

Сергей Андреевич НЕВСКИЙ —
аспирант кафедры физики
nevskiy_sa@physics.sibsiiu.ru

Сергей Валерьевич КОНОВАЛОВ —
докторант кафедры физики,
кандидат технических наук, доцент
konovalov@physics.sibsiiu.ru

Виктор Евгеньевич ГРОМОВ —
зав. кафедрой физики,
заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук, профессор
Сибирский государственный
индустриальный университет
gromov@physics.sibsiiu.ru

УДК 538.9

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА АКТИВАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ*

INFLUENCE OF ELECTRICAL POTENTIAL ON ACTIVATION PARAMETERS OF THE STRESS RELAXATION OF TECHNICALLY PURE ALUMINIUM

АННОТАЦИЯ. Проведено исследование влияния электрического потенциала на изменение активационных параметров релаксации напряжений (активационного объема и коэффициента чувствительности скорости пластической деформации к изменению внешнего напряжения) в технически чистом алюминии А 85 при наложении электрических потенциалов от -1,5 до 1,5 В. Получены зависимости относительного изменения данных параметров от величины электрического потенциала.

SUMMARY. The authors of the article investigated the influence of electrical potential on change of activation parameters of a stress relaxation (activation volume and sensitivity coefficient of velocity of plastic strain to external stress change) in technically pure aluminum A 85 at the application of electrical potential from -1,5 to 1,5 V. Dependencies of relative change of the given parameters on magnitude of electric potential are gained.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Релаксация напряжений, электрический потенциал, активационный объем, технически чистый алюминий.

KEY WORDS. Relaxation, electrical potential, activation volume, technically pure aluminum.

Введение

Исследование влияния внешних энергетических воздействий на процессы пластической деформации является одной из актуальных проблем физики конденсированного состояния. К настоящему времени установлено, что

* Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.» (госконтракт № П411).

различного рода внешние энергетические воздействия изменяют физические и механические свойства материалов. Большие успехи достигнуты в изучении влияния электрических воздействий: импульсного токового воздействия [1]; [2], воздействия электростатическим полем большой напряженности [3]. Последнее хорошо изучено в диэлектрических кристаллах. В случае металлов исследование влияния электростатических полей усложняется, так как в них содержится большое число свободных носителей заряда, которые экранируют всякое воздействие электрическим полем. В этом случае выгоднее всего изменять электрический потенциал поверхности образца. Наложение малых электрических потенциалов на образцы, подвергающиеся ползучести, приводит к изменению ее скорости [4] и способствует увеличению степени самоорганизации дислокационной субструктуры в зоне разрушения, по сравнению с материалом, разрушенным при ползучести в обычных условиях [5]; [6].

Для понимания физики процессов, протекающих при пластической деформации в условиях приложения слабых электрических потенциалов, полезными будут данные по изменению активационных параметров процесса в этих условиях.

Целью данной работы являлся анализ изменения активационных параметров процесса релаксации напряжений технически чистого алюминия А85 при наложении электрических потенциалов от $-1,5$ до $+1,5$ В.

Материал и методика эксперимента

Исследования выполнены на образцах технически чистого алюминия А85. Для снятия остаточных напряжений образцы после изготовления отжигались при 773 К в течение 2-х часов. Нагружение образцов осуществлялось на деформационной машине с автоматической регистрацией усилий во времени [7]. При достижении напряжения $\sigma_0 = 57 \pm 0,5$ МПа со скоростью деформирования $0,002$ с⁻¹ нагружение прекращалось и далее регистрировался спад усилия в процессе релаксации напряжений.

В настоящей работе, как и в работах [4-6], подведение электрического потенциала в диапазоне от $-1,5$ В до $+1,5$ В к образцу осуществлялось от внешнего стабилизированного источника при его электрической изоляции от испытательной установки. Статистический анализ проводили по 15 образцам, подвергнутым испытаниям на сжатие, как с приложением электрического потенциала, так и без него; во всех случаях вычислялась средняя квадратичная ошибка.

