

Влияние слабого магнитного поля на скачкообразную деформацию свинца в области больших деформаций

© В.В. Шпейзман, П.Н. Якушев

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

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

(Поступила в Редакцию 25 февраля 2013 г.)

Интерферометрическим методом проведены прецизионные измерения скорости деформации свинца при постоянных напряжениях в магнитном поле и без поля, а также изменения скорости деформации при введении и выведении поля. Показано, что вся кривая деформации, и в поле, и без него состоит из скачков разной величины и протяженности: от десятков nm до сотен μm . Магнитное поле приводит к некоторому ускорению деформации и перераспределению вкладов в нее скачков разной величины. Введение магнитного поля в процессе ползучести приводит к 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 магнитоэластического эффекта зависят от скорости и величины деформации. Особенности поведения свинца связываются с возможной многократной его рекристаллизации в процессе ползучести.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-08-00437-а.

1. Введение

Воздействие магнитного поля на механические свойства немагнитных материалов (диа- и парамагнетиков) привлекает в последнее время внимание исследователей в различных направлениях физики твердого тела [1–7]. При этом масштабы изменений характеристик деформации и величины магнитного поля колеблются в широких пределах: от элементарных актов деформации, связанных с перемещением одиночной дислокации [1,4,6], до макродеформации и разрушения образцов [2,3,5–7], а индукция магнитного поля в экспериментах может быть как крайне малой (магнитное поле Земли) [8], так и гигантской, имеющей место в магнитах современных токамаков большой мощности [9]. В работах [2,5,6,10] при использовании прецизионной интерферометрической методики, позволяющей измерять скорость деформации и ее изменение на базе малых перемещений (до нескольких nm), было показано, что деформация различных по своей природе твердых тел происходит скачками, причем в зависимости от уровня деформации величина скачков может представлять собой ряд значений от единиц nm до размеров, всего лишь на порядок меньших величины измеряемой деформации образца. Как показали измерения, влияние магнитного поля проявляется не только в изменении средней скорости деформации или величины напряжений течения (магнитоэластический эффект), но также и в изменении величины и количества скачков на разных уровнях деформации. Так, слабое магнитное поле увеличивало среднюю скорость деформации при сжатии монокристаллов цинка и уменьшало величину скачков деформации, размеры которых составляли 300–750 nm [6]. Изучение начальной стадии деформации полиметилметакрилата [10] показало

сложную картину разномасштабных скачков величины и скорости деформации с переменными характеристиками. Выдержка образцов в постоянном магнитном поле приводила к небольшому увеличению сопротивления деформации. 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 nm. Роль нанометровых скачков состояла в формировании микрометровых, которые являются наивысшим уровнем в микропластичности. Влияние магнитного поля проявлялось в перераспределении вкладов в деформацию микрометровых скачков разной величины.

В настоящей работе исследованы характеристики скачков скорости и величины деформации при одноосном сжатии свинца в области больших изменений длины образца. Свинец представляется уникальным материалом для исследования больших деформаций. Из-за низкой температуры рекристаллизации его деформация при комнатной температуре практически не сопровождается наклепом. Сжатие цилиндрического образца в тонкий диск осуществляется усилием, которое в основном определяется лишь увеличением площади поперечного сечения. При температурах выше 243 K образец из чистого свинца с цилиндрической рабочей частью нельзя разрушить деформацией кручения [11]. Указанные особенности деформации свинца позволяют наблюдать широкий спектр скачков деформации от нанометровых до макроскопических с размерами в сотни μm .

2. Методика эксперимента

Образцы из свинца (99.992 wt.% Pb) в виде цилиндров диаметром 4 и высотой 6 mm испытывали при

одноосном сжатии в условиях постоянных напряжений $\sigma = 6\text{--}17$ МПа и комнатной температуре. По зарегистрированным кривым биений (интерферограммам) с использованием программного обеспечения [12] определяли скорость деформации на базе последовательных одинаковых изменений длины образца, равных $\Delta l_0 = 325$ нм ($\Delta \varepsilon_0 \sim 5 \cdot 10^{-3}\%$), что соответствовало периоду биений. Таким образом можно было анализировать скачки деформации размером более 500 нм. Скачки меньших размеров определялись по отклонению формы линий на интерферограммах от синусоидальной [13]. Обработка результатов позволяла измерять параметры неоднородности деформации на разных ее уровнях: от нескольких единиц нм до сотен $\mu\text{м}$ с шагом дискретизации по времени до 10^{-4} с. По кривым ползучести при разных напряжениях определяли амплитуду, частоту следования и форму скачков скорости деформации. При вычислении $\dot{\varepsilon}$ и $\Delta \dot{\varepsilon}$ в расчет принималась полная длина образца.

