особенностями эволюции структуры с ростом деформации, связанными с разным поведением ансамбля микротрещин при растяжении и сжатии. Кроме того, для пластичных материалов при сжатии невозможно достичь макроразрушения, что уже свидетельствует о влиянии знака нагрузки на кинетику процессов, проходящих в твердых телах. Многочисленные исследования, в которых сравнивалась деформация при растяжении и сжатии, показали, что при малых деформациях, а также при высоких температурах скорость деформации не зависит от знака нагрузки (см., например, [1]). Однако при больших деформациях или низких температурах кривые деформации при постоянных растягивающих и сжимающих напряжениях могут существенно различаться [2,3].

Использование методов лазерной интерферометрии для измерения скорости деформации привело к новым представлениям о деформации как многоуровневом процессе со скачкообразным изменением ее скорости и величины. С развитием метода анализа деформации на разных ее уровнях путем прецизионного измерения скачков скорости и величины деформации открылись большие возможности исследования ее природы, были предложены новые характеристики деформации: разме-

ры и частоты появления скачков разной величины (от нанометровых до измеряемых несколькими десятками и более микрометров). Размеры и другие характеристики скачков деформации отражают, по нашему мнению, реальные размеры структурных образований, участвующих в деформации (кинетических единиц деформации).

Проведенные исследования показали, что на характеристики скачков скорости и величины деформации влияют изменения структуры, вызванные различной предысторией образца, в частности предварительной деформацией, облучением, воздействием слабого магнитного поля и др. В ранних работах по исследованию скачкообразной деформации полимеров и металлов нижний предел величины скачков деформации составлял $0.6\text{--}1 \mu\text{m}$ [4–8]. В последующих работах благодаря разработке новых приемов анализа результатов, усовершенствованию техники измерений и использованию специальных компьютерных программ обработки результатов удалось наблюдать скачки с размерами от нескольких нанометров до десятков и даже сотен микрометров и проследить закономерности их изменения с деформацией и взаимосвязь развития разноуровневых скачков скорости и величины деформации [9–11]. Опыты проводились на различных металлах, полимерах и композитах. Для ряда полимеров было показано, что стационарная стадия ползучести отсутствует: средняя скорость деформации сначала уменьшается, а затем возрастает. На фоне этого

изменения скорости происходят непрерывные ее колебания разной амплитуды, т. е. кривая ползучести содержит разномасштабные скачки скорости и связанные с ними скачки величины деформации. С ростом деформации размеры нано- и субмикрометровых скачков деформации увеличиваются. Мелкие скачки в некоторых случаях могут объединяться и охватывать большие изменения длины образца, равные десяткам и более микрометров [8,9]. В [10] на примере образцов полиметилметакрилата, предварительно подвергнутых воздействию γ -облучения дозами $D = 55\text{--}330\text{ kGy}$, а также необлученных образцов показано присутствие нанометровых скачков деформации, величина которых зависит от дозы облучения и времени ползучести. Результаты подтверждают положение о существовании в аморфных полимерах доменов с размерами $10\text{--}20\text{ nm}$ и более. При измерении скорости деформации свинца в области больших деформаций показано, что вся кривая деформации, в том числе в магнитном поле, состоит из скачков разной величины и протяженности: от десятков нанометров до сотен микрометров. Магнитное поле приводит к некоторому ускорению деформации и перераспределению вкладов в нее скачков разной величины. Введение магнитного поля в процессе ползучести приводит к кратковременному резкому увеличению скорости деформации и последующему ее спаду до величин, больших или близких к тем, что были до введения поля. Выведение поля сопровождается обратным эффектом. Характеристики скачков деформации на разных масштабных уровнях и величина магнитопластического эффекта зависят от скорости и величины деформации. Особенности поведения свинца связываются с возможной многократной его рекристаллизацией в процессе ползучести [11]. В [12] показано, что для образцов биоуглерода, полученного путем карбонизации дерева бука при различных температурах в области $600\text{--}1600^\circ\text{C}$, прочность зависит от содержания в биоуглероде нанокристаллической фазы. Установлено, что размеры скачков деформации на микро- и нанометровом уровнях зависят от структуры материала и времени нагружения. Показано, что в отличие от поведения пластичных металлов и полимеров интегральные характеристики скачков деформации (среднеквадратичные отклонения распределений скачков скорости деформации) не зависят от величины скорости и коррелируют с предельной деформацией в момент разрушения образца.

Все указанные выше результаты получены в случае испытаний на одноосное сжатие. В настоящей работе приведены результаты исследования скачкообразной деформации при растяжении и проведено их сравнение с уже известными оригинальными данными, полученными при сжатии.

