

07 Скачкообразная деформация полиметилметакрилата в области микропластичности

© В.В. Шпейзман¹, П.Н. Якушев¹, Ж.В. Мухина^{2,3}, Е.В. Кузнецов³, А.С. Смолянский³

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

² Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,
Москва, Россия

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

E-mail: shpeizm.v@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 27 сентября 2012 г.)

Измерена скорость деформации с шагом 325 nm при одноосном сжатии на начальной стадии ползучести и при возврате формы образца полиметилметакрилата после разгрузки, а также влияние на нее небольших доз γ -облучения и выдержки образцов в магнитном поле. Показано, что предварительное слабое воздействие радиации и магнитного поля на структуру образцов РММА может вызвать небольшое упрочнение в области микропластичности. Определены размеры скачков деформации на микро- и нанометровом уровнях. Воздействие облучения и выдержки в магнитном поле проявляется в перераспределении вкладов в деформацию скачков разной величины.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 12-08-00437-а и № 11-07-00608-а) и Министерства образования и науки (государственные контракты № 11.519.11.6032 и 02.740.11.0652).

1. Введение

Явлению скачкообразной деформации твердых тел посвящено значительное число исследований (см. например [1–5]). Если первоначально ее связывали с действием каких-то особых процессов, препятствующих плавному течению деформации [1–3], то в последнее время стали развиваться представления о том, что скачки присущи самой природе деформации. Размер скачков определяется структурой материала, возникающей на последовательных стадиях деформирования, которая в свою очередь зависит от исходной структуры и пути деформации [5–9]. Особый интерес вызывают нано- и микрометровые скачки деформации. Во-первых, чем мельче скачок деформации, тем он ближе к ее элементарному акту, что может прояснить физический механизм процесса. Во-вторых, миниатюризация элементов современной электронной техники требует знания локальных механических характеристик используемых материалов и умения получать и обрабатывать большие массивы данных, представляющих локальные свойства твердых тел. В этом направлении успешно развивается микроиндентирование, а с недавнего времени — наноиндентирование [10]. Возможность иметь готовый стандартный прибор для измерения механических характеристик нанометровых объемов твердого тела, безусловно, привлекательна. Однако не следует забывать, что локальное нагружение — это отнюдь не самый распространенный в природе вид нагружения. Большинство тел подвержено действию объемной нагрузки, при этом самые разные по размерам локальные объемы дефор-

мируются по-разному, взаимодействуют между собой, скорости их деформации непрерывно изменяются, что отражается на поведении средней скорости деформации нагруженного тела. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе для измерения линейной деформации используется лазерный интерферометр, позволяющий измерять скорость линейных перемещений (деформаций) на базе $\sim 0.3 \mu\text{m}$ (в некоторых случаях $0.15 \mu\text{m}$) [11] и проводить сравнение относительных изменений скорости деформации во времени на базе перемещений до нескольких nm [12]. Цикл работ, посвященных этой тематике [7–9, 12–13], позволил выявить скачки деформации на разных уровнях, от нано- до миллиметровых, для различных по своей природе тел (металлов, полимеров, композитов и др.), проследить кинетику их изменения по мере развития деформации, зависимость от предварительного воздействия на структуру (термического, радиационного, выдержки в магнитном поле и др.).

Применение прецизионного метода записи деформации во времени, измерение скорости с малым шагом по деформации позволило детально изучить форму скачков деформации, анализировать плавные и резкие изменения ее скорости, обнаружить периодические и аперриодические скачки, одиночные скачки и состоящие из нескольких более мелких скачков и т.д. Развитые методы обработки результатов эксперимента в сочетании с методами информационных технологий, такими как, например, метод фликкер-шумовой спектроскопии [14], дают возможность получить принципиально новую информацию о кинетике деформации твердых тел.

В настоящей работе исследовалась эволюция скачков скорости и величины деформации на нано- и микрометровых уровнях при сжатии полиметилметакрилата на начальной стадии, когда деформация практически полностью обратима. Изменялись характеристики скачков деформации на стадии нагружения и восстановления формы образца после разгрузки. Изучалось также влияние предварительного воздействия на образцы γ -облучения и магнитного поля с индукцией $B = 1.8$ Т.

2. Методика эксперимента

Исследовали скорость деформации полиметилметакрилата (РММА) при одноосном сжатии в условиях постоянных напряжений и комнатной температуре. По зарегистрированным кривым биений (интерферограммам) при помощи специально разработанного программного обеспечения [14] определяли скорость деформации на базе последовательных одинаковых изменений длины образца, равных $\Delta l = 325$ нм ($\Delta \epsilon \sim 3 \cdot 10^{-5}$), что соответствовало периоду биений. Таким образом можно было анализировать скачки деформации размером $\sim 0.5 \mu\text{m}$ и более. Скачки меньших размеров определялись по отклонению формы линий на интерферограммах от синусоидальной [12]. Обработка результатов позволяла измерять параметры неоднородности деформации на разных ее уровнях от нескольких единиц нм до $100\text{--}150 \mu\text{m}$ с шагом дискретизации по времени до 10^{-4} с. По зависимостям скорости деформации от ее величины (времени) определяли характеристики скачков скорости (амплитуду, частоту следования, форму). Принципиальным отличием настоящего исследования от выполненных ранее [15–17] является автоматизированное определение скорости деформации, позволяющее анализировать полную кривую скорости, записанную с шагом 325 нм, в то время как ранее делалась выборка из 10–15 измерений. Новые возможности методики делают доступными для анализа не изученные в [15–17] области деформации (например, совсем малые деформации), а также позволяют использовать статистические методы исследования.

