

05.1

## Влияние постоянного магнитного поля на ползучесть алюминиевого сплава с железосодержащими включениями при растяжении

© В.К. Николаев, А.А. Скворцов, Д.Е. Пшонкин, М. Friha, А.С. Абрамов

Московский политехнический университет, Москва, Россия  
E-mail: skvortsovaa2009@yandex.ruПоступило в Редакцию 27 декабря 2023 г.  
В окончательной редакции 31 января 2024 г.  
Принято к публикации 31 января 2024 г.

Изучено влияние постоянного магнитного поля на процессы ползучести неоднородного алюминиевого сплава с ферромагнитными включениями. Экспериментально обнаружено, что предварительная экспозиция образцов в постоянном магнитном поле с индукцией  $B = 0.3\text{--}0.7\text{ Т}$  приводит к уменьшению ( $\sim 30\%$ ) величины модуля упругости, характеризующего отношение механического напряжения к относительной деформации материала после длительного приложения постоянной нагрузки. Описание наблюдаемых изменений проведено в рамках модели вязкоупругого тела Кельвина. Изменения элемента вязкости в модели определяются возникающими магнитостимулированными изменениями на межфазных границах (включение–матрица).

**Ключевые слова:** ползучесть, алюминиевый сплав, ферромагнитные включения, магнитное поле.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.09.57566.19854

Известно, что явление ползучести возникает, когда твердое тело испытывает постоянное воздействие внешней силы (напряжения), приводящее к зависящему от времени изменению деформации [1]. Возникающие при этом деформации необратимы, даже если напряжение в образце ниже предела текучести. Вопросы ползучести крайне актуальны при проектировании материалов и устройств, работающих в условиях высоких механических нагрузок: компоненты авиационных двигателей (лопатки и диски турбин, камеры сгорания и т. д.), химические реакторы, строительные конструкции и др. [1,2]. Кроме внешних механических сил на материалы и устройства часто оказывают влияние и другие внешние воздействия (электрические, магнитные поля и т. д.), что может существенно влиять на динамику рассматриваемых процессов. Следует также подчеркнуть, что сегодня в технологической практике очень активно применяются металломатричные композиты с различными включениями [2]. Процессы ползучести в таких неоднородных системах также требуют детального исследования и представляются крайне актуальными.

Изучение ползучести металлов и сплавов представляет интерес как с точки зрения практического применения в металлообработке, так и с точки зрения выявления механизмов динамики дефектной структуры материала, приводящей к его разрушению. Существующие сегодня модели ползучести охватывают не только моно-, но и поликристаллы [1,2].

В большинстве случаев изменение ползучести металлов и сплавов связывается с динамикой линейных дефектов во время длительной пластической деформации образцов [3]. Что касается характерных времен развития процессов ползучести, то в зависимости от материала, приложенных механических напряжений и температуры

они могут варьироваться от долей секунд [4–6] до десятков часов [7–9]. Например, при исследовании динамики образования полос деформации в процессе ползучести в сплаве Al–Mg было обнаружено, что запуск этапа деформации на кривой ползучести начинается с зарождения и быстрого расширения полосы первичной деформации, генерирующей сигнал акустической эмиссии в течение 1 ms [5,6]. С другой стороны, при проведении испытания на одноосное растяжение и старение образцов сплава Al–Li, вырезанных под различными углами  $\gamma$  к направлению прокатки материала, процессы ползучести регистрировались на протяжении около 6 h [7].

В ходе изучения влияния электроимпульсной обработки на ползучесть алюминиевых сплавов характерные времена ползучести материала варьировались от 1 до 16 h [8]. При исследовании влияния температуры на деформацию ползучести Al-сплава времена ползучести составляли  $\sim 18\text{ h}$  [9]. В подобных работах рассматривается „классическая“ ползучесть материалов как последствие, происходящее в процессе деформации образцов под воздействием постоянного механического напряжения.