2. Методика эксперимента

Известная по многочисленным исследованиям деформации и разрушения пленочных материалов при одно-

осном растяжении установка (см., например, [4]) была дополнена рядом новых приспособлений, позволяющих проводить прецизионные измерения скорости деформации с помощью лазерного интерферометра. Высокая точность измерений скорости деформации потребовала разработки приспособления, запрещающего паразитные повороты и перемещения подвижной части образца при его деформации.

Испытывались пленочные образцы из политетрафторэтилена (PTFE) толщиной 0.1 mm и рабочей длиной 10 mm . В экспериментах использовались необлученные образцы и образцы, подвергнутые воздействию γ -излучения ^{60}Co до дозы 30 kGy при комнатной температуре на воздухе (мощность дозы 0.2 Gy/s). Образцы PTFE для испытаний на сжатие имели вид цилиндров диаметром 5 mm и высотой 10 mm . Они испытывались при одноосном сжатии в условиях постоянных напряжений $\sigma = 10\text{--}18\text{ MPa}$ и комнатной температуре. По зарегистрированным кривым биений (интерферограммам) с использованием программного обеспечения [13] рассчитывалась скорость деформации на базе последовательных одинаковых изменений длины образца, равных $\Delta l_0 = 325\text{ nm}$ ($\Delta\varepsilon_0 \sim 3 \cdot 10^{-3}\%$), что соответствовало периоду биений. Расчет производился по формуле $\dot{\varepsilon} = \lambda\omega/4\pi l_0$, где $\lambda = 650\text{ nm}$ — длина волны лазера в измерительной схеме, $l_0 = 10\text{ mm}$ — начальная длина образца, ω — частота биений; отсюда следует $\dot{\varepsilon} = 0.52 \cdot 10^{-5}\omega$.

По зависимостям скорости деформации при постоянных напряжениях от величины деформации определялись характеристики микрометровых скачков. Скачки меньших размеров определялись по отклонению формы линий на интерферограммах от синусоидальной [8]. Обработка результатов позволяла измерять параметры неоднородности деформации на разных ее уровнях: от нескольких нанометров до сотен микрометров с шагом дискретизации по времени до 10^{-4} s . Основные измерения проведены на частоте 10^3 Hz , что соответствует временному интервалу между точками на интерферограмме 1 ms . По полученным экспериментальным зависимостям скорости относительной деформации ($\dot{\varepsilon}$) от времени (t) или от изменения длины образца (Δl) определялись амплитуда, частота следования и форма скачков скорости деформации, а также усредненные (сглаженные) зависимости скорости и ее среднеквадратичное отклонение ($\Delta\dot{\varepsilon}$). При вычислении $\dot{\varepsilon}$ и $\Delta\dot{\varepsilon}$ в расчет принималась полная длина образца.

3. Результаты опытов и их обсуждение

На рис. 1, 2 показаны результаты испытаний на растяжение и сжатие облученных и необлученных образцов PTFE. На рис. 1 приведены кривые деформации при трех последовательно изменяющихся напряжениях: 10 , 14 и 18 MPa . Видно, что для необлученных образцов кривые деформации для растяжения (*a*) и сжатия (*b*) различа-

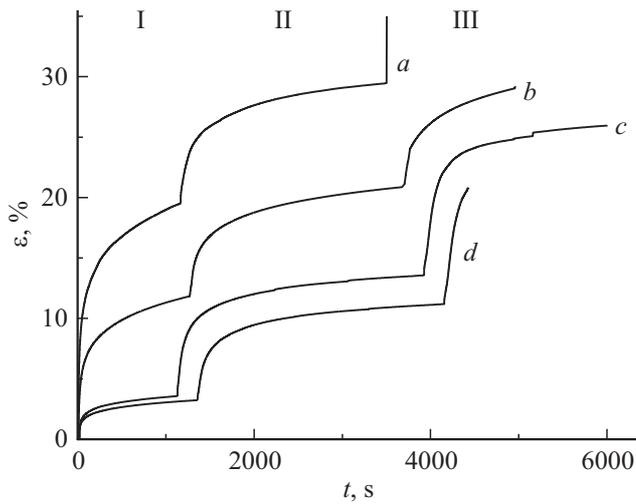


Рис. 1. Кривые деформации при последовательном увеличении напряжений: 10 (I), 14 (II), 18 МПа (III). *a, c* — растяжение, *b, d* — сжатие; *a, b* — необлученные, *c, d* — облученные образцы.

ются уже при малых напряжениях. Первая расположена выше второй, а при напряжении 18 МПа образец при растяжении сразу разрушался. Различие в поведении пленок при растяжении и цилиндрических образцов при сжатии, очевидно, связано не только с влиянием знака нагрузки, но и в первую очередь с их разными структурными характеристиками. Более интересно то, что для облученных образцов начальные области кривых при растяжении (*c*) и сжатии (*d*) близки. Это может означать, что при малых напряжениях сопротивление деформации в данном случае определяется дефектами, возникшими при облучении, а исходные дефекты играют второстепенную роль.