Полимерные образцы в виде цилиндров диаметром 5 и высотой 10 мм испытывали при малых напряжениях $\sigma = 20\text{--}50$ МПа. После достижения образцом деформации $\epsilon = 4\text{--}5\%$ он разгружался и записывалась кривая восстановления его формы во времени, которая имела вид, подобный кривой нагружения. Из полученных экспериментальных зависимостей скорости относительной деформации ($\dot{\epsilon}$) от времени t или от изменения длины образца (Δl) определяли усредненные (сглаженные) зависимости скорости и ее среднеквадратичную ошибку $\Delta \dot{\epsilon}$ (отклонение от усредненной кривой), зависимость величины деформации от времени и характеристики колебаний скорости и величины деформации (скачков). При вычислении $\dot{\epsilon}$ и $\Delta \dot{\epsilon}$ в расчет принималась полная длина образца.

Перед механическими испытаниями образцы, находящиеся в вакуумной камере, подвергались γ -облучению от источника ^{60}Co до доз от 5 до 100 кГу. Для изучения влияния предварительной выдержки в магнитном поле на деформационные свойства полимеров образцы помещались в поле мощного электромагнита циклотрона. Как показали измерения, индукция постоянного магнитного поля в месте расположения образцов составляла $B = 1.8$ Т. Время работы циклотрона было 4–5 ч в сутки, общее время пребывания образцов в магнитном поле ~ 200 ч.

3. Результаты опытов и их обсуждение

3.1. Влияние облучения на скорость деформации. В [15–17] рассмотрено влияние облучения на скорость ползучести РММА и показано, что при больших деформациях облучение приводит к увеличению скорости и величины деформации, измеренными при одинаковом времени от начала ползучести, и к ускоренному разрушению. Область малых деформаций в [15–17] не обсуждалась, однако из приведенных в [15]

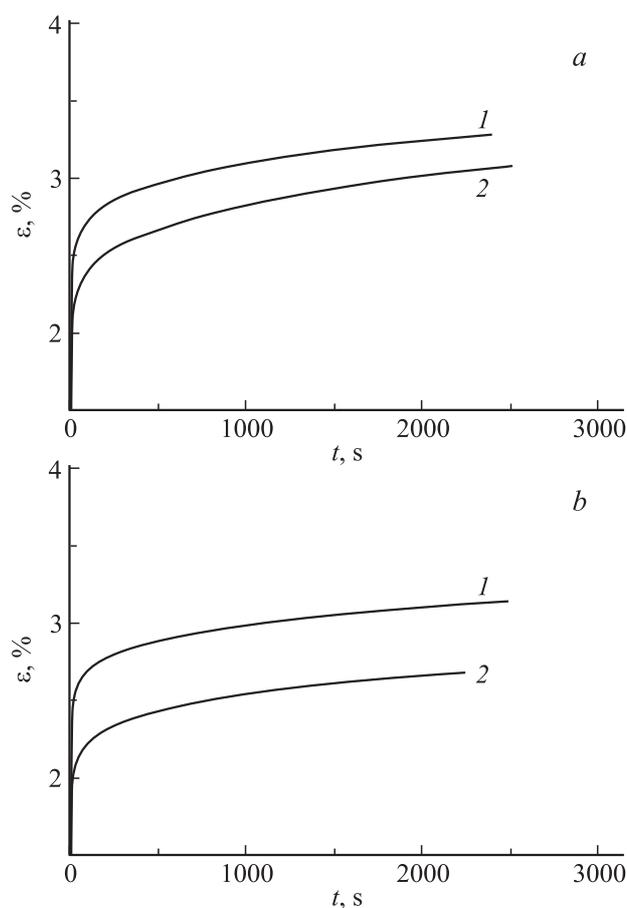


Рис. 1. Начальные стадии кривых ползучести РММА при напряжении $\sigma = 50$ МПа при разной дозе облучения, кГу: 5 (1), 20 (2). Выдержка образцов в магнитном поле $B = 1.8$ Т, t , h: 0 (а), 200 (б).