Из релаксационных кривых, полученных при проведении экспериментов, по методикам, приведенным в [8-10], определялись параметры, характеризующие термически активированную релаксацию напряжений: активационный объем γ и коэффициент чувствительности скорости пластической деформации к изменению внешнего напряжения m .

Эффект влияния электрического потенциала характеризовался величинами относительного изменения активационного объема ζ и коэффициента чувствительности скорости пластической деформации к изменению внешнего напряжения ξ , определяемыми по формулам:

$$\zeta = \frac{\gamma_{el} - \gamma_0}{\gamma_0}, \quad (1)$$

$$\xi = \frac{m_{el} - m_0}{m_0}, \quad (2)$$

где γ_{el} , m_{el} — значения активационного объема и коэффициента чувствительности скорости пластической деформации к изменению внешнего напряжения при наложении электрического потенциала, а γ_0 и m_0 — без него, соответственно.

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 1 приведены типичные кривые зависимостей глубины релаксации $\Delta\sigma$ от времени испытания, что совпадает с общепринятыми представлениями о кинетике процесса в таких условиях [11]. Кривая 1 описывает релаксацию напряжений в обычных условиях ($\varphi = 0$ В), кривая 2 получена при наложении электрического потенциала $\varphi = -1$ В, а кривая 3 — при $\varphi = 1$ В. Из рис. 1 видно, что при наложении потенциала происходит ускорение релаксации напряжений.

