

УДК 537.621

Р.Б. Моргунов<sup>1</sup>, Р.А. Валеев<sup>1</sup>, А.А. Скворцов<sup>2</sup>, Д.В. Королев<sup>1</sup>,  
В.П. Пискорский<sup>1</sup>, Е.И. Куницына<sup>3</sup>, В.В. Кучеряев<sup>1</sup>, О.В. Коплак<sup>3</sup>

## МАГНИТОПЛАСТИЧЕСКИЙ И МАГНИТОМЕХАНИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТЫ В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ С МАГНИТОСТРИКЦИОННЫМИ МИКРОВКЛЮЧЕНИЯМИ

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-3-13

*Обсуждается влияние магнитного поля на механические свойства алюминиевых сплавов и эффекты магнитного последействия. Обнаружены микровключения FeAl, создающие внутренние напряжения в алюминиевой матрице. Микронапряжения изменяют ползучесть, микротвердость и динамику дислокаций в магнитном поле. Сообщается также об обратном эффекте, который можно назвать магнитомеханическим или пьезомагнитным. Он заключается в увеличении коэрцитивной силы микровключений, вызванной пластической деформацией алюминия. Эти опыты показывают, что микровключения можно использовать в качестве сенсоров механических напряжений, с помощью которых можно измерять остаточные напряжения в материалах.*

**Ключевые слова:** ползучесть, микротвердость, дислокации, магнитопластичность, магнитострикция.

R.B. Morgunov<sup>1</sup>, R.A. Valeev<sup>1</sup>, A.A. Skvortsov<sup>2</sup>, D.V. Korolev<sup>1</sup>,  
V.P. Piskorskii<sup>1</sup>, E.I. Kunitsyna<sup>3</sup>, V.V. Kucheryaev<sup>1</sup>, O.V. Koplak<sup>3</sup>

## MAGNETOPLASTIC AND MAGNETOMECHANIC EFFECTS IN ALUMINUM ALLOYS WITH MAGNETOSTRICTIVE MICRO INCLUSIONS

*Effect of magnetic field on mechanical properties of aluminum alloys and magnetic after-effects are discussed. The FeAl microinclusions providing internal stresses in aluminum matrix were revealed. These stresses affect creep, microhardness and dislocation dynamics in magnetic field. The opposite effect, which can be called magnetomechanic or piezoelectric, is also reported. It consists in increasing the coercive force of microinclusions caused by plastic deformation of aluminum. These experiments show that microinclusions can be used as sensors of mechanical stresses, with the help of which residual stresses in materials can be measured.*

**Keywords:** creep, microhardness, dislocation, magnetoplasticity, magnetostriction.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет» [Federal State Budgetary Institution of High Education «Moscow Polytechnic University»]; e-mail: mospolytech@mospolytech.ru

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химической физики Российской академии наук [The Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences]; e-mail: director@icp.ac.ru

### Введение

Влияние магнитного поля на пластичность материалов (или магнитоэластический эффект) привлекает внимание специалистов довольно давно. Феноменология подобных явлений очень разнообразна и зависит от величины магнитного поля, типа материала и физических процессов, стимулированных магнитным полем в твердых телах.

Главной причиной повышенного интереса к этой теме является возможность оптимизации энергозатрат при обработке материалов магнитным полем. Присутствие постоянного магнитного поля при деформации металлов не требует источников энергии, однако способно изменять механические свойства последних. В настоящее время известно множество магнитопластических эффектов очень разной природы. Кратко упомянем те из них, которые могут быть использованы в процессе обработки материалов. В металлах (например, Nb) известны эффекты, связанные с изменением вязкости электронного газа при сверхпроводящем переходе в нормальное состояние под действием магнитного поля. Эти явления можно наблюдать только при низких температурах, несовместимых с производственными процессами обработки металлов. Широко распространены исследования влияния сильного магнитного поля величиной 15–30 Тл на ориентацию зерен в процессе роста поликристаллического алюминия. Изменение зеренной текстуры алюминия в постоянном магнитном поле, вызванное анизотропией магнитной восприимчивости зерен, влияет на все его остальные (в том числе и механические) свойства. Этот эффект наблюдается при температурах 500–600 К, однако требует дорогих и сложных в обслуживании сверхпроводящих магнитов, плохо совместимых с производственным процессом. Следует отметить, что значительные эффекты в улучшении свойств «немагнитных» металлов и сталей, создаваемых в магнитном поле, достигнуты благодаря использованию сверхпроводящих магнитов и обеспечивают государственный заказ для научно-производственных лабораторий в Гренобле (Франция). Имеется внушительная лаборатория сверхсильных магнитных полей, обеспечивающая производственную необходимость в создании материалов с улучшенными свойствами в постоянном магнитном поле величиной до 45 Тл.

