

На правах рукописи

Пшонкин Данила Евгеньевич

**ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ
ВКЛЮЧЕНИЯ**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Москва – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент,
Скворцов Аркадий Алексеевич

Официальные
оппоненты:

Головин Юрий Иванович

доктор физико-математических наук,
профессор, ФГБОУ ВО «Тамбовский
государственный университет имени
Г.Р. Державина», директор Научно-
исследовательского института
«Нанотехнологии и наноматериалы»

Петржик Екатерина Александровна

кандидат физико-математических наук,
Институт кристаллографии им.
А.В. Шубникова Федерального научно-
исследовательского центра
«Кристаллография и фотоника» РАН,
старший научный сотрудник лаборатории
механических свойств кристаллов

Ведущая организация: ГНЦ РФ Федеральное государственное
унитарное предприятие «Центральный
научно-исследовательский институт
черной металлургии им. И.П. Бардина»

Защита состоится «20» мая 2020г. в 14 часов 30 минут на заседании
диссертационного совета Д 212.141.17, созданного на базе ФГБОУ ВО
«Московский государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» по адресу:
248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2, МГТУ имени Н.Э. Баумана, Калужский
филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени
Н.Э. Баумана и на сайтах <http://www.bmstu-kaluga.ru>, <http://www.bmstu.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент

Лоскутов Сергей Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Одним из перспективных направлений в физике конденсированного состояния является инженерия материалов (поиск и производство материалов нового поколения). Для этого используются подбор химического состава, состояние дефектной структуры, поиск новых методов и управления структурными свойствами материалов с помощью различных внешних воздействий (тепловое, электрическое, облучение частицами и т.д.).

Самостоятельный интерес представляют эффекты, возникающие при влиянии внешних магнитных полей (МП) на структурно чувствительные свойства материалов (в том числе и смарт материалов, например, магнитных эластомеров). Ярким примером таких эффектов являются так называемые магнитоэластические эффекты, обнаруженные в ряде немагнитных металлов и сплавов (Al, Cu, Ti). Очевидно, что магнитостимулированные процессы проявляются в таких материалах значительно слабее, чем в ферромагнетиках. Поэтому добавка «магнитных» включений способствует увеличению чувствительности немагнитных материалов к МП.

Несмотря на очевидную возможность использования магнитных эффектов, способы управления свойствами вещества матрицы изучены явно недостаточно. Так, практически отсутствует информация о поведении ферромагнитных включений в сплавах алюминия при экспозиции материала в постоянном МП, включая эффекты последействия магнитного поля. Не ясны механизмы такого влияния, а также роль дефектной подсистемы кристалла.

Также значительный интерес представляют эффекты влияния магнитного поля на системах металл-полупроводник. На примере систем кремний-алюминий обнаружено, что предварительная магнитная экспозиция кремния влияет на дефектную подсистему монокристалла. Такое влияние непосредственно сказывается на скорости миграции расплавленных включений алюминия при термическом отжиге таких систем, и геометрии движущейся жидкой зоны.

Поэтому в данной работе представлены экспериментальные данные, раскрывающие значительные изменения в ряде механических свойств после предварительной экспозиции алюминиевого сплава с Fe-содержащими включениями.

Целью исследования являлось установление закономерностей влияния постоянных магнитных полей на механические свойства материалов,

содержащих макроскопические включения (на примере алюминиевого сплава с железосодержащими включениями и систем алюминий-кремний).

Задачами исследования являлись:

- провести изучение магнитных свойств образцов алюминиевого сплава, с макроскопическими включениями на основе железа, а также морфологии включений в матрице;
- экспериментально проанализировать влияние постоянного магнитного поля на ползучесть и микротвердость алюминиевого сплава с включениями железа, в частности релаксационные процессы после экспозиции сплава в постоянном магнитном поле;
- выявить преимущественный механизм влияния Fe-содержащих включений на механические свойства материала;
- провести предварительные исследования макроскопических включений и подтвердить их магнитные свойства;
- изучить механизмы формирования и динамику расплавленных включений на основе алюминия в кремнии с дислокационной неоднородностью;
- экспериментально рассмотреть влияние предварительной экспозиции в постоянном магнитном поле монокристаллов кремния с дислокационной неоднородностью на процессы миграции макроскопических включений в кремнии.