Влияние постоянного магнитного поля с индукцией $B = 0.2$ Т на скорость деформации наблюдали двумя способами: сравнением полных кривых ползучести при одинаковых напряжениях, снятыми в поле и без него, и путем многократного наложения и снятия поля в течение деформирования при заданных постоянных напряжениях. Вектор напряженности магнитного поля был направлен перпендикулярно оси образца.

3. Результаты опытов и их обсуждение

На рис. 1 приведены кривые ползучести свинца в магнитном поле и без поля при напряжениях $\sigma = 8.1$ МПа. В используемой интерферометрической методике кривые деформация–время ($\varepsilon-t$) могут быть получены либо интегрированием зависимости $\dot{\varepsilon}-t$, либо непосредственно по зависимости числа биений на интерферограмме от времени. Поскольку в обоих случаях точки, соответ-

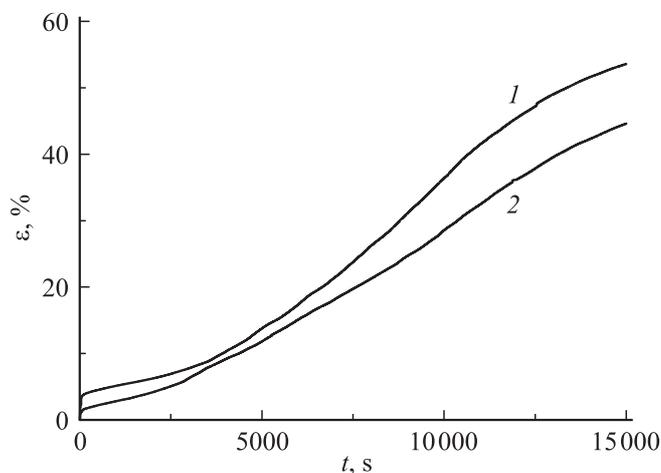


Рис. 1. Кривые ползучести свинца в магнитном поле с индукцией $B = 0.2$ Т (1) и без поля (2) при постоянных сжимающих напряжениях $\sigma = 8.1$ МПа. $T = 300$ К.