В полярных полимерах магнитное поле величиной 1–20 Тл влияет на термоактивированное вращение электрически заряженных боковых групп. Это вращение «размораживается» при температурах выше температуры стеклования и приводит к тому, что магнитное поле создает достаточную силу Лоренца, изменяющую динамику боковых групп. До настоящего времени не установлено, каким образом это влияет на пластичность полимеров, хотя сами эффекты такого типа и их исчезновение ниже температуры стеклования или при использовании неполярных полимеров – достоверно установленные факты.

Из сказанного следует, что влияние магнитного поля на пластичность твердых тел является многообразной группой явлений [1–11], а не единичным случаем, сводящимся к одному физическому механизму влияния поля. Установлены физические принципы нескольких магнитопластических эффектов (МПЭ), получивших признанное доказательное объяснение. К ним можно отнести МПЭ, связанные с переходом между сверхпроводящим и нормальным состоянием металлов; вызванные изменением спинового состояния пар структурных дефектов в процессе их миграции в кристаллической решетке, а также вызванные анизотропией магнитной восприимчивости зерен и процессом их анизотропного роста в магнитном поле и др. Однако экспериментально обнаруживаются все новые МПЭ, которые отнюдь не сводятся к упомянутым явлениям. Одной из причин влияния магнитного поля на пластичность, а также мощным средством управления пластичностью могут быть нано- и микроскопические ферромагнитные включения (ФВ) в твердых телах. Этот тип МПЭ нельзя назвать новым, однако он безусловно относится к малоизученным. Силовое действие поля на ФВ и их магнитострикция способны создавать внутренние механические напряжения вокруг включений в магнитном поле и влиять на пластичность образца, в котором они содержатся. Такие материалы можно создавать преднамеренно, как вид магнитоуправляемых композиционных материалов, но чаще ФВ возникают случайно в процессе обработки материалов.

Например, предварительные исследования показывают, что не удастся найти ни одного промышленного типа алюминия, который бы не демонстрировал наличие магнитного гистерезиса, доказывающего присутствие ферромагнитных частиц. Таким образом, МПЭ, связанный с ФВ, является весьма универсальным и может встречаться в самых разных твердых телах. Существует множество работ, где авторы бездоказательно склоняются к спин-зависимому типу магнитоэластического эффекта в парах дефектов, игнорируя рассмотрение причин, связанных с наличием ФВ. Может показаться, что физика МПЭ, связанных с ФВ, проста и не представляет фундаментального интереса. Однако простые оценки механических напряжений, создаваемых магнитоупругостью или вращающим моментом, вызванным анизотропией ФВ, часто показывают недостаточность величины этих напряжений для создания в твердых телах остаточных изменений и непонимание причин влияния включений на пластичность. В большинстве случаев неясна даже природа включений, их химический состав, магнитные свойства и физические механизмы, приводящие к изменению пластичности материалов с ФВ. Поэтому развитие экспериментальной базы, самих подходов к нано- и микротехнологиям и исследованию ФВ на данном этапе принесет много информации, которую невозможно было получить тогда, когда о роли ФВ в магнитоэластичности задумались впервые. Существует и обратный эффект – влияние внутренних напряжений на магнитные свойства включений, который может быть пригоден для развития методов определения и картирования этих напряжений.

Таким образом, интерес к проблеме магнитоэластичности и магнитомеханическому эффекту связан со следующими причинами:

- возможностью переноса методов и знаний из физики магнитных наночастиц в физику прочности и пластичности для создания новых типов композитных материалов, управляемых магнитным полем;
- возможностью создания эффективных локальных наночастиц механических напряжений и магнитоуправляемых дислокационных препятствий, исследование которых приведет к пониманию связи между макроскопической пластичностью и магнитоуправляемой динамикой нано- и микродефектов;
- использованием ферромагнитных включений для определения внутренних напряжений;
- возможным применением полученных знаний для широкой группы твердых тел (от полимеров, немагнитных сплавов до ферромагнетиков со сложным фазовым составом);
- наличием нескольких возможных путей создания микронапряжений в области ФВ (в неоднородном и однородном поле, в постоянном, импульсном и переменном поле в зависимости от временных интервалов процессов, сопровождающих МПЭ и др.);
- возможностью преднамеренного введения и оптимизации свойств нано- и микровключений для максимально эффективного управления пластичностью материалов в магнитном поле.
- возможностью сформулировать признаки той группы магнитоэластических эффектов, которая связана с ФВ, отделив их от прочих механизмов влияния магнитного поля на пластичность твердых тел;
- полученные результаты могут стать основой новой технологии энергосбережения во всех процессах, где необходимую термическую обработку, обычно используемую для пластификации или упрочнения сплавов, можно заменить на магнитную обработку.