Методология и методы исследования

Магнитные статические и низкочастотные динамические свойства изучались с помощью СКВИД-магнитометрии. Механические свойства микротвердости изучались на микротвердомере ПМТ-3М. Механические свойства ползучести образцов фиксировались на машине рычажного типа WP-600 Creep Testing Machine, диаграммы растяжения регистрировались на испытательных машинах Zwick/Roell Z100 TEW(100 kN) и МИ-40У. Исследование структуры образцов проводилось методами РЭМ и ПЭМ микроскопии (Helios Nano Lab 660, рентгеновский дифрактометр D8 DISCOVER Bruker AXS). Химический состав соединения железосодержащих включений определялся по результатам Мёссбауэровской спектроскопии.

Научная новизна

1. Методами оптической и электронной микроскопии проведено изучение морфологии железосодержащих включений в объеме алюминиевого сплава и его химического состава: зафиксировано наличие атомов железа с объемной концентрацией ~ 2,5% и концентрацией

включений в сплаве $\sim 10^{15} \text{ м}^{-3}$. Методами СКВИД-магнитометрии получены экспериментальные данные магнитных свойств образцов, содержащих Fe-включения: значения коэрцитивной силы образцов - 3500 Э при 2К и 25 Э при 300 К.

2. Обнаружено, что предварительная экспозиция алюминиевого сплава с Fe-включениями в постоянном магнитном поле ($B \leq 0,7 \text{ Тл}$) способствует увеличению деформации сплава (до 30%), а также двукратное уменьшение величины активационного объема процесса ползучести γ после экспозиции образца в МП при $B=0,4 \text{ Тл}$ в течение 30 минут при комнатной температуре.

3. Выявлен преимущественный механизм влияния Fe-содержащих включений на механические свойства материала, связанный с магнитострикцией включений. Получены численные значения локальных механических напряжений (560 МПа), способствующих формированию пластически деформированной зоны вокруг включения.

4. Экспериментально обнаружена миграция включений типа Al-Si в области структурной неоднородности кремния. Установлено, что движущей силой процесса миграции является изменение химического потенциала (в нашем случае за счет градиента концентрации дислокаций) на межфазных границах макроскопического включения, что и определяет динамику растворения вещества матрицы на «лобовой» и осаждения на «тыльной» поверхностях включения. Это обеспечивает перемещение включения как целого в матрице.

5. Впервые на кремнии выявлено, что образующиеся зоны движутся в поле градиента концентрации дислокаций из области с меньшей в область с большей концентрацией линейных дефектов. Лимитирующей стадией миграции зон являются процессы плавления-кристаллизации на межфазных границах. Экспериментально зафиксировано также влияние предварительной магнитной экспозиции дислокационных образцов Si на размерную зависимость скорости миграции, а также на средний размер мигрирующей зоны.

Практическая значимость

Полученные данные позволяют разработать методы «магнитного» управления структурно-чувствительными свойствами алюминиевых сплавов с Fe-содержащими включениями, а также динамикой расплавленных зон на основе алюминия в монокристаллах кремния.

Теоретическая значимость

Приведены основные теоретические модели процессов ползучести материалов, позволяющие определить вклад макроскопических включений в

деформационные процессы алюминиевого сплава, а также влияние магнитного поля на активационный объем процесса ползучести при одноосном растяжении.

Степень разработанности темы

Проведены экспериментальные исследования влияния постоянных магнитных полей на механические свойства материалов, содержащих макроскопические включения. Обнаружен и экспериментально подтвержден основной вклад Fe-содержащих включений в усиление магнитоэластического эффекта алюминиевого сплава. Экспериментально отработана методика кратковременного повышения пластических свойств алюминиевого сплава за счет воздействия магнитными полями индукцией $B < 0.7$ Тл. Изучены основные дислокационные механизмы пластической деформации ползучести исследуемого сплава.

Положения, выносимые на защиту

1. Предварительная экспозиция алюминиевого сплава с Fe-содержащими включениями в постоянном магнитном поле с индукцией $B \leq 0,7$ Тл приводит к увеличению деформации сплава до 30%, а также к двукратному уменьшению величины активационного объема процесса ползучести.

