

Скачкообразная ползучесть при сжатии монокристаллов цинка в магнитном поле

© Н.Н. Песчанская, Б.И. Смирнов, В.В. Шпейзман

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

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

(Поступила в Редакцию 11 октября 2007 г.)

Скорость ползучести при сжатии монокристаллов цинка измерялась на приращениях деформации образца на 150 nm, что позволяло определять скачки деформации от 300 nm. Показано, что слабое постоянное магнитное поле с индукцией $B = 0.2$ Т увеличивает среднюю скорость ползучести и уменьшает высоту и резкость субмикронных скачков деформации. Предварительная выдержка в поле также влияет на скорость и характеристики скачков деформации. Данные объясняются с позиций модели, связывающей действие магнитного поля с разрушением барьеров для движения дислокаций.

PACS: 62.20.Fe, 75.80.+q

1. Введение

Магнитоэластический эффект (МПЭ) в диамагнетиках был впервые обнаружен в ненагруженных ионных кристаллах, в которых под действием слабого по величине постоянного магнитного поля происходило смещение отдельных дислокаций [1]. Авторы [1] предположили, что магнитное поле разрушает (или понижает) барьеры, удерживающие дислокации на стопорах, а само движение дислокаций вызвано полем внутренних напряжений. В последующих работах помимо наблюдения за отдельными дислокациями, подтвердивших выводы [1], появились экспериментальные результаты, демонстрирующие влияние магнитного поля на различные процессы и характеристики твердых тел: скорость микро- и макропластической деформации [2–7], предел текучести [8], рост трещин [9], внутреннее трение [10], микротвердость [11–13]. Объектами исследований служили ионные кристаллы [5–7], металлы [13], полимеры [2–4], фуллерит C_{60} [7,12]. Подробный обзор многочисленных работ по МПЭ в диамагнетиках дан в [14].

Среди диамагнитных материалов, на которых изучался МПЭ, металлы и сплавы занимают весьма скромное место. Движение дислокаций в магнитном поле в ненагруженных алюминии и цинке наблюдалось в [15,16]; влияние поля на двойникование монокристаллов висмута под действием сосредоточенной нагрузки изучалось в [13]. В [17] было обнаружено влияние импульсного магнитного поля на внутреннее трение в термически обработанной оловянистой бронзе, а в [18] — постоянного магнитного поля в процессе старения бериллиевой бронзы на ее микротвердость.

Действие магнитного поля на скачкообразную деформацию впервые обнаружено в полимерах в работе [2], в которой было установлено, что скачки скорости микропластической деформации в магнитном поле значительно меньше по величине, чем при деформации без магнитного поля. В [19] было показано, что магнитное поле с индукцией ~ 1 Т способно значительно

уменьшать амплитуду скачков на кривой деформации закаленных кристаллов $NaCl:Eu$, т. е. подавлять эффект Портевена–Ле Шателье. Исследования влияния магнитного поля на скачки деформации в металлах нам не известны.

Характеристики МПЭ зависят и от уровня структуры, на котором наблюдается явление, и также от способа измерения и его разрешения. Так, при измерениях величины и скорости деформации на микро- или макроуровне влияние магнитного поля на нее описывается изменением величины напряжения или деформации. При изучении воздействия магнитного поля на структуру анализируется скорость движения дислокаций, их взаимодействие с точечными дефектами, зарождение и рост двойников, роль преципитатов и т. д.

В настоящей работе рассматривается влияние постоянного магнитного поля на ползучесть монокристаллов цинка. Используется явление скачкообразной деформации, связанное с гетерогенностью структуры, которое наблюдалось на микронном и субмикронном уровнях деформации и структуры в разных телах, в том числе в металлах и ионных монокристаллах [20]. В работе показано, как изменяются параметры кооперативных актов (скачков) деформации цинка под действием слабого магнитного поля.