В данной статье рассмотрен такой тип МПЭ, который не требует не только дополнительной энергии, но и магнитного поля в процессе механической обработки алюминия потому, что магнитное поле воздействует на микровключения и оставляет вокруг них пластически деформированные зоны после извлечения образца из поля. Это

означает, что для практического применения этого МПЭ не требуются модификация устройств механической обработки сплавов и их сопряжение с магнитом. Как будет показано далее, этот эффект связан с пластификацией алюминия, вызванной генерированием свежих дислокаций вокруг ферромагнитных микровключений. Последние при помещении в магнитное поле увеличиваются в размерах (магнитострикция) и создают локальные механические напряжения, превышающие предел текучести алюминия. Магнитострикционные эффекты не требуют высоких магнитных полей, проявляясь до магнитного насыщения включений. Поэтому использование таких эффектов нуждается лишь в наличии постоянных (не сверхпроводящих) магнитов, разработка которых успешно реализуется в ВИАМ [12–15]. Эти эффекты легко обнаруживаются при комнатной температуре и не требуют криогенного оборудования, поэтому цель данной работы заключалась в создании экспериментальных условий для систематического исследования роли магнитострикционных микровключений в МПЭ, наблюдаемом в алюминиевом сплаве в сравнительно невысоких магнитных полях (до 1 Тл) и при температурах, близких к комнатной. Кроме того, целью было также исследование самих включений, их магнитных свойств, структуры, морфологии и химического состава для установления магнитострикционных свойств.

### Материалы и методы

#### *Методика экспериментов и аттестация образцов*

В опытах использованы образцы, имеющие химический состав, установленный с помощью энергодисперсионного анализа. В табл. 1 указано как среднее значение атомных концентраций элементов в матрице, так и в микровключениях. Из этих данных следует, что матрица содержала небольшое количество диспергированной примеси железа, в то время как во включениях его атомная концентрация близка к концентрации алюминия и отвечала химическому составу сплава, из которого состоят микровключения FeAl.

Таблица 1

**Химический состав матрицы и включения по данным энергодисперсионного анализа**

Элемент	Содержание элементов, % (атомн.)	
	в матрице	в микровключении
O	29,7	10,1
Al	69,7	43,5
Fe	0,5	41,3
Si	0	2,4
Mn	0,9	2,7

Изображение микровключений средним размером 2–3 мкм получено с помощью просвечивающей электронной микроскопии (рис. 1, а). Микровключения видны как светлые вытянутые в одном направлении объекты, ориентация которых, очевидно, задана в процессе проката алюминия. На рис. 1, б показано электронно-микроскопическое изображение того же образца после деформирования при постоянной нагрузке. Появившиеся темные объекты соответствуют порам, образовавшимся при ползучести. Концентрация пор на границе зерен произвела эффект декорирования, так что стали видны границы зерен и зеренная структура алюминия (рис. 1, б).

В опытах по исследованию механических свойств использованы плоские алюминиевые образцы, деформируемая часть которых имела ширину 3 мм, исходную длину  $l_0=80$  мм и толщину 2 мм до деформирования образца (рис. 2).

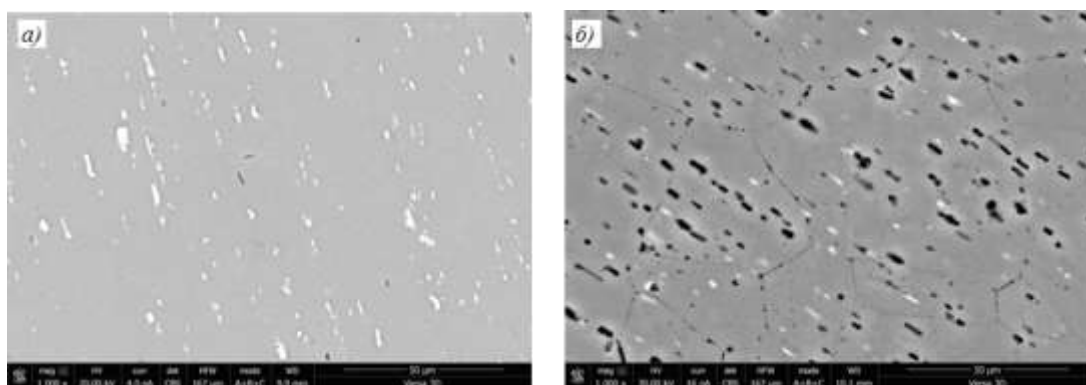


Рис. 1. Изображение поверхности образца в просвечивающем электронном микроскопе до (а) и после деформирования (б)