зависимостей скорости от величины деформации при разных дозах облучения можно заметить, что при малых дозах (до 100 кГу) наблюдается anomальная зависимость: скорость деформации уменьшается при увеличении дозы облучения. Наши измерения с использованием более совершенного метода определения скоростей с помощью специально разработанной программы обработки данных подтвердили этот результат (рис. 1). Сравнение величины деформации РММА образцов при одинаковом времени действия напряжений $\sigma = 50$ МПа показывает, что переход от дозы предварительного облучения 5 к 20 кГу снижает эту величину на $\sim 10\%$ для исходных образцов и на $\sim 15\%$ для побывавших в магнитном поле. Следовательно, малые дозы облучения могут приводить к некоторому упрочнению материала, в отличие от противоположного действия больших доз. Это еще раз свидетельствует об общности представлений о том, что слабые воздействия могут позитивно влиять на свойства твердых тел. Например, в [18,19] было показано, что при одновременном действии электрического поля и нагрузки прочность сегнетоэлектриков слегка возрастает в слабых полях и уменьшается в сильных полях. Аналогичным образом ведет себя напряжение пробоя: увеличивается при малых механических нагрузках и падает при больших. Предварительная деформация, как известно, также может играть двоякую роль: создавать высокие локальные напряжения или, наоборот, способствовать уменьшению (релаксации) уже имеющихся в твердом теле больших перенапряжений. По-видимому, в слабых воздействиях разной природы превалирует вторая, релаксационная составляющая воздействия. В РММА, как отмечается в [16], малые дозы γ -облучения (5–50 кГу) вызывают аномалии в процессе радикалообразования, что может быть причиной зависимости скорости деформации от дозы облучения.

3.2. Влияние предварительной выдержки образцов в магнитном поле на скорость деформации. Как следует из рис. 2, выдержка в магнитном поле с индукцией 1.8 Т слегка уменьшает скорость и величину деформации ползучести РММА, т.е. упрочняет материал. Величина деформации при длительности действия нагрузки ($\sigma = 50$ МПа) $t = 1$ h уменьшается на $\sim 4\%$ для образцов с дозой облучения 5 кГу и на $\sim 12\%$ для образцов с дозой облучения 20 кГу. Многочисленные исследования влияния магнитного поля, как постоянного, так и импульсного, на деформацию полимеров ниже температуры стеклования показали, что и действие поля в процессе деформации, и предварительное воздействие магнитного поля приводит в большинстве случаев к ускорению деформации, т.е. к разупрочнению [5–9,15–17]. Однако иногда наблюдается и противоположный эффект. В [17,20] отмечается, что знак эффекта и его величина зависят от скорости и величины деформации, а также от дозы облучения. В [20] подобное поведение магнитоэластического эффекта объясняется различием во временах магнитной и механической

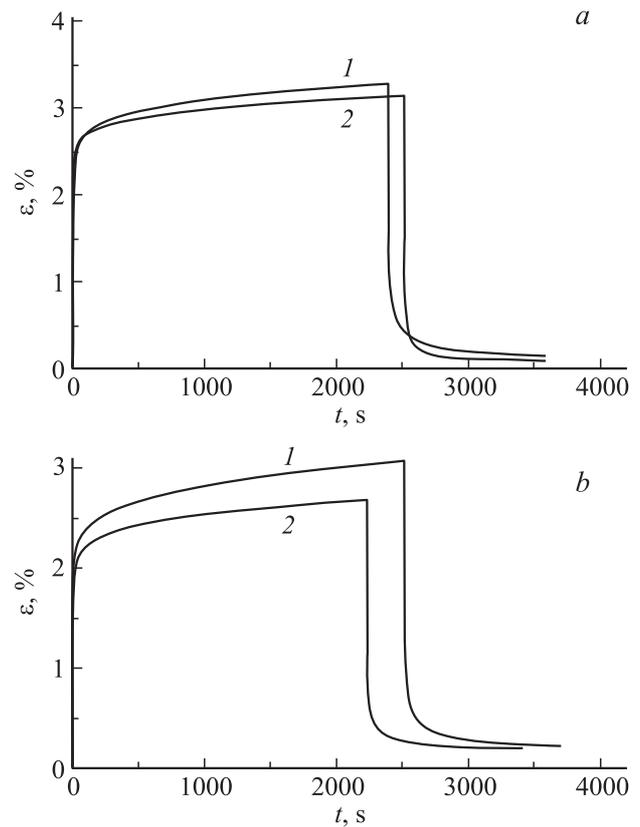


Рис. 2. Влияние выдержки в магнитном поле $B = 1.8$ Т на начальную стадию кривых ползучести при напряжении $\sigma = 50$ МПа и деформации обратного знака после разгрузки для образцов РММА с дозой облучения 5 (а) и 20 (б) кГу. 1 — исходные образцы, 2 — после выдержки в магнитном поле.

релаксации на разных этапах деформации полимера. Можно полагать, что в области малых деформаций предварительная выдержка образцов в магнитном поле приводит к ориентации отдельных участков молекулы полимера, что аналогично воздействию деформации [17].

Следует заметить, что в настоящей работе в отличие от ранее упоминавшихся величина индукции постоянного магнитного поля, в котором находились образцы, была на порядок выше ($B = 1.8$ Т). Если сравнивать ее с импульсными полями, которые также неоднократно использовались для воздействия на структуру полимеров, то она уступает им по величине, но значительно превосходит по времени воздействия. Другой особенностью воздействия поля было отсутствие непрерывности работы электромагнита. Дробность воздействия и длительные периоды отдыха могли сказаться на величине эффекта.