2. Образцы и экспериментальная методика

Монокристаллы цинка (99.99% Zn), выращенные методом Бриджмена [21], с плоскостями базиса, расположенными под углами, близкими к 90 и 45° к оси образца, деформировались под действием постоянного напряжения (режим ползучести) при одноосном сжатии. Образцы имели форму цилиндра диаметром 3 и высотой 6 mm. Деформация ползучести записывалась интерферометрическим способом [2–4] в виде последовательных биений, период которых соответствовал

приращению деформации (изменению длины образца) на $0.3 \mu\text{m}$. В настоящей работе скорость деформации определяли по полупериоду биения, т.е. на базе линейных перемещений $\Delta l_0 = 0.15 \mu\text{m}$, с погрешностью не более 5%. Параметры скачков деформации определялись из зависимости скорости деформации от последовательных ее приращений на Δl_0 [20]. Значение периода колебаний скорости L , равное высоте скачка деформации, определяли как $L = 150n$ (nm), где n — число измерений скорости в периоде. Второй параметр скачка деформации h , характеризующий резкость скачков деформации, вычисляли в виде отношения максимальной скорости деформации к минимальной ($h = \dot{\epsilon}_{\text{max}}/\dot{\epsilon}_{\text{min}}$) в пределах периода колебания скорости. При обсуждении результатов приводятся средние значения параметров L и h по пяти-семи колебаниям скорости.

Действие магнитного поля на скорость деформации наблюдали в двух режимах: 1) параметры скачков деформации измеряли непосредственно в процессе ползучести до и после воздействия магнитного поля с индукцией $B = 0.2 \text{ T}$; 2) образец выдерживался некоторое время в магнитном поле $B = 0.2 \text{ T}$, а затем нагружался до тех же напряжений, что и образец, не подвергавшийся воздействию магнитного поля. Вектор напряженности магнитного поля был направлен перпендикулярно оси образца.

Методом скачка напряжений в процессе ползучести были оценены эффективные активационные объемы процесса деформации. Измерения сделаны на малых приращениях деформации образца (десятые доли процента) в процессе ползучести в магнитном поле и без него.

3. Результаты опытов и их обсуждение

Кривые ползучести монокристаллов цинка разной ориентации в традиционных координатах осевая деформация–время приведены на рис. 1. На участках кривых 1 и 3 образец находился в магнитном поле с $B = 0.2 \text{ T}$; на участках 2 и 4 поле отсутствовало. Из данных рис. 1 следует, что магнитное поле в 1.5–2 раза увеличивает скорость деформации. Эффект разупрочнения в магнитном поле наблюдался в большинстве работ по МПЭ в диамагнетиках. Уменьшение скорости деформации в магнитном поле обнаружено в монокристаллах C_{60} при температурах ниже фазового перехода. В ряде работ отмечалась зависимость величины эффекта от состава примесей, величины и скорости деформирования, а для магнитного последствия — от времени выдержки в магнитном поле (см. обзор [14]).

На рис. 1, *b* отдельно показан участок 2 кривой II. Масштаб рисунка позволяет увидеть, что ползучесть развивается не плавно, величина скорости колеблется около некоторого среднего значения. На выбранном изменении длины образца $\Delta l \approx 3 \mu\text{m}$ можно выделить пять скачков деформации ползучести. Средние величины высоты и длительности скачков составляют 600 nm