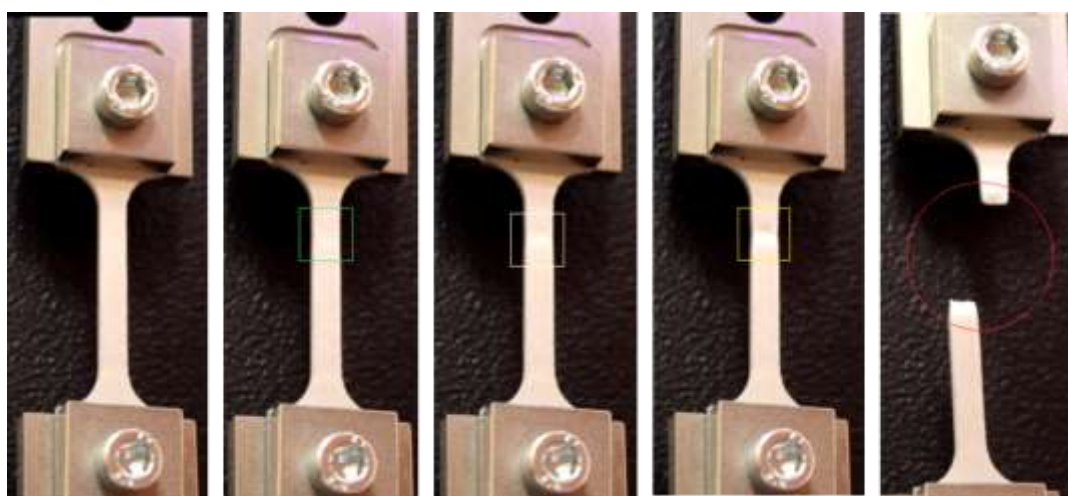


Рис. 2. Последовательные изображения образца через 100 с в процессе ползучести (квадратом отмечена деформируемая зона, впоследствии использованная для приготовления образца, магнитные свойства которого изучались с помощью квантового интерферометра)

В качестве источника постоянного магнитного поля использовали редкоземельный постоянный магнит типа NdFeB, обеспечивающий индукцию магнитного поля в зазоре до  $B=0,7$  Тл [1–5]. В предварительных исследованиях установлено, что при продолжительности выдержки в магнитном поле более 5 мин дополнительных изменений свойств образцов не наблюдалось, поэтому время экспонирования во всех опытах в данной работе составляло 5 мин. В качестве характеристик механических свойств использованы параметры кривых ползучести (деформации под действием постоянной нагрузки) и микротвердость. Эти измерения проводили при комнатной температуре. Изменение длины образца  $\Delta l$  измеряли с помощью механического микрометра с точностью 1 мкм. Установка по исследованию ползучести обеспечивала плавное нагружение образца на начальной стадии и при его разгрузке в конце процесса деформирования.

Магнитные свойства образцов исследовали в режиме постоянного магнитного поля в сверхпроводящем магните квантового интерференционного магнитометра MPMS. Сканирование дипольного магнитного момента образца производили в области 6 см, значительно превышающей его размер 0,3 см. Для исследований магнитных свойств вырезали образцы из центральной части тех образцов, которые использовали для механических испытаний. Образцы удерживались трением в креплении магнитометра так, что однородный пластиковый держатель не вносил дополнительного вклада в дипольный момент образца. Приготовление образцов для измерений производили керамическими немагнитными инструментами, неспособными внести ферромагнитную

примесь в образец. Однако исходный материал для исследований взят из листового алюминия, подвергнувшегося прокатке и контакту с ферромагнитными частями оборудования при высокой температуре. Поэтому можно было ожидать присутствия ферромагнитных частиц, внесенных в приповерхностные слои образца на стадии изготовления листового алюминия. Измерения магнитных свойств образцов не только при комнатной температуре, но и при пониженных температурах нужны, чтобы определить основные параметры микроскопических включений.

### Результаты и обсуждение

#### Влияние магнитного поля на ползучесть

На рис. 3 представлены зависимости скорости относительной деформации образца  $d\varepsilon/dt$  от продолжительности его нагружения в магнитном поле (рис. 3, б) и в его отсутствие (рис. 3, а). На врезке рис. 3, а представлено схематичное распределение стадий деформации образца – кривая ползучести разделена на три участка: на участке I имеет место неустановившаяся ползучесть с постепенно уменьшающейся скоростью деформации, участок II называется установившейся ползучестью и характеризуется почти постоянной скоростью пластической деформации, на III участке в образце образуются перешеек (рис. 2), скорость деформации увеличивается и происходит разрушение материала. Поскольку разрушение – плохо предсказуемый, стохастический процесс, то исследовали влияние магнитного поля лишь на первые две стадии ползучести. Из данных рис. 3 видно, что предварительная экспозиция образцов в магнитном поле как изменяет уровень скорости деформации, достигаемый к моменту установившейся ползучести, так и укорачивает время достижения установившейся ползучести (сравним кривые 1 на рис. 3, а и 3, б). Для количественного описания этих изменений используем стандартное представление скорости ползучести на стадиях I и II функцией