Как отмечалось в [9], наличие в кристаллах преципитатов и включений существенно влияет на механические свойства (в том числе и на процессы ползучести), поскольку они являются дополнительными концентраторами напряжений и центрами локализации структурных дефектов [10,11]. Примером структурно-неоднородных материалов являются сплавы алюминия с железосодержащими включениями. Внешние воздействия (постоянное магнитное поле, электрический ток, отжиг) могут существенно влиять на механические свойства таких материалов. Ранее нами было обнаружено влияние постоянного магнитного поля на процессы

пластической деформации алюминиевых сплавов с ферромагнитными включениями [12]. Однако переходные процессы при нагрузке-разгрузке образца и влияние на них предварительной магнитной экспозиции рассмотрены не были. Поэтому цель настоящей работы состоит в рассмотрении магнитоиндуцированных переходных процессов в условиях ползучести алюминиевого сплава с железосодержащими включениями.

Как и ранее, объектом исследования были плоские алюминиевые образцы, состоящие из головок, предназначенных для закрепления образца в захватах, и рабочей части с постоянным поперечным сечением  $S_0 = h_0 b_0$  ( $h_0 = 3 \text{ mm}$ ,  $b_0 = 5 \text{ mm}$ ) и длиной  $l_0 = 30 \text{ mm}$  [12,13].

Структура и химический состав матрицы и включений анализировались с помощью оптической (Метам-Р1, Россия) и сканирующей (Jeol JSM-7610F Plus, Япония) электронной микроскопии, а также методами рентгеноструктурного анализа (Bruker D8 Discover, Германия). Результаты исследований позволили определить химический состав матрицы ( $C_{Al} \leq 95.8 \text{ at.}\%$ ,  $C_{Fe} \leq 0.6 \text{ at.}\%$ ,  $C_{Mn} \leq 0.4 \text{ at.}\%$ ,  $C_{Si} \leq 2.3 \text{ at.}\%$ , остальное — прочие примеси, в том числе O, B) и включений ( $C_{Al} \leq 52.6 \text{ at.}\%$ ,  $C_{Fe} \leq 46.2 \text{ at.}\%$ ,  $C_{Si} \leq 0.6 \text{ at.}\%$ , остальное — прочие примеси, в том числе O, Mg, B). По данным рентгеноструктурных исследований матрицы и включений были обнаружены фазы Al и  $Fe_4Al_{13}$  ( $FeAl_3$ ), что согласуется с результатами, полученными нами ранее [13].

Исследования ползучести материала при одноосном нагружении образцов были проведены на установке рычажного типа (при соотношении сил 1:10). Она обеспечивала постоянство нагрузки в процессе измерения, а также возможность ступенчатого приложения и снятия нагрузки на образцы. Процессы измерения осуществлялись при комнатной температуре. Удлинение в процессе испытаний образца на растяжение регистрировалось с помощью стрелочного микрометра ( $\pm 10 \mu\text{m}$ ), показания которого в процессе ползучести фиксировались с помощью цифровой камеры (скорость записи 30 кадров в секунду). Источником постоянного магнитного поля (МП) служили неодимовые магниты с максимальной величиной индукции МП  $B = 0.7 \text{ T}$ . Время экспозиции в постоянном МП составляло 30 min при комнатной температуре.

Для анализа переходных процессов при нагрузке образцов в условиях ползучести рассмотрим вязкоупругое тело Кельвина [14]:

$$\sigma + n \frac{d\sigma}{dt} = H\varepsilon + nE \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (1)$$

Здесь и далее  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  — действующее механическое напряжение и относительная деформация образца соответственно,  $n$  — время релаксации. В случае ступенчатого приложения нагрузки, когда  $n \frac{d\sigma}{dt} \gg \sigma$  и  $nE \frac{d\varepsilon}{dt} \gg H\varepsilon$ , первыми слагаемыми в правой и левой частях выражения (1) можно пренебречь. Тогда выражение принимает

вид

$$\frac{d\sigma}{dt} = E \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (2)$$

и, следовательно,  $\sigma = E\varepsilon$ .