2. Время релаксации процесса ползучести алюминиевого сплава после его экспозиции в постоянном магнитном поле составляет 25 часов. Предварительный отжиг образцов при температуре $T \geq 323$ К приводит к полному гашению эффекта.

3. Основной механизм влияния МП на процессы ползучести связан с магнитоэластикой Fe-включений и созданием на межфазной границе дополнительных механических напряжений до 560 МПа.

4. Возникновение расплавленных зон в объеме матрицы в диапазоне температур 1123...1273 К связано с процессами контактного плавления в системе металл-полупроводник. Миграция включений обусловлена градиентом концентрации дислокаций и определяет динамику растворения вещества матрицы на «лобовой» и осаждения на «тыльной» поверхностях капли.

5. Предварительная экспозиция дислокационных образцов Si в постоянном магнитном поле увеличивает скорость миграции включений в поле структурной неоднородности на 30%. При этом наблюдается уменьшение среднего размера мигрирующей зоны на 40%.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается: сопоставимостью полученных в работе данных о влиянии магнитного поля на механические свойства образцов (микротвердость,

ползучесть) с данными независимых исследований; воспроизводимостью и статистическим анализом полученных данных; использованием высокотехнологичных методов измерений.

Апробация работы

Материалы работы докладывались на ученом совете ИМАШ РАН, а также следующих международных и отечественных конференциях: восьмая Международная конференция «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов» (Москва 2019), Material analysis and processing in magnetic fields (Grenoble, France, 2018), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2018» (Москва, 2018), Всероссийский проект «Моя страна – Моя Россия» (Москва, 2016).

Диссертационная работа выполнялась в рамках проекта РФФИ № 18-37-7006, № 18-29-27005

Публикации автора по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 12 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ и индексируемых в БД Scopus и Web of Science.

Личный вклад автора

Автором диссертационной работы были проведены измерения зависимости механических свойств сплава Al в зависимости от индукции магнитного поля, от времени экспозиции в постоянном МП при различных температурах. Получен и обработан статистический массив экспериментальных данных, подтверждающий наличие магниточувствительных свойств исследуемого сплава. Подготовлены образцы для исследования магнитных свойств на СКВИД-магнетометре. Автором собраны и систематизированы материалы растровой и просвечиваемой электронной микроскопии образцов. Постановка задач, интерпретация полученных результатов и формулировка выводов исследования осуществлялись совместно с научным руководителем и соавторами публикаций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, заключения, списка использованных источников из 164 наименований, приложения. Объем диссертации 133 страницы, включая 60 рисунков, 4 таблицы.

Основное содержание работы

Первая глава содержит аналитический обзор литературы по тематике исследования. В этой главе обсуждаются влияние магнитных полей на

физико-механические свойства немагнитных материалов (магнитопластический эффект), влияние различных примесей и структурных дефектов на магниточувствительные свойства, а также роль спиновой микромеханики в магнитопластическом эффекте.

Сегодня активно изучается влияние магнитных полей на структурно-чувствительные свойства немагнитных с перспективой активного использования таких материалов на практике. В данной главе проведен анализ работ, в которых изучалось влияние магнитных полей на различные физические свойства немагнитных материалов (ионные кристаллы, полупроводники, диа- и парамагнетики).

Рассмотрены работы, описывающие эффект последствия магнитных полей. Показано, что магнитное поле способно повлиять на динамику ползучести и микротвердости. Особое внимание уделено взаимодействию магнитных полей с макроскопическими включениями в матрице материала.

Макроскопические включения широко встречаются в композитных материалах и часто используются для создания армированных матриц. Такие многокомпонентные материалы представляют собой пластическую матрицу с упрочняющими компонентами, обеспечивающими повышенную прочность и жесткость. В качестве основы для композита широко используются полимерные и металлические матрицы, в том числе алюминий.

В заключении первой главы описываются спиновые процессы в микромеханике пластичности и их взаимосвязь с магнитопластическим эффектом и делается вывод о необходимости исследования влияния постоянных магнитных полей на механические свойства материалов, содержащих макроскопические включения.