3.3. Возврат деформации после снятия нагрузки. На рис. 2 кроме изменения деформации во времени при ползучести образцов РММА показана также деформация образца при последующей разгрузке, (возврат деформации), а на рис. 3 изменение скорости

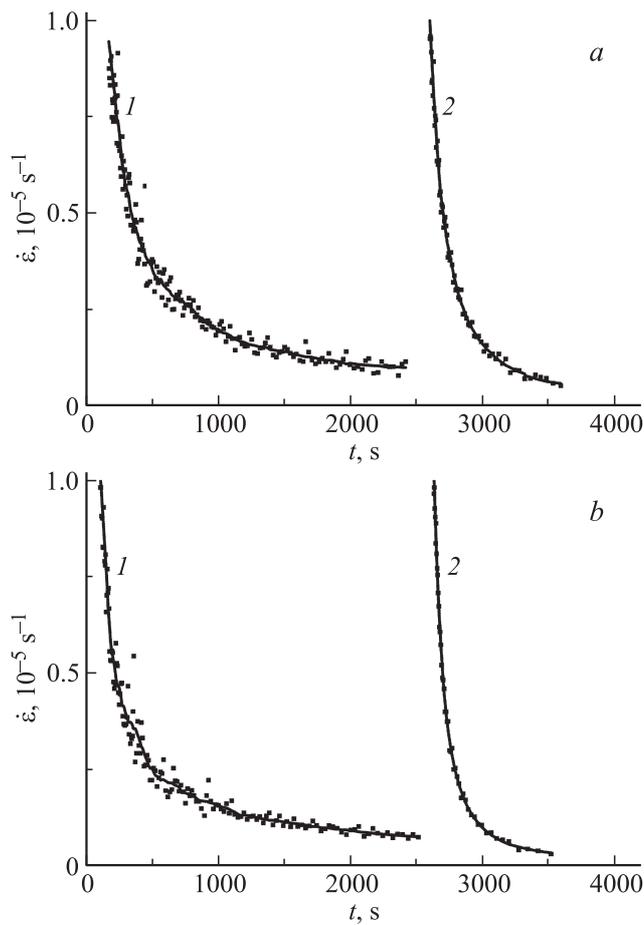


Рис. 3. Изменение абсолютной величины скорости ползучести при напряжении $\sigma = 50$ МПа и деформации обратного знака после разгрузки для образцов РММА с дозой облучения 5 кГу; *a* — исходные образцы, *b* — после выдержки в магнитном поле.

деформации ползучести и возврата.¹ Данные на рис. 3 являются первичными, т.е. именно они были получены в опытах, а кривые, изображенные на рис. 1 и 2, получены их интегрированием. На рис. 3 показаны участки со скоростями деформации, меньшими по абсолютной величине 10^{-5} s^{-1} . Заметим, что большая часть возврата деформации происходит в момент разгрузки и при скоростях деформации, больших 10^{-5} s^{-1} .

Из рис. 2 следует, что при заданном напряжении и комнатной температуре возврат деформации происходит практически полностью. При этом крутизна кривой скорости при возврате деформации выше, чем кривой нагружения (рис. 3). Это справедливо для образцов РММА с различной дозой предварительного облучения, а также не зависит от того, находились ли они перед нагружением в магнитном поле или нет. Если оценивать ход кривых деформации и возврата по наклону кривых, изображенных на рис. 3, *a*, перестроенных в

¹ Для удобства построения графика скорости приведены без учета их знака: сжатия при действии нагрузки и растяжения после разгрузки.

Среднеквадратичная ошибка скорости деформации ($\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}$) и величины $\Delta U/U$ в пределах одного бисения для образцов РММА с дозой облучения 5 и 20 кГу при сжатии (load) и возврате формы после разгрузки (relax) в начале (t_1) и конце (t_2) процесса. *M* — образцы после выдержки в магнитном поле

РММА	$(\Delta U/U)_{t_1}$		$(\Delta U/U)_{t_2}$		$\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}$	
		<i>M</i>		<i>M</i>		<i>M</i>
5 кГу load	0.039	0.047	0.048	0.092	0.102	0.102
5 кГу relax	0.059	0.061	0.065	0.102	0.065	0.056
20 кГу load	0.029	0.036	0.072	0.087	0.081	0.076
20 кГу relax	0.043	0.041	0.080	0.113	0.042	0.043

двойных логарифмических координатах, и аппроксимировать зависимость $\dot{\epsilon}(t)$ степенной функцией, то для нагружения показатель степени близок к единице, а в случае возврата деформации превышает единицу и составляет 1.4. Среднеквадратичная ошибка скорости деформации (отклонение от усредненного значения) при возврате оказалась заметно меньше, чем при ползучести: например, для образцов, облученных до 5 кГу, она составляла 10.2% при ползучести и 6.5% после разгрузки, а для облученных до 20 кГу — 8.1 и 4.2% соответственно. Это различие нашло свое отражение в величине скачков микрометрового масштаба (см. ниже). Выдержка образцов в магнитном поле либо не изменяла разброс скорости деформации, либо приводила к небольшому его снижению (см. таблицу).