Зависимости скорости деформации, определенной по частоте биений на интерферограммах, от времени представлены на рис. 2, *a–d*. В отличие от плавных кривых на рис. 1 зависимости скорости деформации от времени при растяжении внешне не отличаются от аналогичных зависимостей, полученных при сжатии, и состоят из скачков скорости деформации разной величины. Рас-

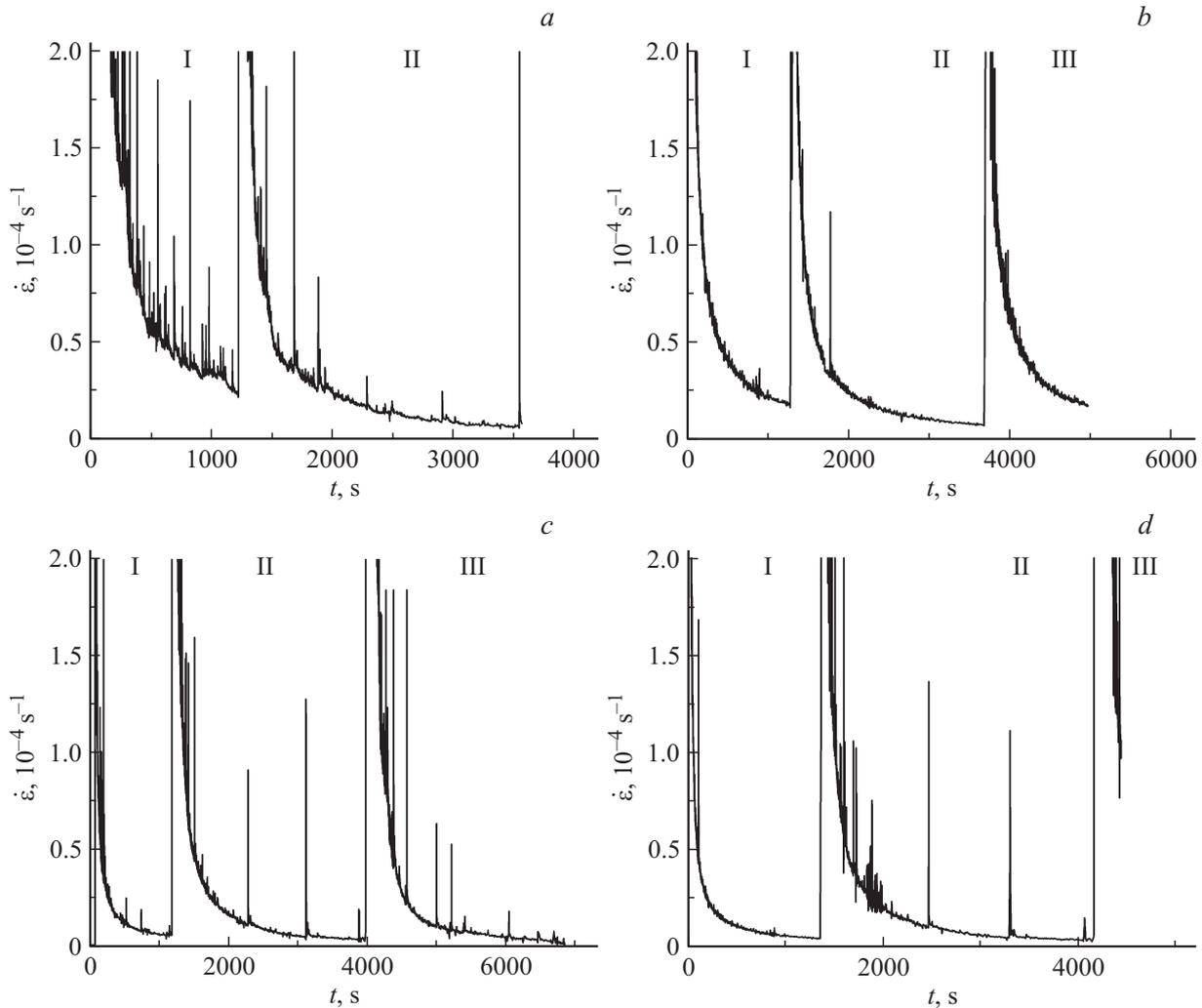


Рис. 2. Зависимости скорости деформации от времени. Обозначения те же, что на рис. 1.