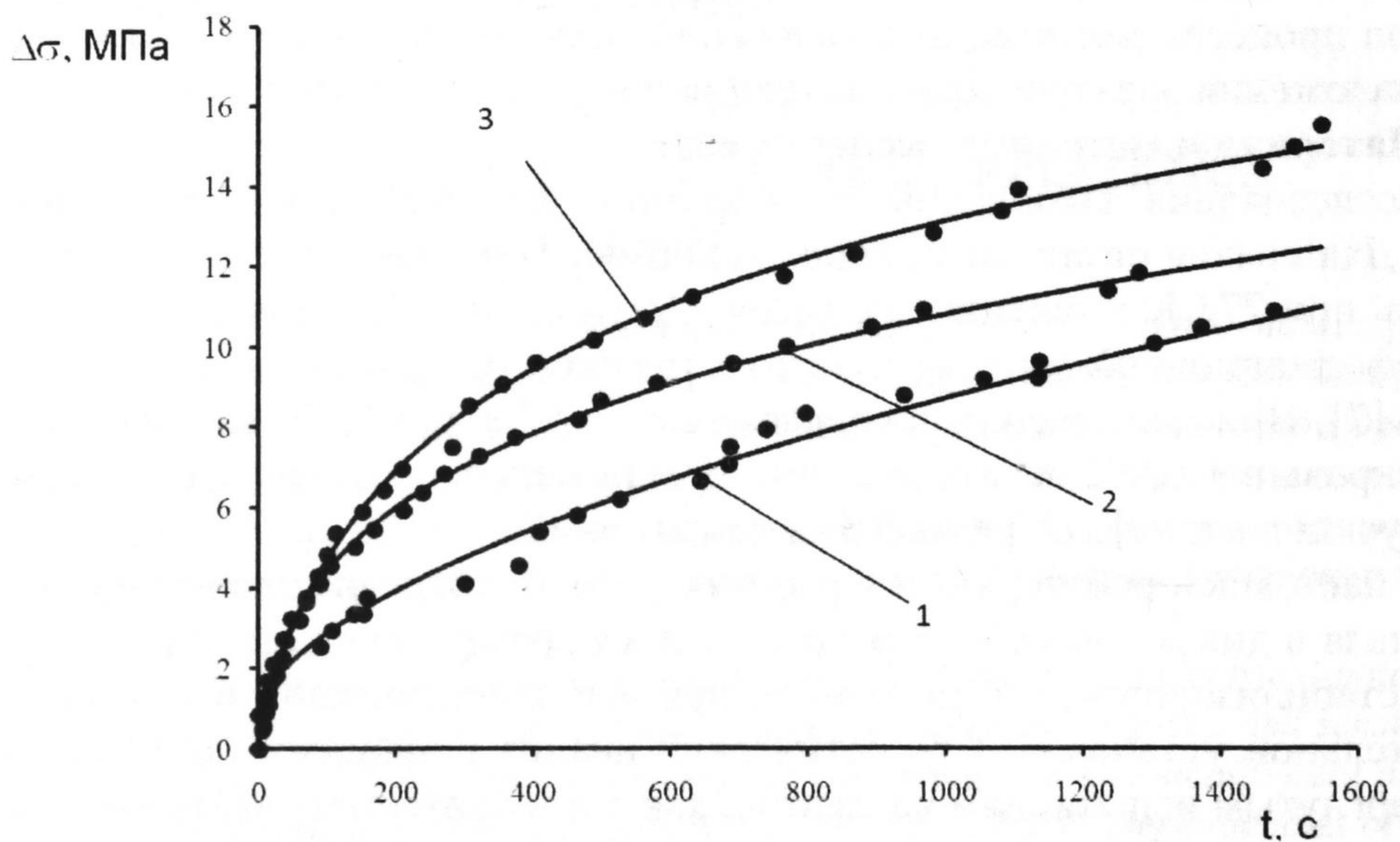


Рис. 1. Изменение глубины релаксации от времени испытания в обычных условиях (кривая 1), при потенциале поверхности -1 В (кривая 2) и +1 В (кривая 3)

Очевидно, что такое существенное изменение процесса релаксации при наложении электрического потенциала должно отразиться на активационных параметрах самого процесса. Видно, что наложение электрического потенциала существенно изменяет активационный объем γ и коэффициент чувствительности скорости пластической деформации к изменению внешнего напряжения m (табл. 1). Отметим, что численные значения активационного объема процесса, ответственного за релаксацию напряжений, на порядок превышают значение этого параметра, полученного в [12] для крупнокри-

сталлического алюминия и на порядок меньше того же значения, полученного в [13] для алюминия, находящегося в мелкокристаллическом состоянии. Однако данные [12-13] получены для алюминия, подвергнутому низкотемпературной ползучести.

Таблица 1

Изменение активационных параметров при наложении электрического потенциала в процессе релаксации напряжений

$\varphi, \text{В}$	$\gamma_{\text{ср}}, 10^{-27} \text{ м}^3$	$m_{\text{ср}}$
-1,5	1,19	9,14
-1	1,35	10,7
-0,5	1,29	13,0
0	1,70	14,4
0,5	1,41	11,3
1	1,27	10,6
1,5	1,39	11,0

Как активационный объем, так и коэффициент чувствительности скорости пластической деформации к изменению внешнего напряжения в рассмотренном интервале $-1,5 \text{ В} \leq \varphi \leq 1,5 \text{ В}$ не зависят от знака приложенного электрического потенциала и по мере увеличения его абсолютного значения уменьшаются (рис. 2, 3).