3.4. Скачки деформации микрометрового масштаба. На рис. 4 показана величина относительной ошибки скорости деформации $\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}$, измеренной в интервале скоростей $10^{-6} - 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, в зависимости

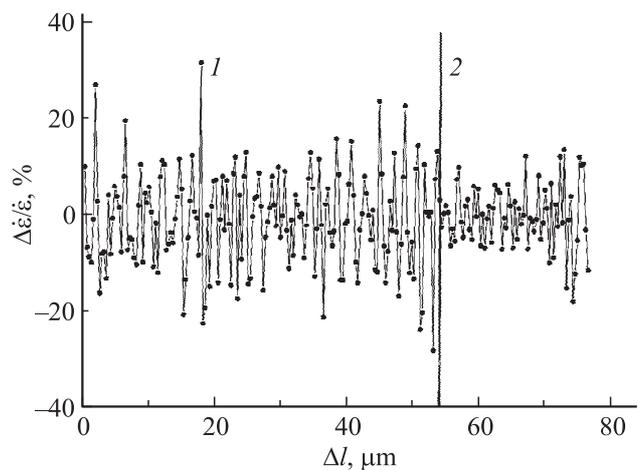


Рис. 4. Относительные величины скачков скорости деформации (отклонения от усредненной кривой) в зависимости от величины деформации (абсолютного изменения длины образца без учета его знака). *1* — область ползучести ($\sigma = 50$ МПа), *2* — деформация после разгрузки; образцы после облучения до дозы 5 кГу без выдержки в магнитном поле.

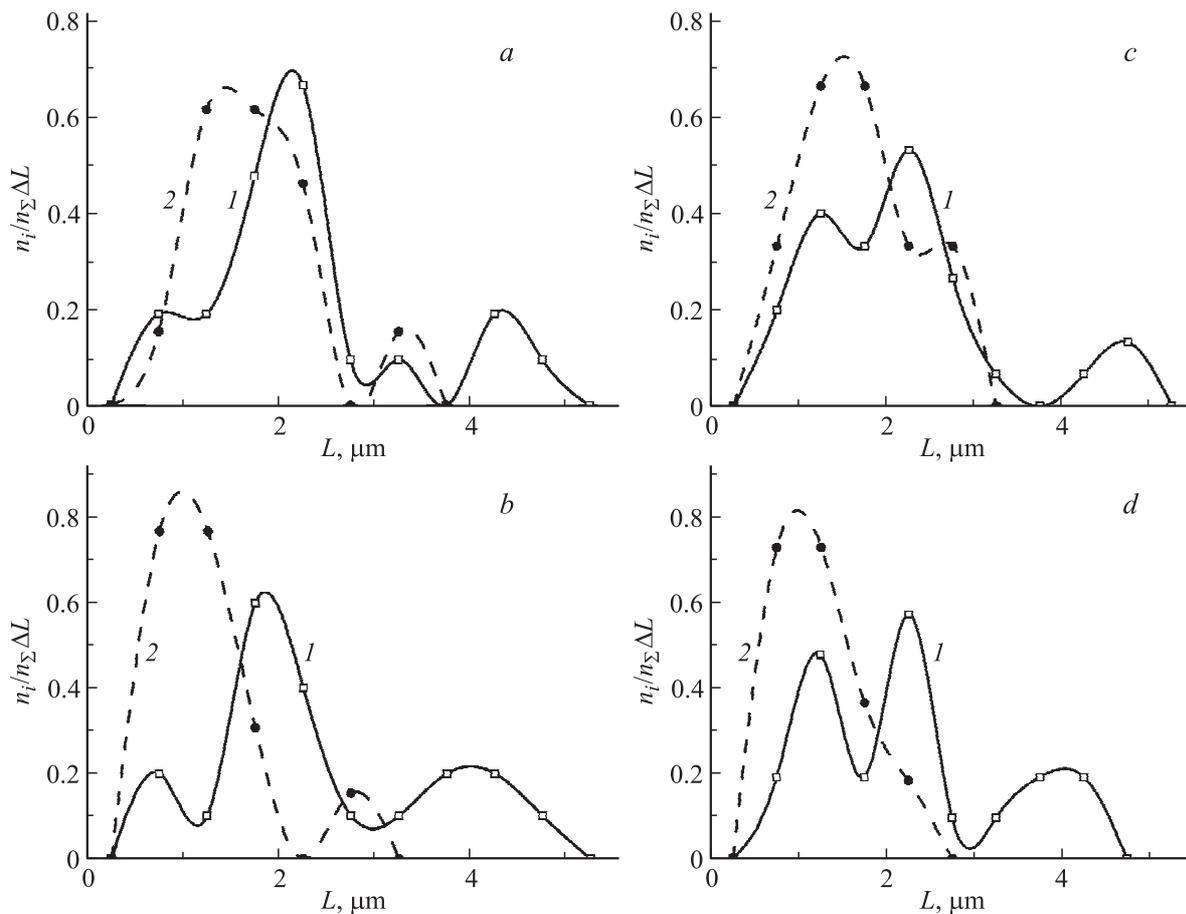


Рис. 5. Распределение скачков деформации по размерам для образцов РММА с дозой облучения 5 (*a, b*) и 20 (*c, d*) kGy. Предварительная выдержка образцов в магнитном поле 1.8 Т (*b, d*) и без выдержки (*a, c*). Ползучесть при напряжении $\sigma = 50$ МПа (1), возврат формы образца после разгрузки (2).