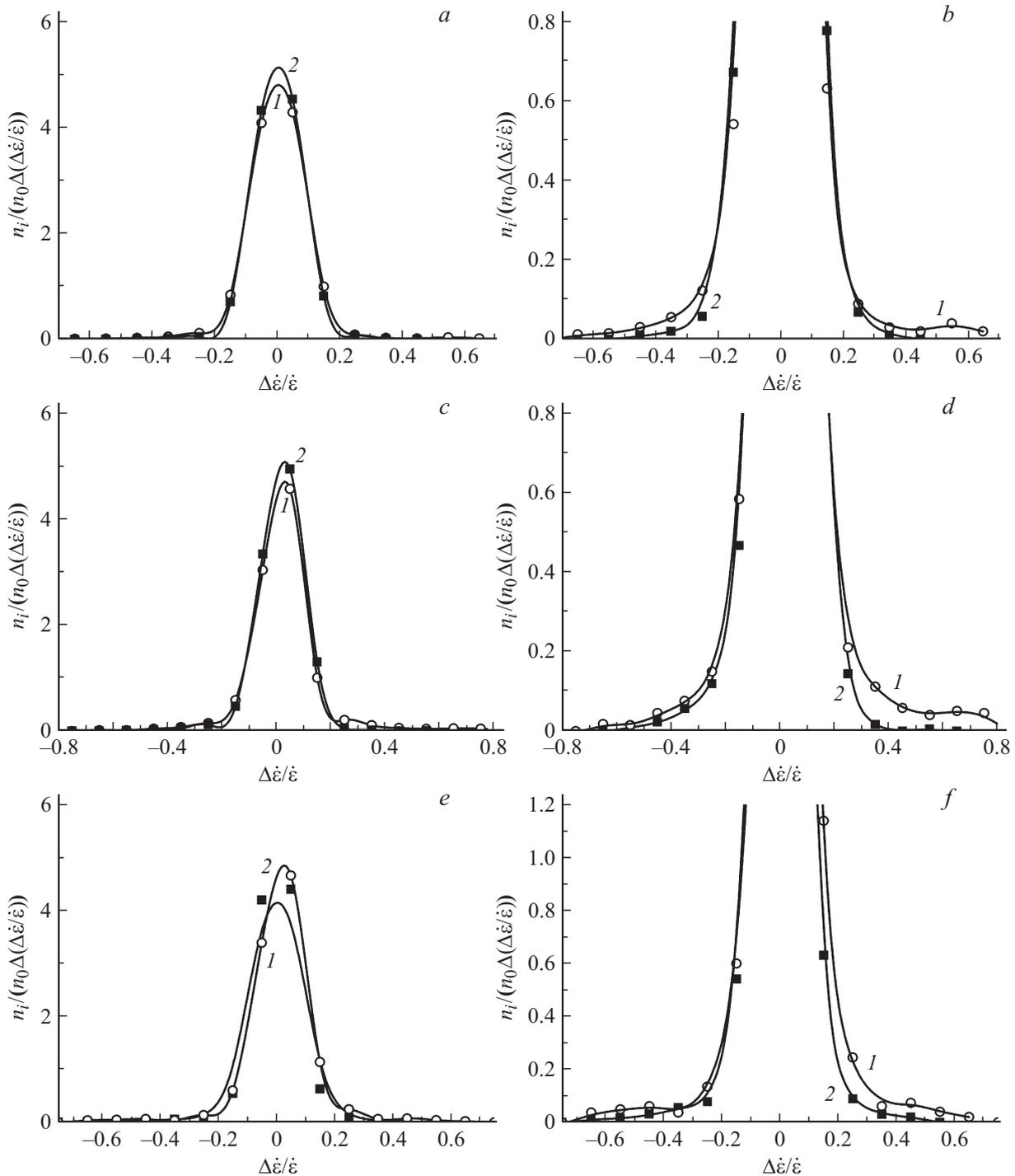


Рис. 3. Примеры распределений числа микрометровых скачков скорости деформации по их размерам (*a, c, e*) и „хвосты“ распределений (*b, d, f*). *a, b*: необлученные образцы, напряжение 10 МПа, *1* — растяжение, *2* — сжатие; *c, d*: облученные, 18 МПа, *1* — растяжение, *2* — сжатие, *e, f*: растяжение, 14 МПа, *1* — облученный, *2* — необлученный.