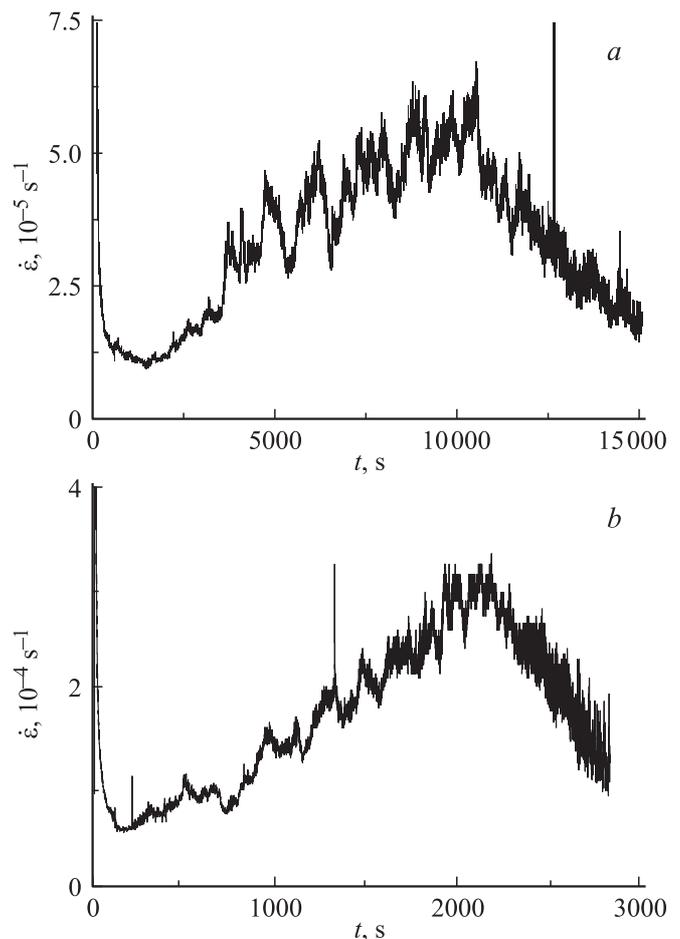


Рис. 2. Зависимость скорости деформации свинца, измеренной на базе изменения длины образца $\Delta l = 325$ нм, от времени ползучести в магнитном поле с индукцией $B = 0.2$ Т (а) и без поля (б). σ , МПа: 8.1 (а) и 10.5 (б). $T = 300$ К.

ствующие отсчету текущего времени, одни и те же, то различие кривых может быть вызвано лишь неточностью усреднения скорости при ее определении в пределах одного биения. Как показало сравнение кривых, полученных разными методами, указанным различием можно пренебречь, что свидетельствует о надежности предлагаемого метода расчета величины и скорости деформации. Зависимости, изображенные на рис. 1, имеют вид плавных кривых, скачков деформации не видно, что отмечалось в [10]. Из рис. 1 следует, что магнитное поле слегка ускоряет деформацию. Однако на разных участках кривых расстояние между кривыми ползучести в поле и без него различно, и если, например, построить зависимость скорости деформации от времени путем графического дифференцирования кривых $\varepsilon-t$, то полученная картина будет далека от истинной, построенной по измерениям частоты биений на интерферограмме (рис. 2). Как видно из рис. 2, скорость деформации изменяется на всем протяжении ползучести, причем можно наблюдать колебания скорости разной частоты. Самые низкочастотные — это изменения средней скоро-

Таблица 1. Среднеквадратичная ошибка скорости деформации $(\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon})$ в начале $(\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon})_1$ и конце $(\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon})_2$ ползучести свинца без поля и в магнитном поле с индукцией $B = 0.2$ Т

σ , МПа	$(\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon})_1$		$(\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon})_2$	
	$B = 0$	$B = 0.2$ Т	$B = 0$	$B = 0.2$ Т
10.5	0.074	0.056	0.09	0.079
8.1	0.085	0.058	0.131	0.122

сти: ее убывание, затем возрастание и снова убывание. Самое короткое из разрешенных используемым методом измерений — это случай, когда одно колебание на интерферограмме заметно отличается по частоте от соседних. На рис. 2 это проявляется в виде тонких вертикальных линий, а на рис. 3 приведен пример участка интерферограммы, на котором одно биение имеет примерно вдвое большую частоту, чем остальные, что соответствует такому же соотношению скоростей деформации. Вся кривая ползучести состоит из чередующихся с разной частотой подъемов и падений скорости деформации. Низкочастотные скачки деформации с большими размерами могут состоять из более мелких скачков. Вблизи минимума кривой скорости ползучести наблюдаются более мелкие скачки деформации, чем на последующих стадиях. Соответственно и разброс скорости деформации в области минимума скорости меньше, чем при больших деформациях. Так, если построить некоторую плавную усредненную зависимость скорости деформации от времени и рассчитать относительную среднеквадратичную ошибку скорости, то она заметно возрастает при увеличении деформации. С ростом напряжений (скорости деформации) величина $\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}$ уменьшается, а при одинаковых напряжениях несколько меньше в магнитном поле (табл. 1). Оценка среднего отклонения скорости деформации от усредненной по всем точкам кривой показала, что величина $\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}$ составляет 13.1 и 9% для напряжений 8.1 и 10.5 МПа соответственно, а в магнитном поле для тех же напряжений — 12.2 и 7.9%. Влияние магнитного поля, возможно, связано с отмеченным выше увеличением скорости деформации в поле, что равносильно слабому росту напряжений. Кроме того, можно отметить, что начальные участки кривых на рис. 2 имеют меньший разброс, чем последующие. Так, например, на рис. 2, *a* разброс скорости на начальном участке (~ 6%) примерно вдвое меньше, чем средний по кривой. Подобный характер поведения разброса скорости деформации наблюдался нами при исследовании ползучести полимеров [10].