Во **второй** главе описываются необходимое оборудование и методы исследования. Плоские алюминиевые образцы вытачивались шириной в рабочей части 3,0 мм и длиной $l_0 = 80$ мм, которые вырезались из алюминиевой ленты толщиной 2 мм. Материалом ленты служил сплав алюминия с магнием и кремнием ($C_{Al} \leq 95,8\%$; $C_{Fe} \leq 2.5\%$, $C_{Mg} \leq 0.9\%$; $C_{Si} \leq 0.6\%$, прочие (Cu, Ti, Zn) $\leq 0.2\%$). А также исследовались образцы из технических сплавов алюминия с содержанием $C_{Al} \leq 99,99\%$.

Полученные образцы проходили предварительную экспозицию в магнитных полях постоянных магнитов индукцией до 1 Тл (Величина индукции магнитного поля определялась с помощью датчика Холла), после чего исследовалась ползучесть и микротвердость образцов. Испытания на ползучесть исследуемого сплава определялись на машине рычажного типа WP-600 Creep Testing Machine.

Микротвердость образцов определялась на установке ПМТ-3М. В нашем случае использовался метод вдавливания алмазного наконечника в виде пирамидки с углом при основании 136° . В данной работе нагрузка на индентор выбиралась в диапазоне от 50 до 200 грамм, после чего по полученным отпечаткам на поверхности определялось значение микротвердости. Размеры отпечатков варьировались от 50 до 300 мкм. Результаты исследований показали разницу в значениях микротвердости образцов, прошедших предварительную экспозицию в МП ($HV_{100}=310\pm 30$ МПа), и образцов- свидетелей ($HV_{100}=420\pm 30$ МПа).

В работе рассмотрено также влияние термической обработки (отжиг, захлаживание). Обнаружено, что изотермический отжиг образцов влияет на механические свойства материала в испытаниях на ползучесть и микротвердость. Проведенное температурное испытание позволяет экспериментально определить температуру купирования эффекта.

Структура поверхности исследуемых сплавов изучалась с помощью электронной растровой микроскопии. По полученным фотографиям полированной поверхности сплава были зафиксированы отдельные фазы включений. Средний размер приповерхностных включений варьировался от 2 до 5 микрон.

Изучение структуры железосодержащих включений в сплаве осуществлялось методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Железосодержащие включения были также обнаружены в утоненных пленках. По результатам ПЭМ определялась геометрия включений в сплаве. Экспериментально обнаружено, что включения когерентно связаны с алюминиевой матрицей образцов.

В **третьей** главе изучались химический состав матрицы и включений, а также магнитные свойства алюминиевых сплавов. Результаты микрорентгеновского анализа состава материала показали наличие железа, как в самих включениях, так и в парамагнитной матрице алюминия (Таблица 1).

Таблица 1.

Химический элементный состав материала.

| Зона 1 | | | Зона 2 | | | Зона 3 | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Элемент | Масса % | Атомы % | Элемент | Масса % | Атомы % | Элемент | Масса % | Атомы % |
| B | 2,59 | 8,48 | B | 14,25 | 29,22 | B | 5,40 | 19,39 |
| O | 1,16 | 2,57 | O | 1,50 | 2,07 | O | 0,28 | 0,68 |
| Al | 36,38 | 47,74 | Al | 82,94 | 68,18 | Al | 17,06 | 24,53 |
| Si | 5,17 | 6,52 | Fe | 1,34 | 0,52 | Si | 2,46 | 3,40 |
| Mn | 1,58 | 1,02 | | | | Mn | 5,00 | 3,53 |
| Fe | 53,11 | 33,67 | | | | Fe | 69,79 | 48,47 |

Кристаллическое поле атомов железа во включениях было получено по оценке мёссбауэровских спектров ^{57}Fe образца поликристаллического алюминия. Экспериментально выявлены асимметричные дублетные спектры Рис. 1. Так как изучалось ферромагнитное железо металлического соединения во включениях (алюминиевая матрица не влияет на спектр), можно ожидать секстет, типичный для ионов Fe. Мёссбауэровские данные вместе с результатами ПЭМ позволяют сделать вывод, что включения в сплаве $\text{Fe}_x\text{Al}_{1-x}$ присутствуют в суперпарамагнитном состоянии при комнатной температуре.