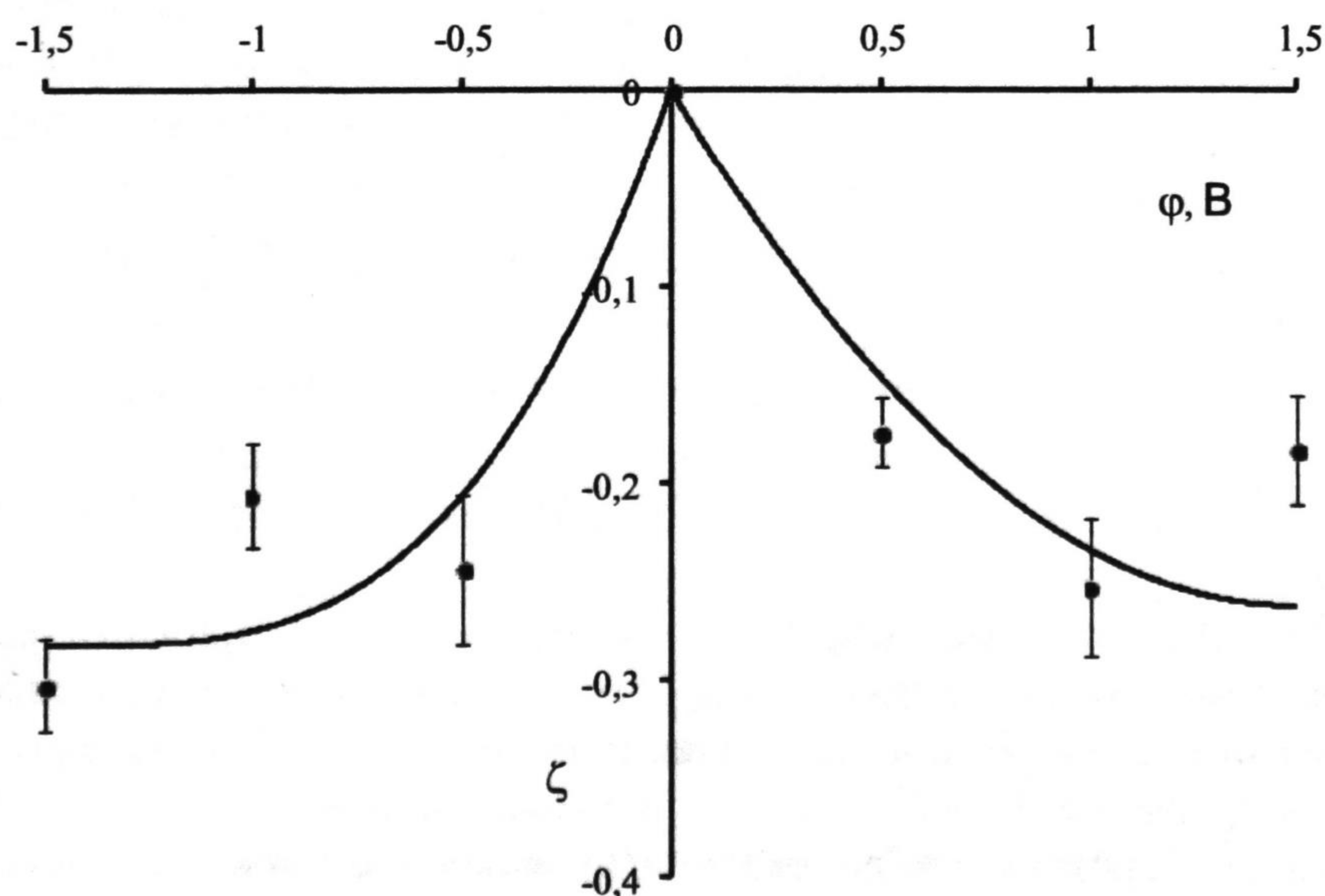


Рис. 2. Зависимость относительного изменения активационного объема от электрического потенциала