Уменьшение скорости деформации, следующее за начальным ее скачком после приложения нагрузки, — типичное явление, называемое затухающей, или неустановившейся ползучестью. Последний термин, с нашей точки зрения, является неточным, так как после убывания скорости начинается ее возрастание [14], а обсуждаемый часто „стационарный“ участок есть область вблизи

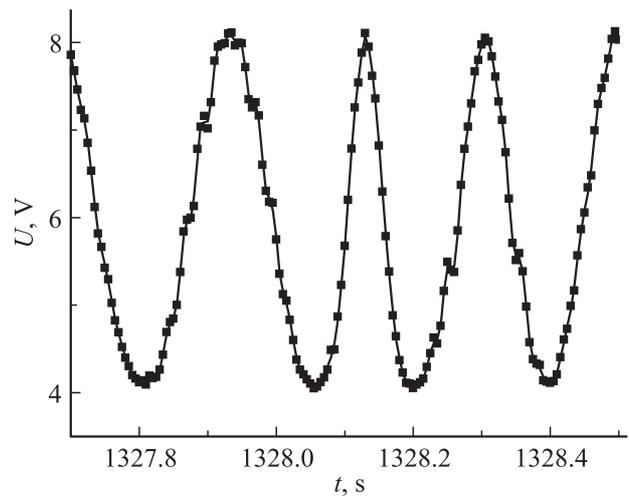


Рис. 3. Участок интерферограммы, изображенной на рис. 2, *b*, на котором одно колебание резко отличается от остальных по частоте.

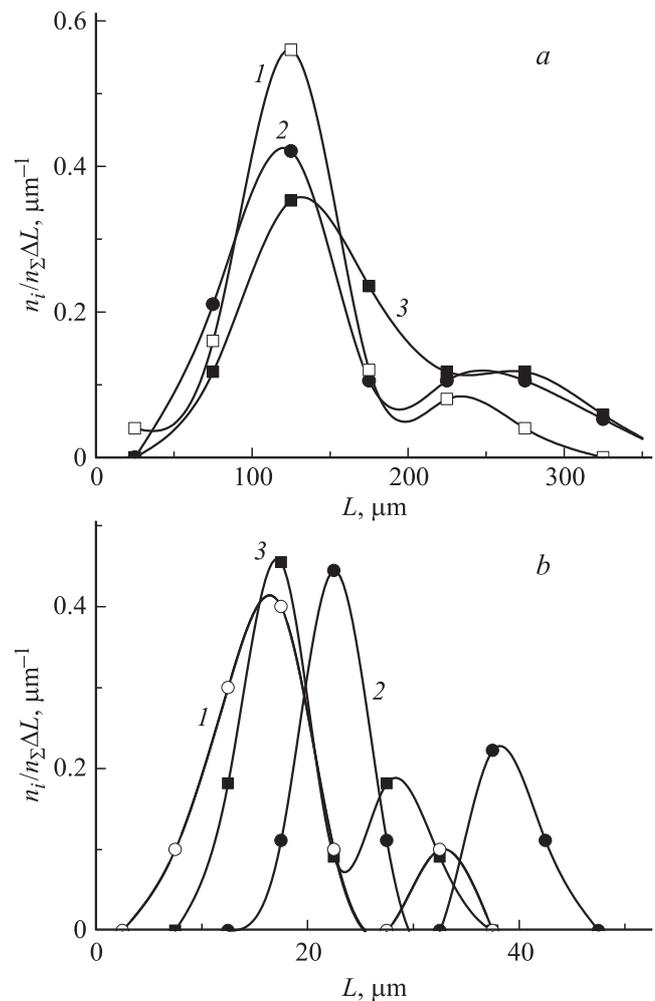


Рис. 4. Распределение скачков деформации по размерам в интервалах 50–300 (*a*) и 10–50 μm (*b*) для образцов свинца. Ползучесть при напряжении σ , МПа: 10.5 (*1*) и 8.1 (*2, 3*). Образец (*3*) находился в магнитном поле с индукцией $B = 0.2$ Т.