Следовательно, величина  $E$  — это мгновенный модуль упругости (отношение напряжения к относительной деформации при ступенчатом приложении нагрузки). В случае очень медленного приложения нагрузки, когда производные в (1) малы и ими можно пренебречь, из (1) следует

$$\sigma = H\varepsilon. \quad (3)$$

Здесь величина  $H$  имеет смысл модуля упругости (отношение напряжения к относительной деформации материала после длительного приложения постоянной нагрузки).

Для алюминиевого сплава, упрочненного микроскопическими железосодержащими включениями, использовалась трехзвенная модель Кельвина. В модели учитываются модули упругости матрицы  $E_1$  и включения  $E_2$ . Если напряжение  $\sigma_0$  задается в виде ступеньки („мгновенное“ нагружение), то деформация  $\varepsilon(t)$  будет стремиться к постоянному значению  $\varepsilon(t) = \sigma_0/H$ , где величина  $H$  в нашей модели будет определяться как

$$H = \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \dots + \frac{1}{E_k} \right)^{-1}.$$

Поскольку в рассматриваемой модели количество упругих элементов  $k = 2$ , имеем

$$H = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2}.$$

Таким образом, за счет предварительной экспозиции образцов в магнитном поле и последующей магнитоиндукции включений в приграничных областях вокруг включений возникает пластическая деформация, вследствие этого изменяются модули упругости  $E_1$  и  $H$ .

Применительно к экспериментальному образцу (прямолинейный стержень), на который в момент  $t = t_1 = 0$  начинает действовать механическое напряжение  $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$ , динамика деформации в этом случае примет вид [14]:

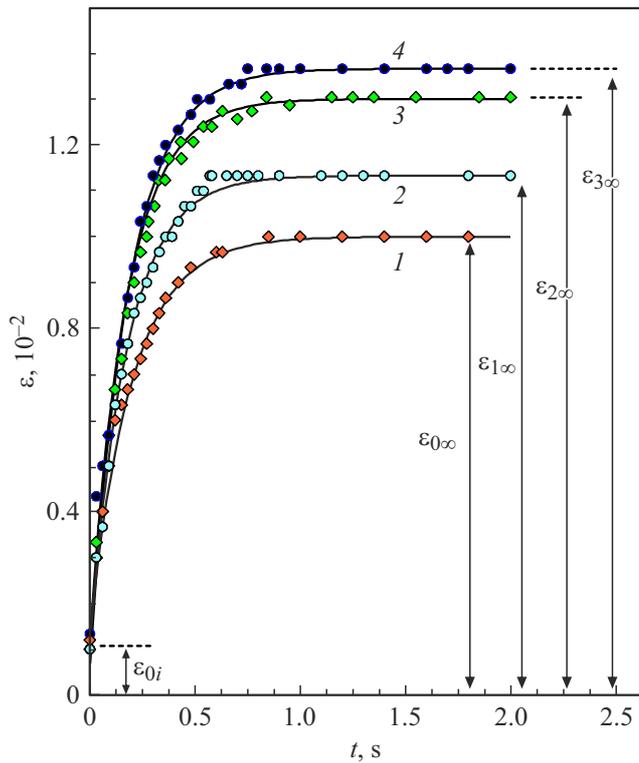
$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{H} \left( 1 - \left( 1 - \left( \frac{H}{E} \right) e^{-\frac{H}{nE} t} \right) \right). \quad (4)$$

При этом в момент времени  $t_1 = 0$  начальная деформация стержня  $\varepsilon(0) = \varepsilon_0 = \sigma_0/E_0$ , а при  $t \rightarrow \infty$  относительное удлинение стержня  $\varepsilon(t) = \varepsilon_\infty = \sigma_0/H$ .