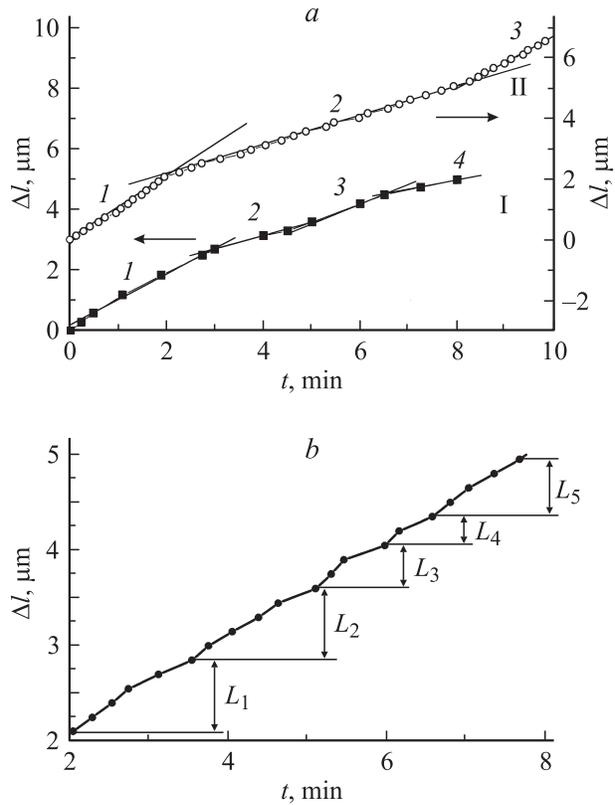


Рис. 1. *a*) Микроползучесть монокристаллов цинка при сжатии. Угол между плоскостью базиса и осью образца: 90° (I) и 45° (II). Предварительная деформация: 2 (I) и 5% (II). Напряжение: 80 (I) и 20 МПа (II). Участки 1 и 3 — в магнитном поле, 2 и 4 — без поля. *b*) Скачки деформации на участке 2 кривой II. L_{1-5} — высоты скачков.

и 1.5 min . Значительно более четко скачкообразный характер деформации на микроуровне выявляется при измерениях скорости на ее приращениях, меньших деформации в скачке.

На рис. 2–4 ползучесть монокристаллов цинка показана в координатах скорость–величина деформации. Период колебания скорости деформации L равен величине деформации в скачке (высоте скачка), а отношение максимальной скорости к минимальной в пределах одного периода h характеризует резкость скачка. Ранее нами было показано, что скачкообразный характер деформации наблюдается на разных уровнях структуры у тел различной природы, а размеры скачков (деформационные периоды колебаний скорости) отражают масштаб наиболее типичных неоднородностей того уровня, который соответствует разрешению метода измерения скорости [20,22]. Сравнение величины скачков с размерами гетерогенностей в металлах и кристаллах проводилось в [20].

Данные, приведенные на рис. 2–4, демонстрируют примеры реакции скачков субмикронного уровня на действие магнитного поля с индукцией $B = 0.2 \text{ T}$ при разных временах действия поля. На рис. 2 показан мо-

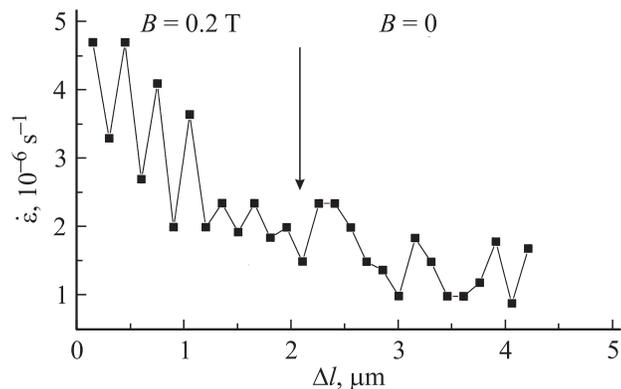


Рис. 2. Зависимость скорости микропластической деформации монокристаллов цинка от величины деформации при сжатии в магнитном поле и без поля. Стрелкой показан момент выключения поля. Угол между плоскостью базиса и осью образца 90° . Предварительная деформация 2%. Напряжение 80 МПа. Характеристики скачков деформации: $L = 300$ nm, $h = 1.5$ ($B = 0.2$ T) и $L = 600$ nm, $h = 2$ ($B = 0$).