$$d\varepsilon/dt = \beta \cdot l_0 \cdot t^{-2/3} + k \cdot l_0.$$

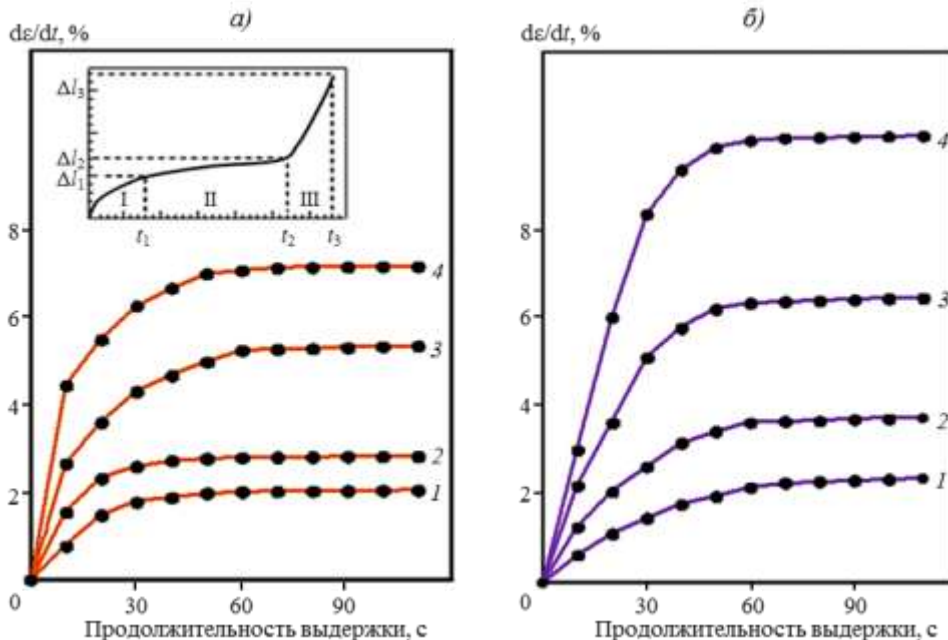


Рис. 3. Зависимости скорости ( $d\varepsilon/dt$ ) относительной деформации образца  $\varepsilon$  от длительности  $t$  неустановившейся ползучести, полученные при постоянной нагрузке для контрольного образца, не подвергнувшегося выдержке в магнитном поле (а) и для этого же образца после выдержки в постоянном магнитном поле величиной 0,7 Тл в течение 5 мин при комнатной температуре (б). Величина нагрузки: 1 – 150 Н; 2 – 160 Н; 3 – 170 Н; 4 – 180 Н. На вставке рис. 3, а показаны стадии ползучести I, II и III

Аппроксимация кривых на рис. 3 этой функцией позволила определить параметры  $\beta$  и  $k$  ползучести на I и II стадиях (табл. 2). Величина  $\Delta l_0$  характеризует скачок деформации в начальный момент нагружения образца.

Таблица 2

**Значения параметров ползучести в ранее приведенной формуле в нулевом поле и в поле величиной 0,7 Тл для серии последовательных нагружений образца дискретно возрастающей нагрузкой**

Параметры ползучести	Значения параметров при нагрузке и магнитном поле							
	150 Н		160 Н		170 Н		180 Н	
	$B=0$ Тл	$B=0,7$ Тл	$B=0$ Тл	$B=0,7$ Тл	$B=0$ Тл	$B=0,7$ Тл	$B=0$ Тл	$B=0,7$ Тл
$\Delta l_0$ , мкм	428	469	490	529	554	748	818	1205
$\beta \cdot 10^{-5}$ , $c^{-1/3}$	0,6	1,8	1,5	3,8	3,3	11,1	13,3	25,1
$k \cdot 10^{-7}$ , $c^{-1}$	1,3	1,3	1,4	2,01	1,3	2,3	1,6	2,8

Таким образом, магнитное поле приводит к таким остаточным изменениям в образцах, которые после устранения магнитного поля могут наблюдаться в виде изменений параметров кривых ползучести. Эти изменения соответствуют облегченному движению дислокаций.

### Магнитные свойства образцов

Переходя к обсуждению магнитных свойств включений, отметим, что алюминий является парамагнетиком, который должен проявлять линейную зависимость намагниченности от поля и отсутствие магнитного гистерезиса. Поэтому при исследовании зависимости магнитного момента образца  $M$  от магнитного поля  $H$  легко разделить вклады ферромагнитных включений и алюминиевой матрицы с диспергированными в ней отдельными ионами железа, которые также вносят линейный вклад по магнитному полю (рис. 4). Недеформированный образец демонстрирует линейный вклад парамагнитной матрицы в виде линейно нарастающей части зависимости  $M(H)$  в сильных полях от 5 до 20 кЭ (рис. 4, а) и быстро насыщающейся части в слабых полях 0–5 кЭ, которая характеризует присутствие ферромагнитных частиц.