от изменения длины образца Δl (без учета знака Δl) в областях ползучести (1) и возврата деформации (2). Рассчитанные по этим зависимостям кривые распределения (плотности вероятности $n_i/n_\Sigma\Delta L$, где n_i — число скачков в интервале от $L_i - \Delta L/2$ до $L_i + \Delta L/2$, n_Σ — полное число скачков) скачков деформации по размерам для образцов РММА с различной предысторией и для разных условий деформации показаны на рис. 5. Из приведенных результатов следует, что распределения скачков по размерам имеют один или несколько максимумов, которые, как предполагается в [12,21], соответствуют средним размерам структурных кинетических единиц, определяющим деформацию полимера на микрометровом уровне. Как видно из рис. 5, для всех рассмотренных типов деформации характерно наличие двух или трех максимумов в интервале 0.8–3.3 μm , а для ползучести — дополнительного максимума при 4–5 μm . Отсутствие последнего при возврате формы образцов после разгрузки свидетельствует о том, что нагрузка либо помогает вовлечению в деформацию более крупных в микрометровом масштабе структурных образований, либо способствует их зарождению в

процессе деформации. Появление максимума в области 4–5 μm резко увеличивает отмеченный выше разброс скорости деформации, а также средний размер скачков деформации. Если для возврата формы его величина колеблется в зависимости от радиационной и магнитной предыстории образцов в пределах от 1 до 1.6 μm , то в случае ползучести средний размер скачков изменяется от 2 до 2.3 μm .

Максимумы в области 0.8–3.3 μm в некоторых случаях четко разделены, в других — сливаются и образуют один или два широких, часто несимметричных максимума. При возврате формы максимумы смещены в сторону меньших размеров по сравнению с ползучестью. Выдержка образцов в магнитном поле проявляется в перераспределении их интенсивностей, причем средний размер скачков практически не изменяется. Можно отметить лишь более четкое разделение максимумов на рис. 5 для образцов, побывавших в магнитном поле. При большей дозе радиации (20 kGy) вес скачков деформации с размерами порядка 1 и 2 μm примерно одинаков, в то время как при меньшей дозе (5 kGy) заметно преобладают двухмикронтовые скачки.