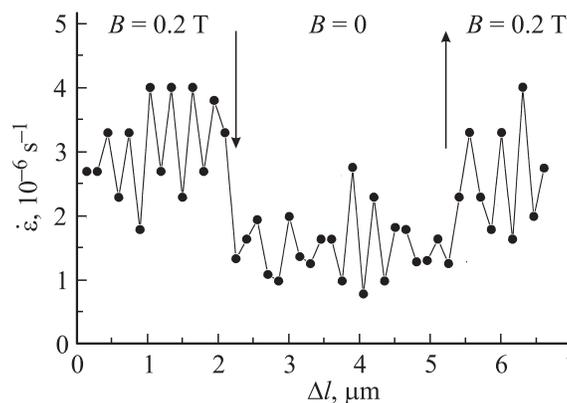


Рис. 3. Зависимость скорости микропластической деформации монокристаллов цинка от величины деформации при сжатии в магнитном поле и без поля. Стрелками показаны моменты выключения и включения поля. Угол между плоскостью базиса и осью образца 45° . Предварительная деформация 5%. Напряжение 20 МПа. Характеристики скачков деформации: $L = 300\text{--}330$ nm, $h = 1.6\text{--}1.8$ ($B = 0.2$ T) и $L = 450$ nm, $h = 2.3$ ($B = 0$).

мент удаления магнитного поля в процессе ползучести монокристалла Zn с плоскостью базиса, перпендикулярной оси сжатия. Как следует из рис. 2, при этом происходит увеличение как среднего периода колебаний L (величины скачка деформации) от 300 до 600 nm, так и среднего размаха колебаний h от 1.5 до 2. Образец перед нагружением находился в магните 1 h, а ползучесть длилась несколько минут. В этом случае реакция на изменение поля проявляется за время менее минуты.

Подобный результат наблюдается и на кристаллах цинка с плоскостью базиса, наклонной к оси сжатия (рис. 3). Время действия магнитного поля в процессе ползучести занимает несколько минут. Из рис. 3

видно, что воздействие поля обратимо, т.е. параметры скачков после удаления и повторного введения поля возвращаются к прежним значениям. Изменение L и h при удалении поля составляет от 300 до 450 nm и от 1.6 до 2.3 соответственно. При повторном включении поля величина L уменьшалась до 330 nm, а значение h — до 1.8. Таким образом, в монокристаллах цинка с разной ориентацией плоскости базиса по отношению к оси сжатия при небольших равномерных по длине образца общих деформациях (2–5%) и при коротких временах действия магнитного поля в процессе ползучести периоды L колебаний скорости и размах колебаний h уменьшаются при включении поля и возрастают после выключения поля (рис. 2, 3). Средняя скорость деформации, как это следует из данных рис. 1–3, при включении магнитного поля увеличивается, а при выключении уменьшается. Ориентация кристалла сказывается только на величине напряжений, которые требуются для достижения одной и той же деформации. Преимущественным при комнатной температуре механизмом деформации является базисное скольжение дислокаций. Однако если плоскость базиса перпендикулярна нагрузке, то касательные напряжения в ней равны нулю, и деформация развивается путем пирамидального скольжения или двойникованием, для чего необходимы более высокие напряжения [23].

Помимо опытов с включением и выключением магнитного поля в процессе ползучести проводились исследования магнитного последствия с длительной выдержкой образцов в магнитном поле перед нагружением, а также с выдержкой разной длительности после разгрузки и выключения магнитного поля. Оказалось, что длительные экспозиции обоих типов влияют на скорость деформации и характеристики скачков при