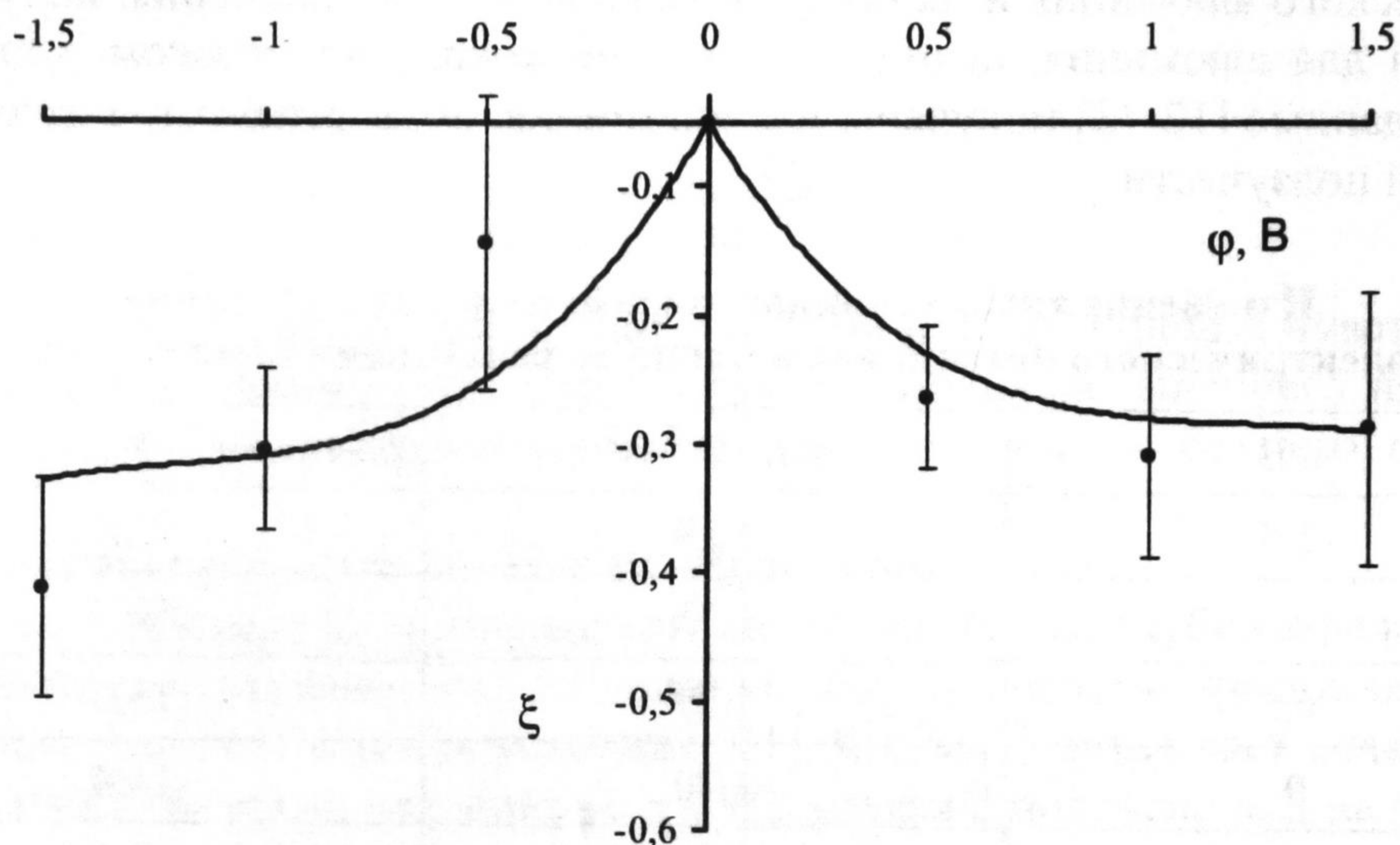


Рис. 3. Зависимость относительного изменения коэффициента чувствительности скорости пластической деформации к изменению внешнего напряжения от электрического потенциала

Согласно [14] пластическая деформация при низких температурах (для алюминия < 400 К) протекает за счет обычного дислокационного скольжения, блокированного слабыми препятствиями, которые преодолеваются за счет термических флуктуаций. При этом $\gamma = bld$ [14]. Полагая, что поперечник локального стопора $d \approx b$ (b — вектор Бюргерса), можно считать коэффициент перенапряжения пропорциональным длине дислокационной петли l , освобождающейся в ходе акта термической активации. Так как в алюминии $b = 0.286$ нм [14], то $l \approx \gamma / b^2 \approx 20$ нм. Порядок этой величины может определяться средним расстоянием $l \approx \rho^{-1/2}$ между дислокациями «леса», очевидно, играющими роль центров закрепления, при значении плотности дислокаций $\rho \approx 2 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$.