Таблица 2. Влияние напряжений и скорости деформации свинца на величину скачков деформации (L) в нанометровом диапазоне и на среднеквадратичную ошибку отклонения величины сигнала на интерферограмме от расчетной синусоиды, нормированного на амплитуду сигнала ($\Delta U/U_0$)

σ , МПа	5.7		8.1				10.5		
$\dot{\varepsilon}$, 10^{-5} s^{-1}	0.25	0.03	1.4	0.86	3.9	2.8	6.7	16	14
$\Delta U/U_0$	0.15	0.18	0.088	0.07	0.059	0.073	0.078	0.068	0.064
L , nm	20; 150	15–100	20–30 100–200	20–30 100–200	20–40 150–200	20–40 150–200	20–40 150–200	20–40 150–200	20–40 150–200

Таблица 3. Влияние магнитного поля на величину скачков деформации (L) в нанометровом диапазоне и на среднеквадратичную ошибку отклонения величины сигнала на интерферограмме от расчетной синусоиды, нормированного на амплитуду сигнала ($\Delta U/U_0$). $\sigma = 8.14$ МПа

B , Т	0				0.2			
$\dot{\varepsilon}$, 10^{-5} s^{-1}	1.4	0.86	3.9	2.8	1.5	1.1	5.3	3.2
$\Delta U/U_0$	0.088	0.07	0.059	0.073	0.067	0.059	0.051	0.068
L , nm	20–30 100–200	20–30 100–200	20–40 150–200	20–40 150–250	15–25 50–150	15–25 50–150	15–20 50–150	20–40 150–250

минимума скорости, в некоторых случаях весьма протяженная, что создает иллюзию стационарного процесса. Однако процесс, скорость которого изменяется, как показано на рис. 2, вряд ли можно считать стационарным также еще и потому, что скачки скорости деформации наблюдаются на всех участках ползучести.

Если перестроить кривые ползучести в координатах $\dot{\varepsilon}$ – ε , то по расстояниям между пиками скорости, измеренными на разных масштабных уровнях, можно оценить размеры скачков в интервале изменений длины образца от единиц до нескольких сотен μm . Рассчитанные по этим кривым распределения скачков деформации по размерам (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) показаны на рис. 4. Кривые распределения самых крупных скачков (величиной более $25 \mu\text{m}$) по размерам приведены на рис. 4, а. Распределения имеют два максимума вблизи 120 и $250 \mu\text{m}$. Увеличение напряжений приводит к возрастанию доли 120 -микрометровых скачков, а магнитное поле — к некоторому уширению и сближению максимумов.

Распределение по размерам более мелких скачков можно получить в результате измерения расстояний между максимумами скорости деформации внутри больших скачков (рис. 4, б). Распределения также имеют по два максимума: в области 20 и 30 – $40 \mu\text{m}$. Магнитное поле и увеличение напряжений приводит к небольшому сдвигу максимумов в сторону малых скачков.

Анализ нанометровых скачков деформации проводился по методике, описанной в [13]. Одиночные скачки скорости деформации, примером которых является скачок, показанный на рис. 3, носили случайный характер,

и их вклад в общую деформации был незначителен. На рис. 5, а, б приведены примеры изменений отклонения величины сигнала на интерферограмме от расчетной синусоиды, нормированного на амплитуду сигнала ($\Delta U/U_0$). По зависимостям $\Delta U/U_0$ от изменения длины образца рассчитывалась величина скачков деформации (L) в нанометровом диапазоне и среднеквадратичная ошибка $\Delta U/U_0$, измеренная в пределах одного или нескольких последовательных биений на интерферограмме. Преимуществом анализа сразу нескольких биений является возможность нахождения скачков в промежуточном диапазоне между микрометровой областью и ограниченной размерами деформации, соответствующей одному биению на интерферограмме ($\sim 300 \text{ nm}$).

В табл. 2 приведены значения L и $\Delta U/U_0$ в зависимости от величины напряжений и текущей скорости ползучести свинца, а в табл. 3 влияние на L и $\Delta U/U_0$ магнитного поля. При каждом напряжении ползучести последовательность расположения столбцов в табл. 2, 3 соответствует увеличению времени (величины) деформации. Обнаружены скачки деформации с преимущественными размерами 15 – 40 и 100 – 250 nm . Размеры скачков слегка увеличивались с деформацией, а при одинаковой деформации и разных напряжениях можно заметить тенденцию к увеличению размеров скачков с ростом напряжений. Ошибка $\Delta U/U_0$ при скоростях деформации 10^{-7} – 10^{-6} s^{-1} больше, чем при 10^{-5} – 10^{-4} s^{-1} , однако такой явной зависимости от скорости деформации, как в [14], не наблюдается. Возможно, это связано с более сложной зависимостью скорости от величины деформации и отсутствием прямой зависимости структуры от деформации из-за вероятной