Рассмотрим теперь динамику ползучести нашего образца при растяжении ( $\sigma_0 = \text{const}$ ) после экспозиции его в постоянном магнитном поле. Результаты исследований приведены на рис. 1. Полученная зависимость описывает процесс ползучести материала при постоянном напряжении. Нетрудно видеть (кривая 1 на рис. 1), что при действии  $\sigma_0$  с течением времени мгновенная

Полевая зависимость механических характеристик образцов при мгновенном нагружении

№ п/п	Параметр	Величина индукции МП $B$ , Т			
		0	0.3	0.5	0.7
1	Относительная деформация $\varepsilon_{i0}$ , $10^{-2}$	0.10	0.12	0.10	0.10
2	Относительная деформация $\varepsilon_{i\infty}$ , $10^{-2}$	9.7	11.2	13.0	13.8
3	Модуль $E$ , GPa	70	60	70	70
4	Модуль $H$ , GPa	6.7	5.9	5.1	4.9



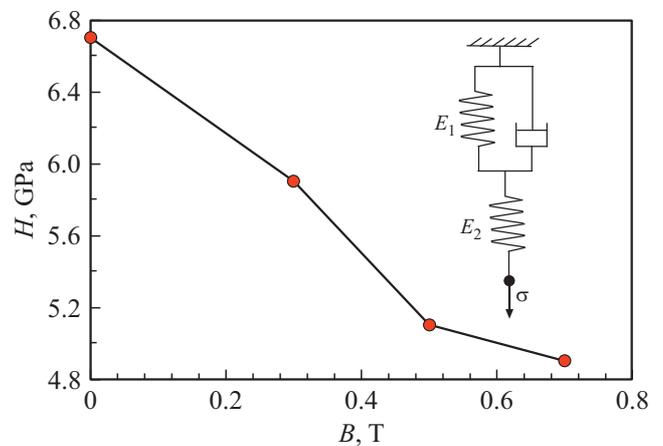
**Рис. 1.** Полевая зависимость кривых ползучести  $\varepsilon(t)$  образцов после „мгновенного“ приложения нагрузки  $\sigma_0 = 66.7$  МПа. Экспозиция образцов осуществлялась непосредственно перед испытаниями на ползучесть в течение 30 min при комнатной температуре при индукции однородного магнитного поля  $B = 0$  (1), 0.3 (2), 0.5 (3) и 0.7 Т (4).

деформация растет и асимптотически приближается к величине  $\sigma_0/H$ .

Помимо роста пластической деформации материала после предварительной магнитной экспозиции наблюдаются изменения в динамике деформации (кривые 2–4 на рис. 1): с увеличением магнитной индукции  $B$  происходит увеличение величины  $\varepsilon_\infty$ . Результаты обработки экспериментальных данных сведены в таблицу. В результате многочисленных экспериментов зафиксировано снижение величины модуля упругости  $H$  после предварительного магнитного экспонирования образцов. За-

висимость модуля  $H$  образцов от индукции магнитного поля представлена на рис. 2. Как было выяснено нами ранее [13], МП оказывает влияние на дефектную структуру за счет магнитострикции железосодержащих включений в матрице сплава (вставка на рис. 2). Возникающие локальные механические напряжения приводят к увеличению концентрации свежесозданных дислокаций в приграничных областях раздела фаз, которые в дальнейшем участвуют в процессе пластического течения материала. Увеличение  $B$  приводит к росту локальных напряжений на межфазных границах, в которых растет плотность дислокаций. Такие изменения в дефектной структуре сказываются на всем процессе деформации, в том числе на переходных процессах при нагружении и релаксации напряжений при разгрузке. Модуль  $H$  является структурно-чувствительным параметром, отражающим влияние предварительной магнитной экспозиции на механические свойства исследуемых алюминиевых сплавов (ползучести).

Таким образом, в работе рассмотрены магнитостимулированные изменения ползучести образцов алюминиевого сплава с железосодержащими включениями. Экспериментально обнаружено изменение относительной деформации и модуля упругости образцов  $H$  после предварительной их экспозиции в постоянном маг-



**Рис. 2.** Полевая зависимость модуля упругости  $H$  материала после приложения постоянной нагрузки  $\sigma_0$ . На вставке — вязкоупругая модель Кельвина.