предления числа скачков скорости $\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}$ (плотности вероятности $n_i/[n_0\Delta(\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon})]$, где n_i — число скачков в десятипроцентном интервале изменения скорости: от $(\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon})_i - 0.05$ до $(\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon})_i + 0.05$; n_0 — полное число скачков) для различных типов образцов и условий нагружения приведены на рис. 3, *a, c, e*, а среднеквадратичные отклонения распределений $\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}$ — в табл. 1. В своей

средней части распределения $\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}$ мало отличаются друг от друга, разными являются положения максимумов и число самых малых и самых больших скачков скорости деформации. Основное отличие распределений скачков скорости в зависимости от знака нагрузки, а также облученных и необлученных образцов заключается в поведении „хвостов“ распределений, отдельно

Таблица 1. Характеристики скачков скорости деформации политетрафторэтилена при растяжении и сжатии

Параметр	Сжатие			Растяжение		
Необлученные образцы						
σ , МПа	10	14	18	10	14	18
$\overline{\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}}$	0.056	0.061	0.053	0.084	0.113	—
L , μm	4–8	4–10	4–10	8–10	8–10	—
	20–50	30–50	30–50	40–50	30–50	
Облученные образцы						
σ , МПа	10	14	18	10	14	18
$\overline{\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}}$	0.074	0.083	0.077	0.134	0.161	0.153
L , μm	2–8	3–6	3–8	2–10	2–7	3–10
	10–30	10–40	15–40	40–70	30–60	40–70

показанных на рис. 3, *b, d, f*. Число крупных скачков определяет и величину среднеквадратичного отклонения распределений $\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}$ (табл. 1). Как видно из рис. 3 и табл. 1, его величина больше для облученных образцов и при растяжении больше, чем при сжатии. Зависимости среднеквадратичного отклонения распределений $\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}$ от величины напряжений для РТФЕ в выбранном интервале напряжений не обнаружено.

В [13] анализировались скачки скорости деформации РТФЕ при сжатии. Был выбран участок ползучести с примерно постоянной малой скоростью, и рассматривались только абсолютные величины положительных скачков $\Delta\dot{\epsilon}$, т. е. в сторону увеличения скорости. Полученное в [13] распределение скорости соответствовало половине распределений, показанных на рис. 3: от значений скорости, близких к нулю, до максимальных скоростей. При этом статистика малых по величине скачков соответствовала статистике случайных процессов, а большие скачки ей не подчинялись. Данные, приведенные на рис. 3, показывают, что относительные величины $\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}$ малых и больших скачков — как положительных, так и отрицательных — в первом приближении следуют выводам [13]. Однако можно отметить различие поведения крупных скачков: положительных заметно больше, чем отрицательных. Поскольку деформация в направлении, противоположном действующей силе, маловероятна, минимальное значение $\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon} = -1$, что означает кратковременную остановку деформации, а максимальное может быть больше единицы.¹ В наших опытах заметное изменение $\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}$ наблюдалось в интервале от -0.9 до 1.3 , а отдельные скачки скорости деформации достигали $\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon} = 5-8$.

Размер микрометровых скачков деформации L определялся по расстояниям между близкими по величине скачками скорости на зависимостях $\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}(\Delta l)$ [4–9]. При-

¹ Кратковременная деформация в направлении, противоположном приложенной силе, обсуждалась в [8]. Однако в том случае эффект был связан с удалением нагруженного образца из магнитного поля.

мер участка такой зависимости для облученных образцов РТФЕ при напряжениях 10 МПа приведен на рис. 4, а результаты — в табл. 1. Скачки L размером несколько единиц и десятков микрометров наблюдались для облученных и необлученных образцов и при растяжении, и при сжатии. При растяжении больше отношение скоростей в скачке и до (после) него; отсюда на фоне меньших, чем при сжатии, скоростей деформации для одинаковых напряжений больше величина $\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}$. Крупные скачки размером 100–150 μm встречались редко, в основном при большой скорости деформации, и их появление было нерегулярным (см. также [8]).

Характеристики нанометровых скачков деформации определялись по искажению формы биений на интерферограммах [8]. Рассчитывались среднеквадратичное отклонение сигнала $\overline{\Delta U/U_0}$ на базе перемещений $\Delta l_0 = 325 \text{ nm}$ и величина нанометровых скачков деформации L для растяжения и сжатия облученных и необлученных образцов РТФЕ. Примеры зависимостей $\Delta U/U_0(\Delta l)$ приведены на рис. 5, а полные результаты сведены в табл. 2. Как следует из этой таблицы, закономерности изменения $\overline{\Delta U/U_0}$ для нанометровых скачков в случае сжатия и растяжения, а также при сравнении облученных и необлученных образцов подобны описанным выше для аналогичной характеристики при микрометровых скачках: при растяжении $\overline{\Delta U/U_0}$ заметно больше, чем при сжатии, а $\overline{\Delta U/U_0}$ для необлученных образцов несколько ниже, чем для облученных. Зависимости величины разброса $\overline{\Delta U/U_0}$ от скорости деформации, наблюдаемой в [9] для РТФЕ в интервале скоростей деформации $(0.5-6.5) \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, в настоящей работе для более высоких скоростей деформации не обнаружено. Отличие измерений $\overline{\Delta U/U_0}$ в [9] от приведенных в настоящей работе заключается в том, что в [9] рассматривались последовательные биения при постоянном напряжении, которые при малой скорости деформации сильно отличались по частоте, а данные табл. 2 получены при изменяющихся напряжениях. Если