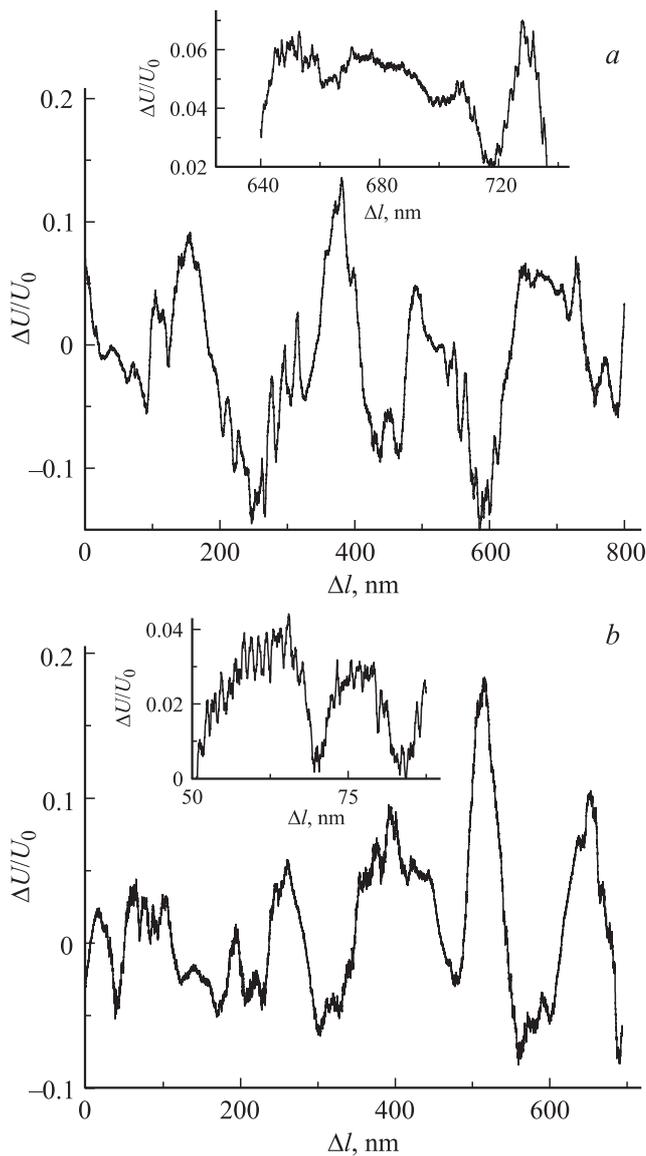


Рис. 5. Относительная величина отклонения сигнала от его расчетной величины ($\Delta U/U_0$) в зависимости от изменения длины образца (Δl) в пределах нескольких соседних биений на интерферограмме ($\Delta l = 700\text{--}800\text{ nm}$) для образцов свинца, деформированных при напряжениях 8.1 МПа без магнитного поля (*a*) и в поле с индукцией 0.2 Т (*b*). На вставках в более крупном масштабе показаны отдельные участки соответствующих зависимостей $\Delta U/U_0(\Delta l)$.

многократной рекристаллизации в процессе ползучести. Что касается магнитного поля, то оно слегка уменьшает нанометровые скачки и величину $\Delta U/U_0$, что отмечалось ранее для полимеров в [10,14].

Магнитопластический эффект наблюдался по изменению скорости деформации при введении и выведении образца из магнитного поля. Введение образца в магнитное поле всегда приводило к резкому возрастанию скорости деформации и последующему плавному ее уменьшению до уровня, большего или близкого к тому, который

был до приложения поля (рис. 6). Более совершенная по сравнению с [5,6] методика анализа результатов позволила детально рассмотреть эффект. Так, большая частота записи интерферограмм позволила более надежно фиксировать начальный скачок скорости деформации при введении магнитного поля и резкий спад скорости деформации при выведении поля. Более сложной задачей является определение того изменения скорости,

