

**Владимир Александрович ПЕТРУНИН** —  
доцент кафедры физики,  
кандидат физико-математических наук

**Дмитрий Валерьевич ЗАГУЛЯЕВ** —  
аспирант кафедры физики,  
zagulyaev\_dv@physics.sibsiu.ru

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

**Виктор Евгеньевич ГРОМОВ** —  
зав. кафедрой физики,  
доктор физико-математических наук, профессор  
заслуженный деятель науки РФ,  
gromov@physics.sibsiu.ru

Сибирский государственный индустриальный университет  
(г. Новокузнецк)

УДК 548.4

## **ВЛИЯНИЕ СЛАБОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ ПОЛЗУЧЕСТИ АЛЮМИНИЯ\***

### **INFLUENCE OF A WEAK MAGNETIC FIELD ON SPEED CHANGE OF ALUMINIUM CREEP**

**АННОТАЦИЯ.** Проведен теоретический анализ эффекта влияния слабого магнитного поля на поликристаллический алюминий, подвергаемый ползучести с позиций представлений, лежащих в основе магнитопластического эффекта. Установлена хорошая корреляция теоретических и экспериментальных данных.

**SUMMARY.** The given article offers theoretical analysis of a weak magnetic field influence on the polycrystalline aluminum, subject to creep from positions of the representations underlying the magnetoplastic effect. Good correlation of theoretical and experimental data is determined.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА.** Магнитное поле, магнитопластический эффект, поликристаллический алюминий.

**KEY WORDS.** Magnetic field, magnetoplastic effect, polycrystalline aluminum.

Исследования влияния магнитного поля на эволюцию физических и механических свойств немагнитных металлических материалов, подвергающихся пластической деформации, посвящено огромное количество работ [1], [2], [3]. Тем не менее, данное направление исследований остается актуальным до сих пор, так как влияние магнитного поля необходимо учитывать при работе различного рода прецизионного оборудования.

С другой стороны, анализу влияния магнитного поля на поликристаллические металлы, подвергающиеся такому процессу пластической деформации как ползучесть, посвящено ограниченное количество работ [4], [5]. В связи с этим целью настоящей работы является анализ процесса ползучести поликристаллического алюминия в слабом магнитном поле.

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



Испытания на ползучесть при постоянном растягивающем напряжении ( $\sigma=65$  МПа) проводились на универсальной испытательной машине для растяжения при комнатной температуре. Магнитное поле создавалось электромагнитом с электронным блоком питания и управления. Действие магнитного поля ( $B \leq 300$  мТл) продолжалось в течение всего эксперимента и было направлено перпендикулярно оси растяжения. Для исследований выбран поликристаллический алюминий цилиндрической формы, диаметром 1,75 мм и длиной рабочей части 150 мм, предварительно отожженный при температуре 770 К в течение 1 ч.

Данные для анализа скорости ползучести алюминия, которая определялась на установившейся стадии кривой ползучести (рис. 1, область II), получены по результатам статистической обработки с помощью специального комплекса программ.