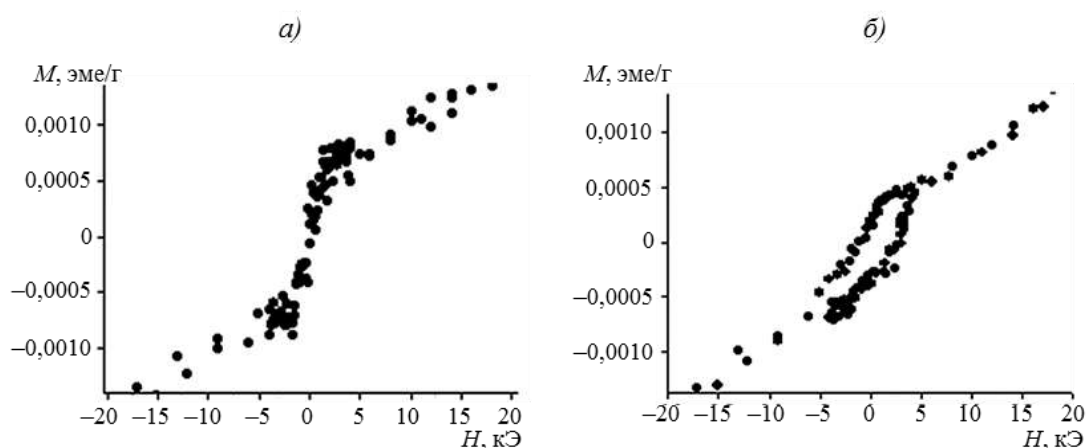


Рис. 4. Петли гистерезиса намагниченности образца до (а) и после деформации (б) при температуре 300 К

Из сравнения петель гистерезиса на рис. 4, а и б, записанных до и после пластической деформации одного и того же образца, видно, что пластическая деформация

увеличивает коэрцитивную силу включений. Таким образом, не только магнитное поле влияет на пластическую деформацию, но и наблюдается обратный эффект – пластическая деформация влияет на магнитные свойства ферромагнитных включений.

На рис. 5 показаны температурные зависимости магнитного момента в образце, охлажденном с 300 до 2 К в магнитном поле величиной 1 Тл (кривая FC) и в нулевом поле (кривая ZFC).

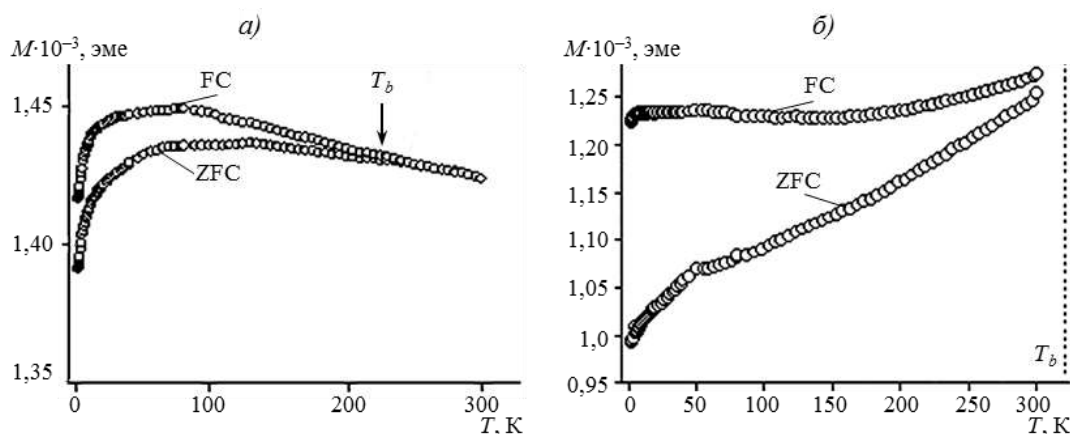


Рис. 5. Температурные зависимости магнитного момента образца, охлажденного в магнитном поле (FC) и в его отсутствие (ZFC) в измерительном магнитном поле величиной 1 (а) и 0,1 кЭ (б)

При этих измерениях использовали различное измерительное магнитное поле величиной 1 (рис. 5, а) и 0,1 кЭ (рис. 5, б). Температура, при которой пересекаются кривые FC и ZFC, называется точкой блокирования намагниченности ( $T_b$ ). В соответствии с теорией Нееля–Брауна, эта точка характеризует температуру, при которой потенциальный барьер, разделяющий намагниченность микровключений вдоль поля и противоположно полю, оказывается преодолимым с помощью термических флуктуаций. Высота барьера определяется объемом частиц и величиной магнитной анизотропии. Учитывая средний объем включений  $V=2,1 \cdot 10^{-17} \text{ м}^3$ , полученный с помощью электронной микроскопии (рис. 2), а также значение  $T_b=250 \text{ К}$  (рис. 5), рассчитали значение константы анизотропии  $K=3,4 \text{ мДж} \cdot \text{м}^{-3}$ .