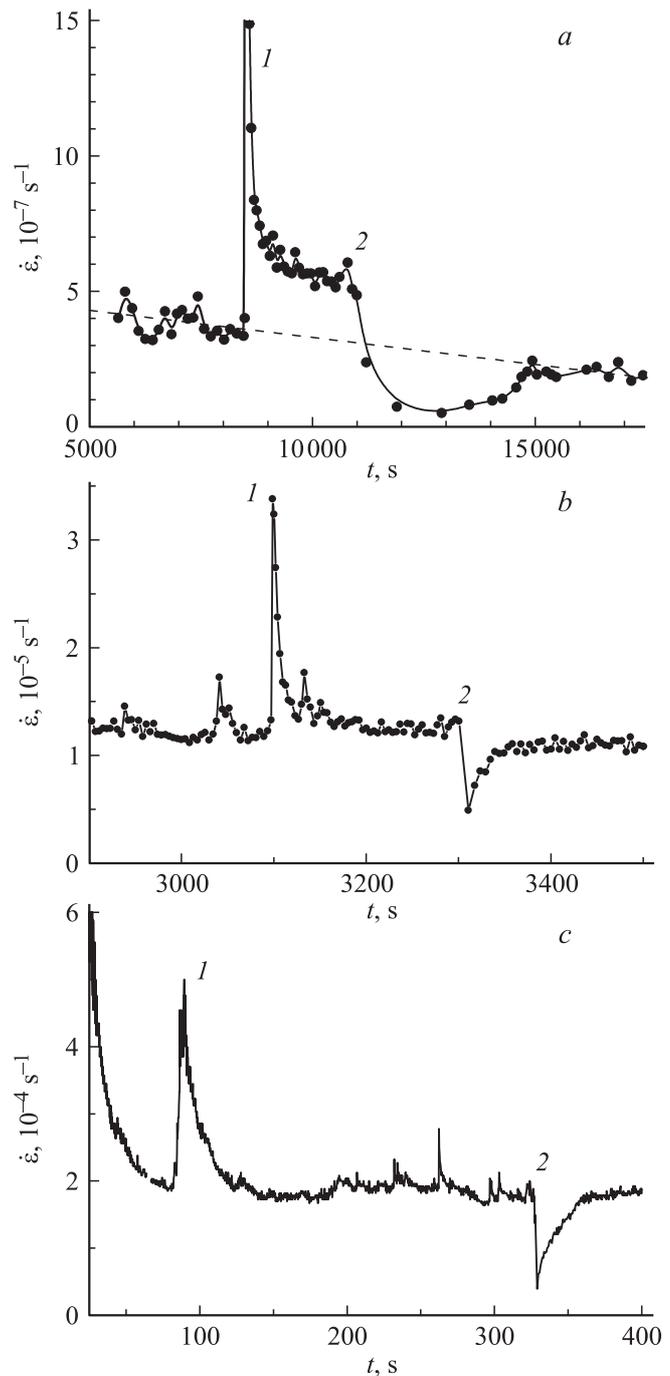


Рис. 6. Изменение скорости деформации при введении (1) и выведении (2) образца из магнитного поля с индукцией 0.2 Т при разных начальных скоростях ползучести, s^{-1} : $3.5 \cdot 10^{-7}$ (*a*), $1.2 \cdot 10^{-5}$ (*b*) и $2 \cdot 10^{-4}$ (*c*).

которое можно считать зависящей только от величины индукции поля и не зависящей от скачка индукции в момент введения поля. Осложняет измерения то, что как показали наши исследования, скорость ползучести является переменной, причем на ее плавные изменения накладываются короткие всплески и падения.

Наиболее отчетливо магнитопластический эффект проявлялся при малых скоростях деформации $\sim 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ (рис. 6, *a*). Это связано с тем, что при малых скоростях увеличивается время, за которое набирается одно биение на интерферограмме, соответствующее $\Delta l_0 = 325 \text{ nm}$. Следовательно, увеличивается время усреднения скорости на участках каждого ее измерения. Как видно из рис. 6, *a*, после введения и выведения поля скорость ползучести возвращается на прямую, соответствующую ее изменению до введения поля (см. штриховую линию на рис. 6, *a*), а прирост скорости во время действия поля (исключая начальный скачок) по отношению к этой прямой составляет $\sim 70\%$. Значительно меньший эффект наблюдается при больших скоростях: 10^{-5} и 10^{-4} s^{-1} (рис. 6, *b, c*). Для 10^{-4} s^{-1} введение магнитного поля на участке спада скорости привело к прекращению спада скорости как при действии магнитного поля, так и после его выведения (рис. 6, *c*).