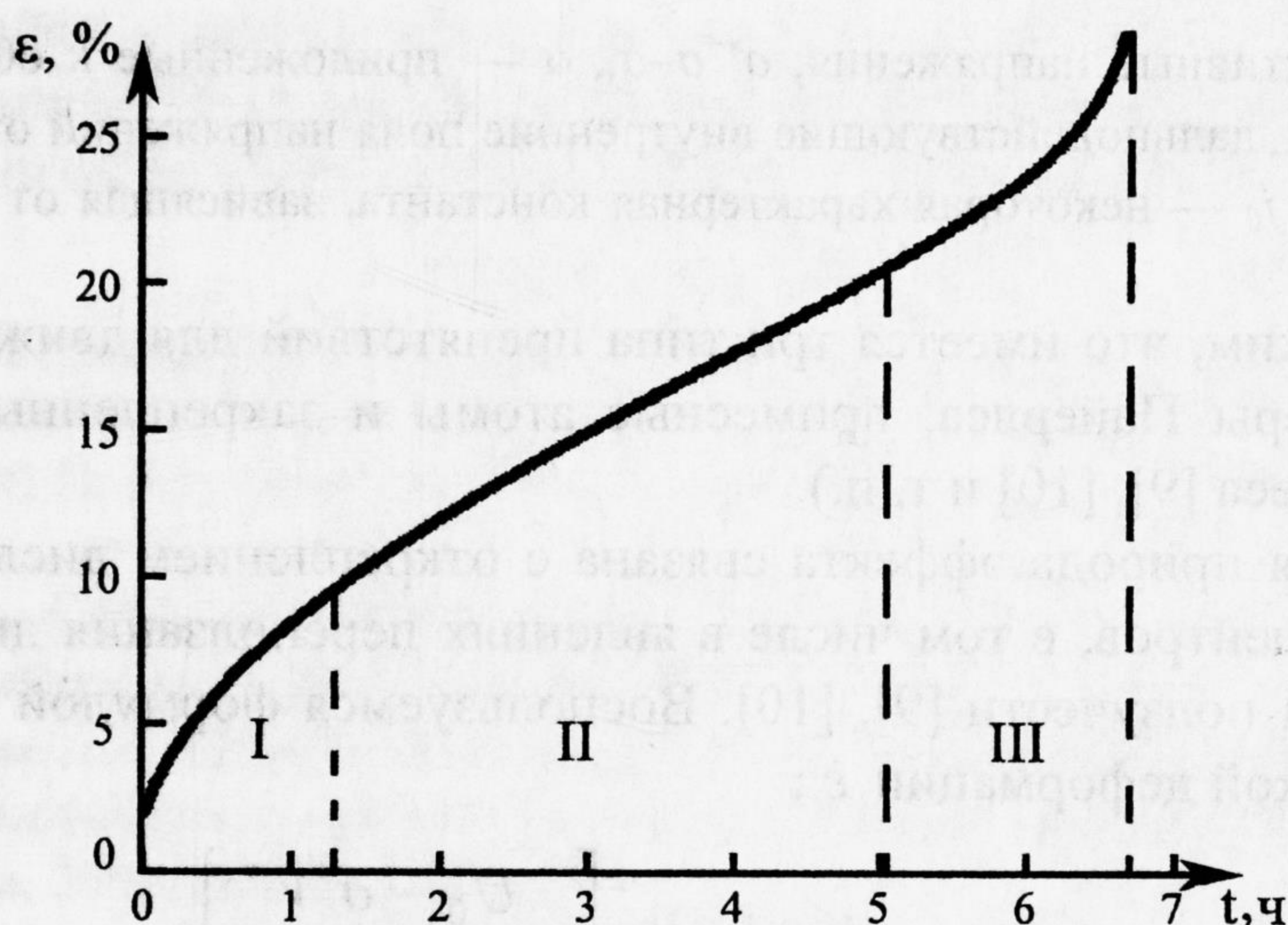


Рис. 1. Типичная кривая ползучести: I — логарифмическая, II — установившаяся, III — ускоренная стадии ползучести

Для количественной оценки влияния магнитного поля на ползучесть использован параметр относительного изменения скорости ползучести на линейной стадии, определяемый по соотношению

$$\xi = \frac{\langle \dot{\varepsilon}_{mg} \rangle - \langle \dot{\varepsilon} \rangle}{\langle \dot{\varepsilon} \rangle},$$

где  $\langle \dot{\varepsilon}_{mg} \rangle$ ,  $\langle \dot{\varepsilon} \rangle$  — значения скорости ползучести при воздействии магнитным полем и без него, усредненные по 20 экспериментальным данным.

Эксперименты с варьированием магнитным полем ( $B \leq 300$  мТл) показали, что зависимость скорости ползучести от магнитной индукции имеет нелинейный характер и при  $B=300$  мТл наблюдается максимальное уменьшение ( $\xi=-0,56$ ) [6].

Рассмотрим эффект влияния магнитного поля на алюминий, подвергаемый ползучести с позиций представлений, лежащих в основе магнитопластического эффекта (МПЭ) [1], [2], [7], [8]. Основным механизмом пластификации металлов в магнитном поле принято считать депиннинг, то есть открепление дислокации [1], [2], [7]. Такой физический механизм МПЭ был впервые



предложен в 1991 г. М.И. Молоцким [7]. Парамагнитные центры, на которых закреплены дислокации, содержат электронные состояния синглетного (S) и триплетного (T) типа, формирующиеся на оборванных (висячих) атомных связях в ядрах дислокаций. Демпинг дислокаций от T-состояний облегчен по сравнению с S-состояниями, так как энергия T-состояний выше [7].

В магнитном поле длина (L) дислокационного сегмента между точечными стопорами (парамагнитными центрами) возрастет под действием процессов демпинга [7]. Основываясь на этом, авторы [7] с помощью активационной формулы для скорости деформации получили соотношение  $\Delta\sigma$  для магнитного вклада в электропластический эффект в тонкой проволоке:

$$\Delta\sigma = \sigma^* \frac{j^2}{j^2 + j_0^2}; \quad (1)$$

где  $\sigma^*$  — эффективные напряжения;  $\sigma^* = \sigma - \sigma_i$ ,  $\sigma$  — приложенные к образцу внешние напряжения;  $\sigma_i$  — дальнедействующие внутренние поля напряжений от дефектов;  $j$  — плотность тока;  $j_0$  — некоторая характерная константа, зависящая от материала проводника.

Предположим, что имеется три типа препятствий для движения дислокаций [2]: барьеры Пайерлса, примесные атомы и закрепленные дислокации (дислокации леса [9], [10] и т. п.).