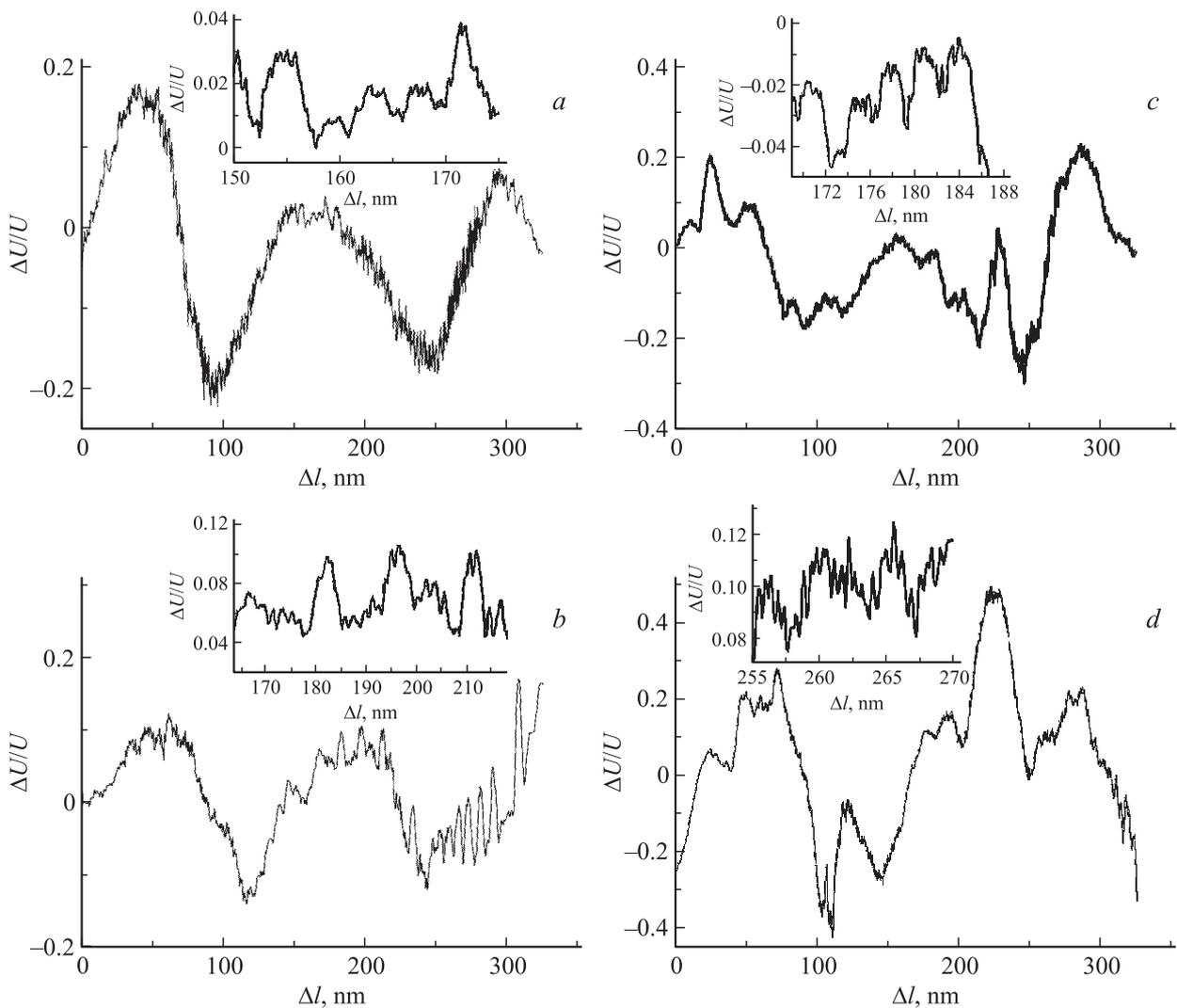


Рис. 6. Относительная величина отклонения сигнала от его расчетной величины ($\Delta U/U$) в зависимости от изменения длины образца (Δl) в пределах одного биения на интерферограмме ($\Delta l = 325$ nm) для образцов РММА с дозой облучения 5 (*a, b*) и 20 (*c, d*) kGy. Выдержка образцов в магнитном поле $B = 1.8$ T, t, h : 0 (*a, c*), 200 (*b, d*). Вид испытаний: возврат формы после разгрузки (*a, b*), ползучесть при напряжении $\sigma = 50$ МПа (*c, d*). На вставках в более крупном масштабе показаны отдельные участки соответствующих зависимостей $\Delta U/U(\Delta l)$.

3.5. Скачки деформации нанометрового масштаба. Для анализа нанометровых скачков деформации использовалось сравнение формы биений на интерферограмме с теоретической (синусоидой) [12]. В отличие от [9,12] рассматривалась не абсолютная величина отклонения сигнала от правильной формы, выраженная в вольтах, а относительная, т.е. нормированная на коэффициент b в формуле для сигнала на выходе интерферометра $U = a + b \sin \omega t$, где ω — частота сигнала, пропорциональная скорости деформации, t — время, a и b — коэффициенты, зависящие от настройки интерферометра. Полученная безразмерная характеристика $\Delta U/U$ по смыслу является аналогом $\Delta \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}$ в пределах одного биения, соответствующего изменению длины образца $\Delta l = 325$ nm.

В таблице приведены среднеквадратичные ошибки, рассчитанные по значениям $\Delta U/U$ в пределах одного биения, измеренные через 10^{-2} s, для различных образцов и условий деформации. Поскольку, как отмечалось в [9], ошибка и величина скачков существенно зависят от скорости деформации, то сравнивались биения с близкими частотами: при малых (t_1) или больших (t_2) временах от начала ползучести или момента разгрузки. Как и в [9], в начале процесса (при больших скоростях деформации) среднеквадратичная ошибка была меньше, чем в его конце (при малых скоростях деформации). В отличие от разброса средней скорости деформации, измеренной по частоте биений на интерферограмме, о котором говорилось выше, колебания скорости в пределах одного биения при ползучести меньше, чем

при возврате формы образца после разгрузки. Выдержка образцов в магнитном поле приводила в большинстве случаев к уменьшению разброса скорости в нанометровом диапазоне, что также не совпадает с результатами измерений скорости деформации по полным биениям на интерферограмме. Подобное различие в поведении микро- и нанометровых скачков деформации отмечалось ранее в [9] при анализе больших деформаций полимеров.

На рис. 6 приведены примеры количественной оценки величины нанометровых скачков деформации для различных образцов. В большинстве случаев, особенно при малых скоростях деформации, колебания $\Delta U/U$ имеют сложную форму и представляют собой наложение волн разной амплитуды с разными расстояниями между вершинами, что затрудняет определение величин наиболее вероятных нанометровых скачков деформации. В достаточно грубом приближении можно разделить скачки на большие (130–150 nm, иногда до 200 nm), средние (30–50 nm) и малые (3–5 nm, см. вставки на рис. 6, на которых в более крупном масштабе показаны отдельные участки рисунков). Все скачки, включая самые малые, имеют сложную форму. Образцы с большей дозой облучения имеют большую амплитуду скачков (ср. рис. 6, *a, b* и *6, c, d*), выдержка в магнитном поле, как правило, усложняет форму скачков. В начале процесса ползучести или возврата формы после разгрузки (при большой скорости деформации) скачки более простые, чем при большом времени, когда скорость деформации уменьшается. Подобное поведение скачков наблюдалось в [9] для области больших деформаций, вплоть до ее стадий, предшествующих разрушению.

4. Заключение

Изучение начальной стадии деформации РММА показало сложную картину разномасштабных скачков величины и скорости деформации с переменными характеристиками. Скачки деформации при действии внешней силы практически не отличались от скачков при деформировании в обратном направлении после разгрузки, когда внешние силы отсутствовали. Это позволяет исключить влияние на деформацию некоторых методических причин, например трения в устройствах, передающих усилие на образец. Интегральные зависимости деформации от времени (кривые ползучести и восстановления размеров образца после разгрузки) выглядят плавными и не выявляют скачков ввиду их малой величины: от нескольких nm до 4–5 μm . Относительно слабые внешние воздействия (непродолжительное облучение образцов или выдержка их в постоянном магнитном поле) приводит к небольшому увеличению сопротивления деформации на начальной его стадии. На микрометровом уровне были обнаружены скачки деформации со средними размерами, близкими к одному, двум и 4–5 μm , а на нанометровом уровне — с размерами 3–5, 30–50 и 130–150 и более nm. Нанометровые скачки были нерегулярными,