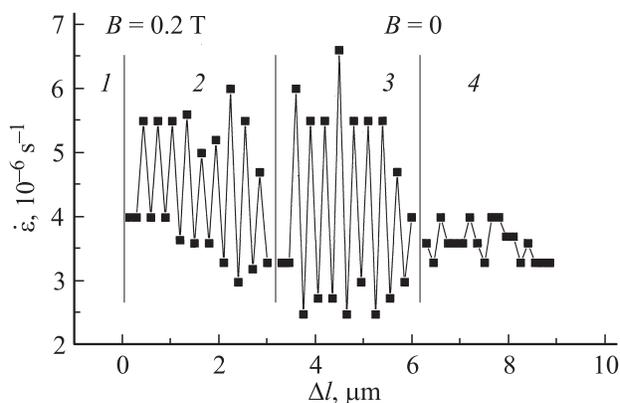


Рис. 4. Зависимость скорости микропластической деформации монокристаллов цинка от величины деформации при сжатии в магнитном поле и без поля. Угол между плоскостью базиса и осью образца 45° . 1 — предварительная выдержка в магнитном поле $B = 0.2$ T в течение 4 дней без нагрузки; 2 — $\sigma = 20$ МПа, $B = 0.2$ T; 3, 4 — $\sigma = 20$ МПа, $B = 0$. Между участками 2 и 3, а также между 3 и 4 выдержка без нагрузки в течение часа и 4 дней соответственно. Характеристики скачков деформации: $L = 300$ nm, $h = 1.5$ (область 2); $L = 300$ nm, $h = 2.1$ (3); $L = 450\text{--}750$ nm, $h = 1.2$ (4).

последующем нагружении. На рис. 4 приведен пример длительного предварительного действия магнитного поля (четверо суток) на ползучесть монокристалла цинка с ориентацией 45° к оси сжатия. Средняя скорость деформации слегка возросла по сравнению с образцом, который не подвергался предварительной выдержке в магнитном поле (см. начальные участки рис. 3 и 4), однако периоды колебаний L не изменились, а величины отношения скоростей деформации $h = \dot{\epsilon}_{\max}/\dot{\epsilon}_{\min}$ изменились слабо ($L = 300 \text{ nm}$, $h=1.5$). Возможно, изменения L не обнаружено из-за недостаточного разрешения метода.

После проведения описанных выше измерений образец разгружался и „релаксировал“ вне поля в течение 1 h и снова нагружался при $B = 0$ (рис. 4). Выдержка вне поля увеличила неоднородность скорости ($h = 2$), но периоды колебаний скорости остались прежними ($L = 300 \text{ nm}$), и средняя скорость деформации изменилась слабее, чем на рис. 3. После новой разгрузки и длительной выдержки при $B = 0$ в течение четырех суток средняя скорость упала до величин, примерно в 1.3 раза меньших скорости деформации в магнитном поле, т.е. восстановилось соотношение между средними скоростями в поле и без него, показанное на рис. 3. Периоды колебаний скорости увеличились значительно (до $450\text{--}750 \text{ nm}$), а величина h уменьшилась по сравнению с параметром h в магнитном поле: $h = 1.2$. Таким образом, если рассматривать средние величины скорости $\dot{\epsilon}$ и скачка деформации L , то МПЭ и последствие приводят к одинаковым результатам — поле увеличивает скорость и уменьшает скачки деформации. Однако отношение скоростей деформации в скачке может вести себя по-разному при сложных режимах воздействия магнитного поля и нагружения.

Для монокристаллов цинка с плоскостью базиса, наклоненной под 45° к оси сжатия, деформированных до $\sim 5\%$ в магнитном поле и вне поля, была проведена оценка эффективных активационных объемов по изменению скорости деформации при скачке напряжений $V_{\text{эф}} = kT(\partial \ln \dot{\epsilon} / \partial \sigma)_T$. Эффективный активационный объем при деформировании вне магнитного поля оказался равным 3 nm^3 , а при деформировании в поле — 2 nm^3 при погрешности измерения $\pm 0.1 \text{ nm}^3$. Таким образом, влияние магнитного поля на величины L и $V_{\text{эф}}$ одинаково: и в том и в другом случае наблюдается уменьшение при деформировании в поле. Аналогичной была реакция на магнитное поле у полимерных смол. Так, в [4] было показано, что значение L и активационный объем процесса деформации для смол с глобулярной структурой уменьшаются в магнитном поле. В [4] высказывается предположение, что под влиянием поля макроглобулы распадаются на более мелкие, и это является причиной изменения характеристик скачкообразной ползучести. Полученные в настоящей работе данные позволяют полагать, что разрушение в магнитном поле парамагнитных примесных стопоров для движения дислокаций и распад стопоров на более мелкие [14] приводят к облегчению движения дислокаций, а также к уменьшению

связанных со средним пробегом между препятствиями характеристик деформации, какими являются L , и $V_{\text{эф}}$. Неоднозначный результат длительных воздействий (магнитного последствия, отдыха) свидетельствует о сложности структурных перестроек и процессов возврата, связанных с МПЭ.