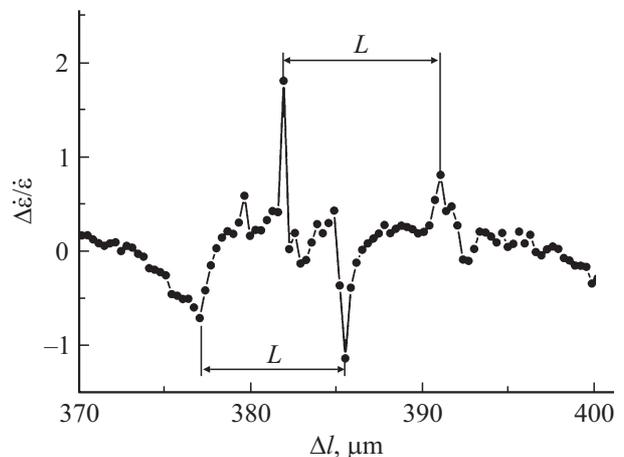


Рис. 4. Пример скачка с $L = 8 \mu\text{m}$ при растяжении облученного образца, $\sigma = 10 \text{ МПа}$.

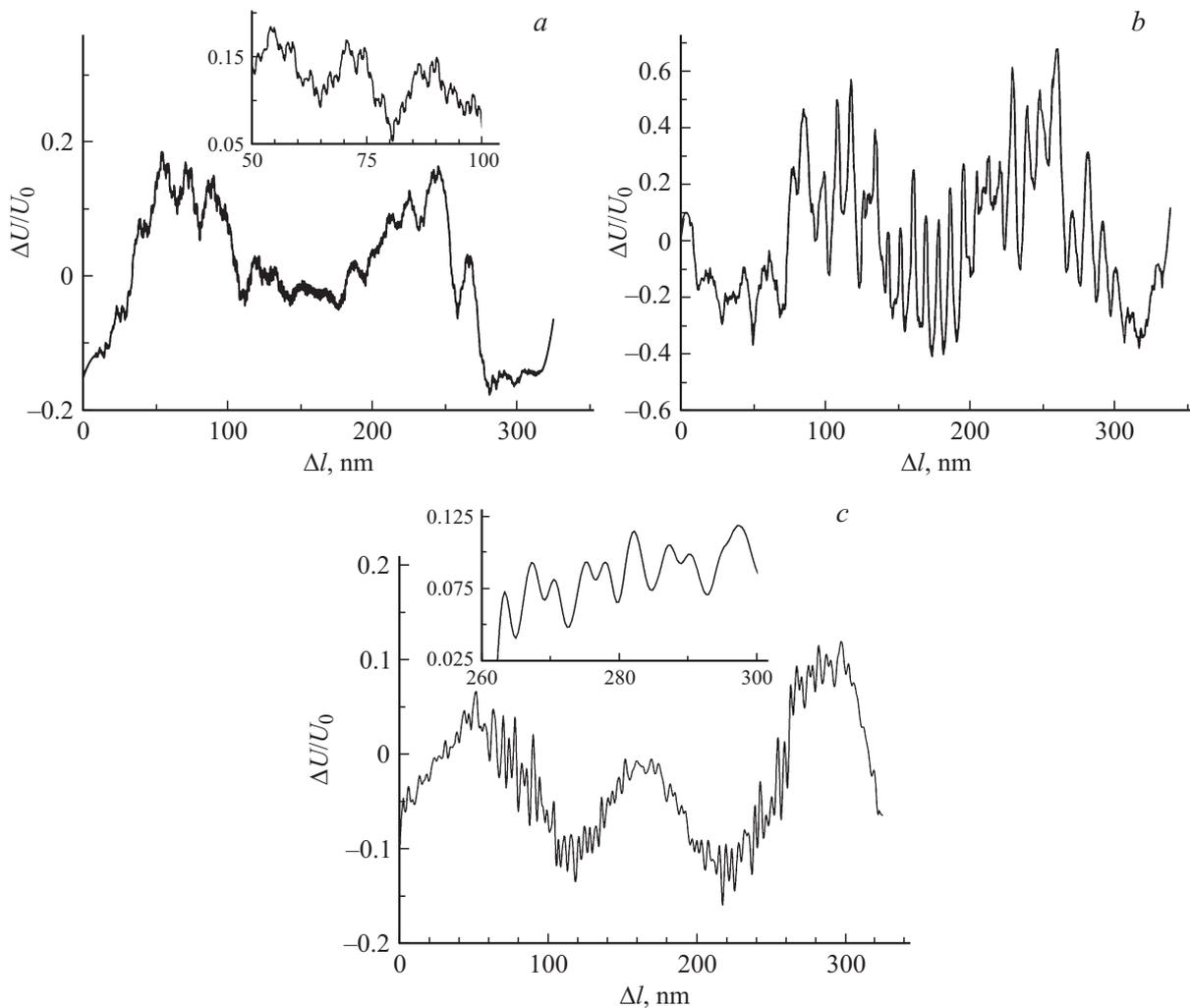


Рис. 5. Нанометровые скачки деформации при растяжении (*a, b*) и сжатии (*c*) облученных (*a, c*) и необлученного (*b*) образцов при напряжениях 14 (*a*) и 10 МПа (*b, c*). На вставках в увеличенном виде показаны отдельные участки соответствующих зависимостей $\Delta U/U_0(\Delta l)$.

же сравнивать величины $\overline{\Delta U/U_0}$ для постоянных напряжений, то тенденция к увеличению $\overline{\Delta U/U_0}$ при уменьшении скорости деформации в большинстве случаев сохраняется. Обнаружено увеличение разброса скорости деформации при растяжении по сравнению со сжатием как на микрометровом, так и на нанометровом уровне.

Нанометровые скачки деформации можно условно разделить на три группы по размерам L_1 : мелкие (до 20 nm), средние (40–70 nm) и крупные (90–180 nm). Мелкие и крупные скачки присутствовали во всех рассмотренных случаях, а средние не наблюдались при $\sigma = 10$ МПа. Из данных, приведенных в табл. 2, следует, что только самые малые скачки при растяжении и сжатии отличаются по размерам, при сжатии их размер L_1 меньше, чем при растяжении. Именно это, по-видимому, обуславливает более высокие значения характеристики разброса скорости деформации на нанометровом уровне $\overline{\Delta U/U_0}$ при растяжении, чем при сжатии. Поскольку число малых скачков велико, они вносят большой вклад в

разброс скорости деформации на нанометровом уровне. Что касается микрометровых скачков, то и для них наблюдается в большинстве случаев увеличение размера L после облучения и при переходе от сжатия к растяжению. Возможное объяснение этого эффекта заключается в том, что знак шарового тензора напряжений оказывает влияние на соотношение положительных и отрицательных скачков деформации, т.