Так как $\rho \sim \gamma^2$, то уменьшение активационного объема при наложении электрического потенциала может быть обусловлено увеличением плотности дислокаций. Этим, по-видимому, и объясняется такое различие в кривых, приведенных на рис. 1.

Коэффициент m характеризует зависимость скорости пластической деформации от внешнего напряжения [9] и позволяет определить работу, совершаемую дислокацией для преодоления препятствий [10], которая рассчитывается по формуле $A = mkT$, где k — постоянная Больцмана, T — термодинамическая температура. Следовательно, уменьшение значения величины m в процессе релаксации напряжений при наложении электрического потенциала (рис. 3) свидетельствует о возможном уменьшении работы, совершаемой дислокацией для преодоления препятствий.

Однако для установления причин изменения плотности подвижных дислокаций и механизма их блокировки требуются дополнительные исследования с привлечением прецизионных методов физического металловедения.

Выводы

Таким образом, при проведении испытаний на релаксацию напряжений технически чистого алюминия с наложением электрического потенциала получены зависимости относительного изменения активационного объема и коэффициента чувствительности скорости пластической деформации к изменению внешнего напряжения от его величины. Показана независимость указанных параметров от знака потенциала. Сделано предположение о связи установленных изменений с плотностью подвижных дислокаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Proceedings of China-Russia Symp.: Electroplastic effect in metals / Ed. Gromov V, Tang G. Novokuznetsk: SibSIU, 2007. 319 p.
2. Book of the International seminar articles: Electromagnetic fields effect on the structure and characteristics of materials / Ed. Baranov Yu., Gromov V., Tang G. Novokuznetsk: Novokuznetskii Polygraphic Center, 2008. 380 p.
3. Зуев Л.Б. Физика электропластичности щелочно-галлоидных кристаллов. Новосибирск: Наука, 1990. 120 с.
4. Коновалов С.В., Данилов В.И., Зуев Л.Б. и др. О влиянии электрического потенциала на скорость ползучести алюминия // ФТТ. 2007. Т.49. С. 1389-1391.
5. Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Столбоушкина О.А. Роль электрического потенциала в ускорении ползучести и формировании поверхности разрушения Al // Известия РАН. Сер. Физическая 2009. Т. 73 № 9. С. 1315–1318.
6. Gromov, V.E., Ivanov, Yu.I., Stolboushkina, O.A. Dislocation substructure evolution on Al creep under the action of the weak electric potential // Material Science and Engineering A 2010.V. 527. № 3. P. 858-861.
7. Коновалов С.В., Данилов В.И., Зуев Л.Б. и др. Автоматизированная установка для регистрации и анализа ползучести // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 8. С. 64-66.
8. Ивенс А. Термически активированная деформация кристаллических материалов // Термически активированные процессы в кристаллах / Под ред. А.Н. Орлова. М.: Мир, 1973. 200 с.
9. Гайдученя В.Ф., Калмыков Э.Б., Мишакин В.В. Количественные параметры быстрой релаксации напряжений в гранулированном высокопрочном алюминиевом сплаве // ФММ. 1988. Т. 65. Вып. 8. С. 1186-1190.
10. Dotsenko V.I. Stress relaxation in crystals // Physica Status Solidi (b). 1979. V. 93. P. 11-43.
11. Борздыка А.М., Гецов Л.Б. Релаксация напряжений в металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1978. 256 с.
12. Данилов В.И., Яворский А.А., Зуев Л.Б. и др. Волновые явления при ползучести крупнокристаллического алюминия // Известия вузов. Физика. 1991. № 4. С. 5-8.
13. Данилов В.И., Коновалов С.В., Журавлева С.В. и др. Макролокализация пластической деформации при ползучести мелкокристаллического алюминия // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 3. С. 92-95.
14. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. М.: Мир, 1972. 408 с.