нитном поле. Уменьшение  $H$  на  $\sim 30\%$  связывается авторами с процессами пластической деформации на межфазных границах матрица–включения в результате магнитострикционной деформации включений в процессе экспозиции материала в постоянном МП. Описание наблюдаемых изменений проведено в рамках модели вязкоупругого тела Кельвина. Следует подчеркнуть, что изменение структуры при предварительной выдержке в магнитном поле и последующая деформация — это разные процессы. Возникающие магнитостимулированные деформационные изменения на межфазных границах (включение–матрица) определяют соответствующие изменения элемента вязкости в рассматриваемой модели вязкоупругого тела.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и образования РФ (проект № FZRR-2020-0023).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] T.N. Tak, A. Prakash, S.M. Keralavarma, I. Samajdar, P.J. Guruprasad, *J. Mech. Phys. Solids*, **179**, 105385 (2023). DOI: 10.1016/j.jmps.2023.105385
- [2] W. Abd-Elaziem, J. Liu, N. Ghoniem, X. Li, *J. Mater. Res. Technol.*, **26**, 3025 (2023). DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.08.068
- [3] X. Xiao, S. Li, L. Yu, *Int. J. Plast.*, **157**, 103394 (2022). DOI: 10.1016/j.ijplas.2022.103394
- [4] S. Verheyden, L. Deillon, A. Mortensen, *Acta Mater.*, **234**, 118037 (2011). DOI: 10.1016/j.actamat.2022.118037
- [5] A.A. Shibkov, M.A. Zheltov, M.F. Gasanov, A.E. Zolotov, A.A. Denisov, M.A. Lebyodkin, *Mater. Sci. Eng. A*, **772**, 138777 (2020). DOI: 10.1016/j.msea.2019.138777
- [6] A.A. Шибков, А.Е. Золотов, А.А. Денисов, М.Ф. Гасанов, *Письма в ЖТФ*, **48** (14), 26 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.14.52866.19228 [A.A. Shibkov, A.E. Zolotov, A.A. Denisov, M.F. Gasanov, *Tech. Phys. Lett.*, **48** (7), 66 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.07.54043.19228].
- [7] X. Wang, Z. Shi, J. Lin, *Int. J. Mech. Sci.*, **260**, 108659 (2023). DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2023.108659
- [8] K. Chen, L. Zhan, Y. Xu, Y. Liu, *J. Mater. Res. Technol.*, **9** (6), 15433 (2020). DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.10.100
- [9] L. Zhang, H. Li, T. Bian, C. Wu, Y. Gao, C. Lei, *Chin. J. Aeronaut.*, **35** (10), 8 (2022). DOI: 10.1016/j.cja.2021.10.019
- [10] Y. Wang, S. Lin, Z. Dong, J.H. Park, Q. Wang, H. Ni, W. Mu, *Mater. Charact.*, **205**, 113299 (2023). DOI: 10.1016/j.matchar.2023.113299
- [11] I. Todaro, R. Squatrito, S. Essel, H. Zeidler, *Mater. Today Proc.*, **10** (2), 277 (2019). DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.407
- [12] A.A. Skvortsov, D.E. Pshonkin, V.K. Nikolaev, P.A. Kulakov, *Mech. Res. Commun.*, **129**, 104071 (2023). DOI: 10.1016/j.mechrescom.2023.104071
- [13] M. Friha, V. Nikolaev, A. Skvortsov, D. Pshonkin, S.-E. Friha, P. Kusnetsova, *J. Magn. Magn. Mater.*, **589** (1), 171532 (2024). DOI: 10.1016/j.jmmm.2023.171532
- [14] Y. Zhao, H.C. Liu, G.E. Morales-Espejel, C.H. Venner, *Tribol. Int.*, **171**, 107562 (2022). DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107562