Полученная величина константы анизотропии близка к экспериментальным значениям, определенным ранее для разупорядоченного спин-стекольного состояния сплава FeAl. Рост температуры блокировки при уменьшении измерительного поля (сравним рис. 5, а и б) с 250 до 320 К подтверждает применимость теории Нееля–Брауна и вызван увеличением высоты эффективного барьера, разделяющего намагниченности, направленные вдоль и против внешнего поля. Это хорошо согласуется с химическим составом кластеров (табл. 1).

Поскольку сплавы FeAl хорошо известны высокими значениями константы магнитострикции  $\lambda_m=8 \cdot 10^8 \text{ Н}/(\text{Тл} \cdot \text{м}^2)$ , можно предполагать, что увеличение объема микровключений в магнитном поле ведет к появлению механических напряжений  $\sigma_m$  на границе раздела микровключений с алюминиевой матрицей  $\sigma_m=\lambda_m \cdot H$ . Механические напряжения  $\sigma_m=560 \text{ МПа}$  в магнитном поле  $H=0,7 \text{ Тл}$  в 4,5 раза больше предела текучести алюминиевой матрицы (120 МПа), что подтверждает магнитострикционную природу магнитопластичности в опытах, приведенных в данной статье.

Обнаруженный обратный эффект влияния пластической деформации на магнитные свойства микровключений (рис. 4) свидетельствует о том, что высокие напряжения в ядрах дислокаций могут изменять структуру микровключений – например, способствовать их агрегации в более крупные кластеры. Подобные эффекты хорошо известны в металлах, где образование облаков Коттрела сильно зависит от внутренних напряжений, создаваемых дислокациями.

Актуальность исследований связана с высоким промышленным использованием алюминия, необходимостью развития методов его обработки, а также с возросшим интересом к фундаментальным исследованиям сплава FeAl, который в свете новых подходов в нанотехнологии, а также с помощью приборной базы нового поколения демонстрирует уникальные свойства. Можно назвать следующие факторы, делающие актуальными данную работу:

– растущий спрос точного приборо- и машиностроения на изготовление прецизионной точной механики из алюминия ставит сразу несколько задач: возможность не термического управления механическими свойствами алюминия на стадиях, исключая термообработку; контролируемое состояние ферромагнитных примесей в алюминии и их использование для управления его свойствами; создание сенсоров деформации, механических напряжений и магнитного поля на основе сплава типа FeAl, а также элементов оптической памяти, основанных на новых принципах;

– сплавы типа FeAl в последние годы очень актуальны – в научно-технической литературе наблюдается повышенный интерес к этой теме, связанный с обнаружением полностью оптического переключения намагниченности в таком материале с помощью поляризованного фемтосекундного лазера;

– магнитострикционные свойства сплавов типа FeAl – весьма небольшая коэрцитивная сила, вариативность спиновой магнитной структуры в зависимости от концентрации железа и возможность выбора этой структуры, высокая чувствительность наночастиц сплава к механическим напряжениям (высокий пьезомагнитный эффект) – все это рассматривается как перспективная основа для датчиков на основе сплавов типа FeAl, FeAlB, Fe<sub>3</sub>Al и др. (здесь и далее использован термин *пьезомагнитный эффект*, применяемый для частиц типа AlFeV в англоязычной литературе, хотя это название дискуссионное);

– в мире возросло число работ, описывающих магнитопластичность алюминия с ошибочных позиций, причиной которых является отсутствие систематического исследования и проверки гипотез, но все эти работы разовые, хотя их число измеряется десятками. Не сформирован единый взгляд на магнитопластичность алюминия и других «немагнитных» металлов. Отсутствуют аналитические достоверные проверки состава сплавов, представления о том, какие объекты в алюминии подвержены действию магнитного поля. Многие работы выполнены на низком уровне, но апеллируют в ссылках к общепризнанным работам в области магнитопластичности. В фундаментальном отношении предлагаемое исследование могло бы сформировать стержень, физическую основу таких эффектов, отвергнуть заведомо ложные интерпретации, выстроить классификацию и системный взгляд на магнитопластические эффекты во всех металлах и материалах с включениями;

– при производстве алюминия в процессе механической обработки с большой вероятностью образуется материал с неконтролируемым количеством нано- или микроразмерного железа и его сплавов, оксидов, обладающих намагниченностью и магнитострикцией, – на это указывают зависимости намагниченности образца от изменения внешнего магнитного поля;

– если имеют место спин-зависимые процессы, управляющие пластичностью алюминия, то именно в этом материале, каждый атом которого имеет спин (алюминий-парамагнетик), эти процессы могли бы проявляться сильнее, чем в ионных кристаллах и полупроводниках, где носителями электронных спинов являются лишь примесные дефекты;

– примесь бора в алюминиевых технических сплавах, наряду с примесью железа, приводит к формированию включений типа FeAlB, обладающих превосходными пьезомагнитными характеристиками. Наличие таких включений в алюминиевой матрице является превосходной основой для создания пьезомагнитных датчиков.