Таким образом, магнитопластический эффект в свинце подобен толчку (при введении поля) или торможению (при выведении поля), за которыми следует плавный возврат скорости к своему прежнему или слегка отличающемуся по среднему уровню значению. Особенности влияния магнитного поля при разных по величине скоростях, очевидно, связаны с различием в скоростях изменения структуры при деформации и процессов возврата, связанных с рекристаллизацией.

4. Заключение

Зависимость скорости деформации свинца от времени (деформации), как показали представленные в настоящей работе измерения, имеет не только минимум, который ранее наблюдался нами для различных материалов, но и максимум при больших деформациях. Можно было бы предположить, что он связан с геометрическим фактором: деформация $\sim 40\text{--}50\%$, при которой наблюдается спад скорости деформации, соответствует истинной деформации $\sim 50\text{--}70\%$, при этом высота образца становится меньше диаметра, и силы трения на торцах могут вызвать изменение напряженного состояния и уменьшение скорости деформации. Однако малые силы сжатия свинца и практически отсутствие „бочки“ позволяют полагать, что есть еще и другие причины этого эффекта. В пользу структурной версии объяснения спада скорости деформации свидетельствует тот факт, что изменяется характер скачков скорости: скачки становятся более частыми и трудно различимыми (рис. 2). Возможно, многократная рекристаллизация все же оставляет свои

следы (например, разрыхляет решетку), что приводит к облегчению деформации.

Многообразие скачков скорости и величины деформации (от 15 nm до $250 \mu\text{m}$), изменение их размеров в процессе ползучести, влияние на них магнитного поля указывает на сложность многоуровневых взаимодействий разномасштабных объемов твердого тела при его деформации и также на то, что описание деформации с помощью формул, содержащих один или два структурно-зависимых параметра, носит весьма приближенный характер.

Список литературы

- [1] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Т.М. Перекалина, А.А. Урусовская. ФТТ **29**, 467 (1987).
- [2] Н.Н. Песчанская, В.Ю. Суорова, П.Н. Якушев. ФТТ **34**, 2111 (1992).
- [3] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов. ФТТ **37**, 2118 (1995).
- [4] Ю.И. Головин. ФТТ **46**, 769 (2004).
- [5] Н.Н. Песчанская, А.Б. Синани. ФТТ **50**, 177 (2008).
- [6] Н.Н. Песчанская, Б.И. Смирнов, В.В. Шпейзман. ФТТ **50**, 997 (2008).
- [7] Д.В. Загуляев, С.В. Коновалов, В.Е. Громов. Вестн. Челябинского ун-та, **24**, 855 (2009).
- [8] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, В.А. Морозов, В.М. Кац, А.А. Лукин. Письма в ЖЭТФ, **91**, 97 (2010).
- [9] П.А. Александров, В.В. Бударгин, М.Н. Шахов, И.И. Никанорова, Е.С. Трофимчук. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. № 1, 24 (2006).
- [10] В.В. Шпейзман, П.Н. Якушев, Ж.В. Мухина, Е.В. Кузнецов, А.С. Смоленский. ФТТ, **55**, 923 (2013).
- [11] И.Е. Куров, В.А. Степанов, В.В. Шпейзман. В кн.: Физика металлов и металловедение. Тр. ЛПИ № 305, Металлургия, М. (1969). С. 71.
- [12] А.С. Шведов, В.Г. Черемисов, Н.Н. Песчанская, В.В. Шпейзман, П.Н. Якушев, А.С. Смоленский, С.Г. Лакеев. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. Науч.-техн. сб. Вып. 3. ФГУП „НИИП“, М. (2010). С. 77.
- [13] В.В. Шпейзман, Н.Н. Песчанская. ФТТ **53**, 1169 (2011).
- [14] В.В. Шпейзман, П.Н. Якушев, Н.Н. Песчанская, Ж.В. Мухина, А.С. Смоленский, А.С. Шведов. ФТТ **54**, 1156 (2012).