е. растяжение способствует появлению большего числа ускорений деформации (рис. 2). Это может быть связано с разным поведением ансамбля нано- и микротрещин в процессе деформации на разных ее уровнях и их влиянием на характеристики деформации. Для растяжения при ступенчатом нагружении всегда можно достичь разрушения образца. В аналогичном испытании при сжатии макроразрушение не достигается. Поскольку отличие в характеристиках скачков скорости деформации при растяжении и сжатии наблюдается уже на ранних стадиях деформации, эти изменения в кинетике деформации можно трактовать

Таблица 2. Характеристики нанометровых скачков деформации облученного и необлученного политетрафторэтилена

Растяжение, необлученные образцы										
σ , МПа	10		14					18		
t , s	720	1260	1265	2180	2500	2990	3570		3583	
$\dot{\epsilon}$, 10^{-5} s^{-1}	4.30	2.36	130	1.97	1.38	0.84	0.71		1.08	
$\frac{\Delta U}{U_0}$	0.083	0.093	0.074	0.096	0.099	0.090	0.094		0.088	
L_1 , nm	8–15, 120–150		10–15, 40–60, 120–150					10, 100–120		

Растяжение, облученные образцы										
σ , МПа	10		14			18			18 (в скачке $\dot{\epsilon}$)	
t , s	153	1118	1428	2309	2621	4007	4168	4612	5109	5926
$\dot{\epsilon}$, 10^{-5} s^{-1}	4.85	0.60	6.50	1.16	0.86	62.5	11.1	0.65	0.47	0.89
$\frac{\Delta U}{U_0}$	0.097	0.128	0.089	0.084	0.090	0.054	0.117	0.128	0.097	0.075
L_1 , nm	10–20, 90–180					10–20, 40–70, 120–180				

Сжатие, необлученные образцы										
σ , МПа	10		14			18			18	
t , s	36.5	203	1157	1487	2287	3958	4043			
$\dot{\epsilon}$, 10^{-5} s^{-1}	2.1	0.26	0.05	1.14	0.13	0.04	1.09			
$\frac{\Delta U}{U_0}$	0.029	0.030	0.037	0.032	0.043	0.050	0.029			
L_1 , nm	3–5, 110–150					4–12, 50–80, 120–150				

Сжатие, облученные образцы										
σ , МПа	10		14			18			18	
t , s	45	234	1130	1330	1509	3187	3702	4117	4888	
$\dot{\epsilon}$, 10^{-5} s^{-1}	2.80	0.88	0.15	2.60	0.57	0.10	3.0	0.21	0.12	
$\frac{\Delta U}{U_0}$	0.030	0.037	0.047	0.036	0.051	0.053	0.029	0.041	0.057	
L_1 , nm	4–8, 100–180					4–12, 50–70, 120–180				

как влияние процесса, приводящего в конечном счете к разрушению образца.