Физическая природа эффекта связана с откреплением дислокаций от парамагнитных центров, в том числе в явлениях переползания дислокаций, характерных для ползучести [9], [10]. Воспользуемся формулой [7] для скорости пластической деформации  $\dot{\epsilon}$ :

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp\left[-\frac{U_0 - \sigma^* V^*}{kT}\right], \quad (2)$$

где  $U_0$  — энергия активаций пластической деформации [3];  $\sigma^*$  — эффективные напряжения;  $V^*$  — активационный объем;  $k$  — постоянная Л. Больцмана;  $T$  — температура.

Воспользуемся соотношением  $\Delta\sigma = \sigma^* j^2 / j_0^2$  ( $j \ll j_0$ ) для вклада магнитного поля во внутренние напряжения. Тогда с помощью формулы (2) мы получим соотношение:

$$\frac{\dot{\epsilon}_{mg}}{\dot{\epsilon}} = e \frac{\Delta\sigma V^*}{kT} = e \frac{\sigma^* V_{(0)}^* j^2}{kT j_0^2}, \quad (3)$$

где  $V_{(0)}^*$  — активационный объем в отсутствии магнитного поля.

Согласно [7]:

$$V_{(0)}^* = bA_{(0)}^*,$$

где  $b$  — вектор Бюргерса, а  $A_{(0)}^*$  — площадь, заматаемая дислокационным сегментом в процессе его движения.

Активационную площадь запишем в виде  $A_{(0)}^* = L \cdot d$ , где  $L$  — длина дислокационного сегмента между стопорами [7], а  $d$  — ширина стопора [11]. Длина свободного пробега  $\lambda$  дислокации может быть оценена из плотности дислока-



ций  $\rho$  в виде  $\lambda=1/\sqrt{\rho}$ , что соответствует длине дислокационного сегмента между стопорами [8]. Подставляя в (3) значения параметров (в том числе условия эксперимента)  $b=2,86 \text{ \AA}$  (для алюминия [9]),  $\sigma^*=50 \text{ МПа}$ ,  $j_0=3,1 \cdot 10^5 \text{ А/см}^2$  [7],  $\Delta\sigma/\sigma^*=0,09$ ,  $T=293 \text{ К}$ ,  $k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ , мы получим для  $L=15,4 b$ , где  $d=b$  [11], значение  $\frac{\dot{\epsilon}_{mg}}{\dot{\epsilon}}=0,5$ . Тогда относительное изменение ско-

рости ползучести  $\xi = \frac{\dot{\epsilon}_{mg} - \dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}} = -0,5$  (теоретическое значение). Экспериментальное значение графика зависимости  $\xi(B)$  [6] для  $B=300 \text{ мТл}$  равно 0,56, то есть удовлетворительное согласие с теоретическими оценками.

В работе на основе модельных представлений о магнитопластическом эффекте выполнен сравнительный анализ влияния слабого магнитного поля на скорость ползучести поликристаллического алюминия и получено удовлетворительное согласие экспериментальной и теоретической оценок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alshits, V.I., Darinskaya, E.V., Koldaeva, M.V. et al. Magnetoplastic Effect in Non-magnetic Crystals // Dislocations in Solids. Vol. 14. 2008. PP. 333-437.
2. Головин Ю.И. Магнитопластичность твердых тел (Обзор) // ФТТ. 2004. № 5. С. 769-803.
3. Бойко Б.Б., Сойка А.К., Митьковская Л.П. Импульсный магнит с плазменным кроубаром // Приборы и техника эксперимента. 1993. № 5. С. 13-26.
4. Урусовская А.А. Альшиц В.И., Смирнов А.Е. и др. Эффекты магнитного воздействия на механические свойства и реальную структуру немагнитных кристаллов // Кристаллография. 2003. № 5. С. 855-872.
5. Альшиц В.И. Даринская Е.В., Колдаева М.В. и др. Магнитопластический эффект: основные свойства и физические механизмы // Кристаллография. 2003. № 5. С. 826-854.
6. Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Громов В.Е. Ползучесть поликристаллического Al в постоянном магнитном поле // Вестник ЧГУ. Челябинск, 2009. № 24. С. 49-53.
7. Molotskii, M.I., Fleurov, V.N. Magnetic effect's in electroplasticity of metals // Phys. Rev. Vol. B52. 1995. № 22. PP. 15829-15834.
8. Molotskii M.I., Kris R.E., Fleurov V.N. Internal friction of dislocations in magnetic field // Phys. Rev. Vol. B51. 1995. № 18. P. 12531-12536.
9. Фридель Ж. Дислокации. М.: Мир, 1967. 643 с.
10. Хирт Дж., Лоте Й. Теория дислокаций. М.: Атомиздат, 1972. 400 с.
11. Данилов В.И., Коновалов С.В., Журавлева С.В. и др. Макролокализация пластической деформации при ползучести алюминия // ЖТФ. Т. 25. 2005. № 3. С. 92-95.