### Заключения

1. Магнитное поле величиной до 1 Тл при комнатной температуре инициирует магнитострикционное расширение ферромагнитных включений типа FeAl в матрице Al. Это приводит к генерации свежих дислокаций и увеличению скорости ползучести на 25% после выдержки образца в магнитном поле.

2. Наблюдается обратный эффект влияния пластической деформации на коэрцитивную силу микровключений типа FeAl. Пластическая деформация увеличивает коэрцитивную силу включений, что может быть вызвано увеличением их размеров и соответствующим ростом магнитной анизотропии.

3. Обнаруженные явления могут быть использованы для управления механическими свойствами алюминиевых изделий в процессе их механической обработки, особенно в условиях контролируемого управляемого введения микровключений заранее заданной концентрации и с повышенным значением коэффициента магнитострикции. При этом модификация производства магнитоуправляемого композитного алюминия требует лишь применения редкоземельных магнитов [12–15].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Skvortsov A., Pshonkin D., Kunitsyna E., Morgunov R., Beaunon E. Softening of the Al–Mg–Si–Fe alloy under magnetostriction of FeAl microinclusions // *Journal of Applied Physics*. 2019. Vol. 125. No. 2. P. 023903.
2. Skvortsov A.A., Morgunov R.B., Pshonkin D.E., Piskorskii V.P., Valeev R.A. Magnetic Memory in Plasticity of an Aluminum Alloy with Iron Inclusions // *Physics of the Solid State*. 2019. Vol. 61. No. 6. P. 1023–1029.
3. Моргунов Р.Б. Спиновая микромеханика в физике пластичности // *Успехи физических наук*. 2004. Т. 174. С. 131–153. DOI: 10.3367/UFNr.0174.200402c.0131.
4. Morgunov R.B., Buchachenko A.L. Magnetic field response of NaCl:Eu crystal plasticity due to spin-dependent Eu<sup>2+</sup> aggregation // *Physical Review B*. 2010. Vol. 82. P. 014115.
5. Beaunon E. 3D physical modeling of anisotropic grain growth at high temperature in local strong magnetic force field // *Science Technology of Advanced Materials*. 2008. Vol. 9. P. 024201. DOI: 10.1088/1468-6996/9/2/024201.
6. Molodov D.A., Bollmann C., Gottstein G. Impact of a magnetic field on the annealing behavior of cold rolled titanium // *Materials Science and Engineering A*. 2007. Vol. 467. P. 71. DOI: 10.1016/j.msea.2007.02.084.
7. Bhaumik S., Molodova X., Molodov D.A., Gottstein G. Magnetically enhanced recrystallization in an aluminum alloy // *Scripta Materialia*. 2006. Vol. 55. P. 995. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2006.08.018.

8. Tournier R.F., Beaugnon E. Texturing by cooling a metallic melt in a magnetic field // *Science Technology of Advanced Materials*. 2009. Vol. 10. P. 014501. DOI: 10.1088/1468-6996/10/1/014501.
9. Li H., Liu S., Jie J. et al. Effect of pulsed magnetic field on the grain refinement and mechanical properties of 6063 aluminum alloy by direct chill casting // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 93. P. 3033. DOI: 10.1007/s00170-017-0724-0.
10. Li C.J., Yang H., Ren Z.M. et al. On Nucleation Temperature of Pure Aluminum in Magnetic Fields // *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2010. Vol. 15. P. 45. DOI: 10.2528/PIERL10041412.
11. Bustos O., Ordoñez S., Colás R. Rheological and microstructural study of A356 alloy solidified under magnetic stirring // *International Journal of Cast Metals Research*. 2013. Vol. 7. No. 1. P. 29–37.
12. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Резчикова И.И., Бузенков А.В. Фазовый состав спеченных материалов системы Nd–Dy–Fe–Co–B // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S5. С. 95–100. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-95-100.
13. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Пискорский В.П., Резчикова И.И., Валеев Р.А., Давыдова Е.А. Фазовый состав спеченных материалов системы Pr–Dy–Fe–Co–B // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №S2 (39). С. 5–10. DOI: 10.18577/2071-9170-2015-0-S2-5-10.
14. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Чередниченко И.В., Резчикова И.И., Валеев Р.А., Пискорский В.П. Влияние содержания меди на фазовый состав и магнитные свойства термостабильных спеченных магнитов систем Nd–Dy–Fe–Co–B и Pr–Dy–Fe–Co–B // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №S2 (39). С. 11–19. DOI: 10.18577/2071-9170-2015-0-S2-11-19.
15. Моргунов Р.Б., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В. Термодинамический анализ магнитопластических эффектов в «немагнитных» металлах // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2018. №12 (72). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.09.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-79-87.