4. Заключение

Впервые проведенные измерения характеристик скачков скорости и величины деформации при растяжении подтвердили общность представлений о деформации как многоуровневом процессе, скорость которого изменяется скачками разной величины и протяженности. Предварительное облучение образцов создает новые дефекты и не только уменьшает среднюю скорость деформации при заданном напряжении, но и изменяет характеристики скачков скорости и величины деформации. Вид напряженного состояния (изменение знака напряжений при одноосном нагружении) также влияет на скачки скорости и величины деформации. В работе проанализировано поведение двух характеристик скачкообразной деформации РТФЕ при различных напряжениях: величины деформации в скачке (период повторяемости скачков по шкале деформации) и среднеквадратичного отклонения скорости от среднего в данный момент

значения, определенного по плавной кривой изменения скорости деформации в опыте. Обе характеристики использованы для анализа микро- и нанометровых скачков деформации. Показано, что для скачков как нано-, так и микрометровых масштабов наблюдается тенденция к увеличению их амплитуды при растяжении по сравнению с полученными в условиях одноосного сжатия, причем наибольшее различие наблюдается для самых малых из доступных для измерения наномасштабных скачков скорости ползучести (порядка нескольких нанометров) и микромасштабных скачков максимальной амплитуды (100–200 μm). Среднеквадратичные отклонения скорости деформации для микромасштабных ее скачков были рассчитаны во всем интервале деформаций при постоянном напряжении. Для наномасштабных скачков расчет среднеквадратичного отклонения проводился в пределах перемещений (деформаций) 325 nm, что соответствует одному биению на интерферограмме. Обнаружено, что величина среднеквадратичного отклонения растет при переходе от режима испытаний в условиях одноосного сжатия к растяжению, а также больше для γ -облученных образцов, чем для необлученных. Роль предварительного

облучения заключается, очевидно, в изменении дефектной структуры. Влияние знака нагрузки на характеристики скачков деформации можно связать с разным поведением ансамбля нано- и микротрещин в процессе деформации на разных ее уровнях.

Список литературы

- [1] В.А. Степанов, Н.Н. Песчанская, В.В. Шпейзман. Прочность и релаксационные явления в твердых телах. Наука, Л. (1984). 245 с.
- [2] Т.С. Орлова, Б.И. Смирнов, В.В. Шпейзман. ФТТ **23**, 7, 1981 (1981).
- [3] В.В. Шпейзман, В.И. Николаев. ФТТ **40**, 260 (1998).
- [4] Н.Н. Песчанская. Высокомолекуляр. соединения А **31**, 1181 (1989).
- [5] Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев. ФТТ **40**, 1635 (1998).
- [6] Н.Н. Песчанская, А.Б. Синани. ФТТ **50**, 177 (2008).
- [7] Н.Н. Песчанская, Б.И. Смирнов, В.В. Шпейзман. ФТТ **50**, 815 (2008).
- [8] В.В. Шпейзман, Н.Н. Песчанская. ФТТ **53**, 1169 (2011).
- [9] В.В. Шпейзман, П.Н. Якушев, Н.Н. Песчанская, Ж.В. Мухина, А.С. Смолянский, А.С. Шведов. ФТТ **54**, 1156 (2012).
- [10] В.В. Шпейзман, Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев, А.С. Смолянский, А.С. Шведов, В.Г. Черемисов. ФТТ **52**, 248 (2010).
- [11] В.В. Шпейзман, П.Н. Якушев. ФТТ **55**, 1765 (2013).
- [12] В.В. Шпейзман, Т.С. Орлова, Б.К. Кардашев, Б.И. Смирнов, A. Gutierrez-Pardo, J. Ramirez-Rico. ФТТ **56**, 522 (2014).
- [13] А.С. Шведов, В.Г. Черемисов, Н.Н. Песчанская, В.В. Шпейзман, П.Н. Якушев, А.С. Смолянский, С.Г. Лакеев. *Вопр. атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру.* Науч.-техн. сб. В. 3. ФГУП „НИИП“, М. (2010). С. 77.