На основании проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы.

1) Средняя скорость деформации монокристаллов цинка, как и других диамагнетиков, изменяется (возрастает) в постоянном магнитном поле; следовательно, диамагнетики, работающие в магнитных полях, могут со временем изменять пластические свойства.

2) Величины скачков деформации субмикронного уровня уменьшаются в магнитном поле и возрастают вне поля.

3) Существуют кратковременные и длительные эффекты, связанные с магнитным полем и изменяющие характеристики скачков деформации.

4) На разных материалах наблюдается одинаковая реакция характеристик скачков деформации и средней скорости ползучести на магнитное поле. Можно предполагать, что поле разрушает стопоры с сильными связями, препятствующие движению дислокаций (или сильные нехимические связи между молекулами в полимерах), заменяя их более слабыми стопорами.

Таким образом, слабое магнитное поле увеличивает среднюю скорость и уменьшает величину скачков деформации. Однако при сложных режимах воздействия поля и нагрузки, включающих предварительное воздействие поля, разгрузку и другие факторы, результирующая реакция твердого тела на такое воздействие может отличаться от простых случаев.

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. Суровова, П.Н. Якушев. ФТТ **34**, 2111 (1992).
- [3] Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев, А.Б. Синани. ФТТ **40**, 681 (1998).
- [4] Н.Н. Песчанская, А.Б. Синани. ФТТ **50**, 177 (2008).
- [5] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов. Письма в ЖЭТФ **61**, 583 (1995).
- [6] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов. ФТТ **37**, 2118 (1995).
- [7] Б.И. Смирнов, В.В. Шпейзман, Н.Н. Песчанская, Р.К. Николаев. ФТТ **44**, 1915 (2002).
- [8] А.А. Урусовская, В.И. Альшиц, А.Е. Смирнов, Н.Н. Беккауэр. Письма в ЖЭТФ **65**, 470 (1997).
- [9] Н.Н. Гершензон, Д.О. Залпимиани, П.В. Манджгаладзе, О.А. Похотелов. ФТТ **28**, 708 (1986).
- [10] Н.А. Тяпунина, В.Л. Красников, Э.П. Белозерова. Кристаллография **45**, 156 (2000).
- [11] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов. Материаловедение **6**, 2 (2000).

- [12] Ю.А. Осипьян, Ю.И. Головин, Р.Б. Моргун, Р.К. Николаев, И.П. Пушкин, С.З. Шмурак. ФТТ **43**, 1333 (2001).
- [13] А.И. Пинчук, С.Д. Шаврей. ФТТ **43**, 39 (2001).
- [14] Ю.И. Головин. ФТТ **46**, 769 (2004).
- [15] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, О.Л. Казакова, Е.Ю. Михина, Е.А. Петржик. Письма в ЖЭТФ **63**, 628 (1996).
- [16] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, И.В. Гектина, Ф.Ф. Лаврентьев. Кристаллография **35**, 1014 (1990).
- [17] О.И. Дацко, В.И. Алексеенко. ФТТ **39**, 1234 (1997).
- [18] Ю.В. Осинская, А.В. Покоев. ФХОМ **3**, 18 (2003).
- [19] Л.Р. Дунин-Барковский, Р.Б. Моргун, Y. Tanimoto. ФТТ **47**, 1241 (2005).
- [20] Н.Н. Песчанская, В.В. Шпейзман, А.Б. Синани, Б.И. Смирнов. ФТТ **46**, 1991 (2004).
- [21] P.W. Bridgman. Proc. Am. Arts Sci. **60**, 303 (1925).
- [22] Н.Н. Песчанская, Ю. Христова. ФТТ **48**, 1786 (2006).
- [23] Ф.Р.Н. Набарро, Э. Базинский, Д.Б. Холт. Пластичность чистых монокристаллов. Металлургия, М. (1967). 214 с.