часто накладывались друг на друга, что затрудняло их анализ. Поскольку выборка биений для оценки размеров нанометровых скачков была ограниченной, то трудно сделать какие-либо суждения об их роли в изменении характеристик микропластичности после облучения образцов или их выдержки в магнитном поле. Возможно, их роль заключается в формировании микрометровых скачков, которые, собственно, и образуют микропластичность. Среди микрометровых скачков наибольший вес в распределениях имеют двухмикрометровые скачки (рис. 5), причем для образцов с дозой 5 kGy без выдержки в магнитном поле разница в площадях под пиком при 2 μm и другими пиками наибольшая, а для образцов с дозой 20 kGy с выдержкой в поле — минимальная. В таком же направлении изменяется и величина деформации, достигнутой за одинаковое время ползучести (рис. 1, 2).

В РММА известны следующие уровни структурной организации: а) домены, размер которых составляет 3–10 nm [22,23]; б) надмолекулярные структуры, состоящие из элементов размерами 100–200 nm (глобулы или супердомены) [24]. Исследования структуры РММА, изготовленного из мономера и очищенного с помощью ядерных микрофильтров, методом малоуглового рассеяния света позволили обнаружить существование областей неоднородности размером до 600 nm [25]. Корреляция между определенными в настоящей статье величинами скачков скорости деформации в области максимумов распределения с оценками размера структурных элементов [22–25] позволяет предположить, что скачки связаны с особенностями строения РММА. Если считать, что размеры структурных элементов РММА определяют величину скачка, то более однородная структура с одинаковыми по величине элементами будет облегчать деформацию, а конкуренция разных по величине фрагментов, наоборот, затруднять протекание деформационного процесса.

Список литературы

- [1] В.И. Старцев, В.Я. Ильичев, В.В. Пустовалов. Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах. Металлургия, М. (1975). 328 с.
- [2] О.В. Клявин. Физика пластичности кристаллов при гелиевых температурах. Наука, М. (1987). 255 с.
- [3] E.Y. Gutmanas, Y. Estrin, Phys. Status Solidi A **92**, 137 (1985).
- [4] Ю.И. Головин. ФТТ **50**, 2113 (2008).
- [5] Н.Н. Песчанская. Высокомолекуляр. соединения А **31**, 1181 (1989).
- [6] Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев. ФТТ **40**, 1635 (1998).
- [7] Н.Н. Песчанская, А.Б. Синани. ФТТ **50**, 177 (2008).
- [8] В.В. Шпейзман, Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев, А.С. Смолянский, А.С. Шведов, В.Г. Черемисов. ФТТ **52**, 248 (2010).
- [9] В.В. Шпейзман, П.Н. Якушев, Н.Н. Песчанская, Ж.В. Мухина, А.С. Шведов, В.Г. Черемисов, А.С. Смолянский. ФТТ **54**, 1149 (2012).

- [10] Ю.И. Головин. Наноиндентирование и его возможности. Машиностроение, М. (2009). 312 с.
- [11] Н.Н. Песчанская, Г.С. Пугачев, П.Н. Якушев. Механика полимеров **2**, 357 (1977).
- [12] В.В. Шпейзман, Н.Н. Песчанская. ФТТ **53**, 1169 (2011).
- [13] Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев, В.В. Шпейзман, А.С. Смолянский, А.С. Шведов, В.Г. Черемисов. ФТТ **52**, 1837 (2010)
- [14] А.С. Шведов, В.Г. Черемисов, Н.Н. Песчанская, В.В. Шпейзман, П.Н. Якушев, А.С. Смолянский, С.Г. Лакеев. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. Научн.-техн. сб. Вып. 3. ФГУП „НИИП“ М. (2010). С. 77.
- [15] Н.Н. Песчанская, А.С. Смолянский, В.Ю. Суорова. Высокомолекуляр. соединения Б **34**, 19, 3 (1992).
- [16] Н.Н. Песчанская, А.С. Смолянский, В.Ю. Суорова. ФТТ **35**, 2466 (1993).
- [17] Н.Н. Песчанская, А.С. Смолянский, А.В. Рылов. ФТТ **44**, 1711 (2002).
- [18] Л.В. Жога, В.И. Дорогин, В.В. Шпейзман. ФТТ **29**, 3485 (1987).
- [19] В.В. Шпейзман, Л.В. Жога. ФТТ **47**, 843 (2005).
- [20] Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев. ФТТ **45**, 1130 (2003).
- [21] Н.Н. Песчанская, Ю. Христова. ФТТ **48**, 1786 (2006).
- [22] Л.Б. Пеева, М.А. Натов. Высокомолекулярные соединения. Б **12**, 888 (1970).
- [23] Р.А. Симонян, В.А. Касаикин, М.Б. Лачинов, В.П. Зубов, В.А. Кабанов. Докл. АН СССР **217**, 631 (1974).
- [24] С.А. Аржаков, Н.Ф. Бакеев, В.А. Кабанов. Высокомолекуляр. соединения. А **15**, 1154 (1973).
- [25] H.K. Yuen, J.V. Kinsinger. Macromolecules **7**, 329 (1974).