Для определения вклада ферромагнитных включений и отдельных ионов железа в магнитные свойства исследуемого сплава измерялась зависимость магнитного момента образца от индукции магнитного поля (магнитный гистерезис). Петля гистерезиса Рис. 2 с коэрцитивным полем 3500 Э хорошо соответствует показателям, характеризующими наночастицы сплава Fe_3Al как магнитомягкий материал. Коэрцитивная сила 3500 Э при 2 К Рис.(2,а) и 25 Э при 300 К Рис.(2,б) включений Fe_3Al также подтверждается химическим анализом.

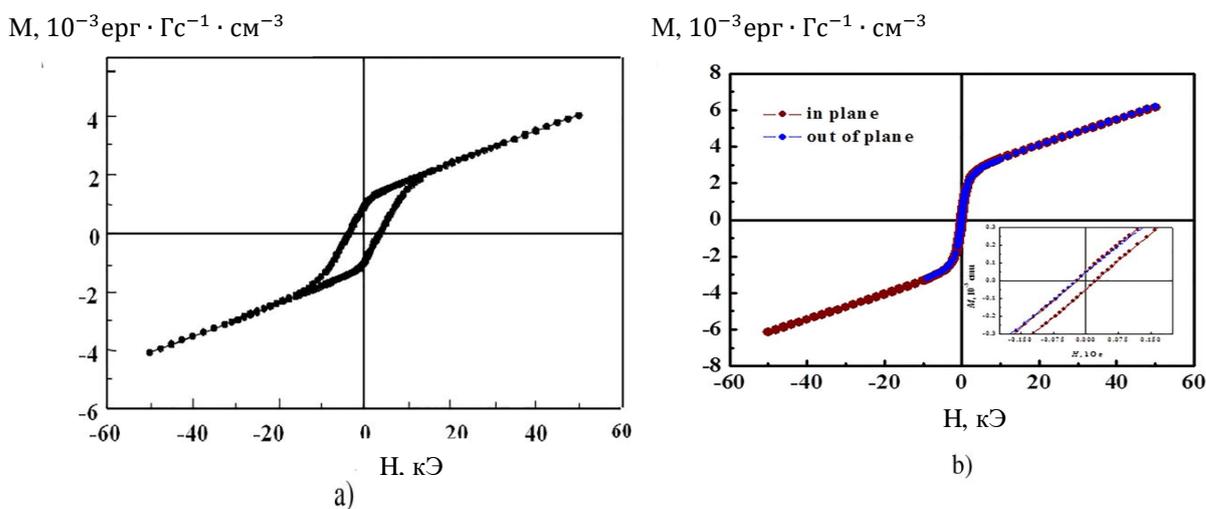


Рис. 2 Магнитная петля гистерезиса, записанная при 2 К в магнитном поле, направленном вдоль оси деформации (а) и петли магнитного гистерезиса, записанные при 300 К в магнитном поле, направленном вдоль (черное) и перпендикулярно (синее) оси деформации (б). Часть гистерезиса с высоким разрешением показана на вставке.

На Рис. 2(а) наблюдается характерный наклон кривой $M(H)$ при температуре 2К в сильном магнитном поле. Такое поведение не является свойством парамагнитных диспергированных легирующих ионов, которые должны проявлять нелинейную зависимость поля Бриллюэна при низкой температуре.

Линейная полевая зависимость при 2К является отпечатком антиферромагнитных включений, наиболее вероятно связанных с сплавом Fe₃Al. Таким образом, можно сделать вывод о сосуществовании ферромагнитных и антиферромагнитных включений с парамагнитными легирующими ионами Fe, распределенными в матрице Al.

Кроме того, были получены полевые зависимости намагниченности в магнитном поле, направленном вдоль (черный) и перпендикулярно (синий) к оси деформации деформированных образцов Al Рис. 2 (б). Различия пропадают при температуре 300 К Рис. 2 (б).

Температурные зависимости магнитного момента в образце, охлажденном с 300 К до 2 К в магнитном поле 1 Тл (охлаждение поля, FC) и без экспозиции в магнитном поле (охлаждение нулевого поля, ZFC) изображены на Рис. 3. Данные температурные зависимости были зарегистрированы во всех слабых магнитных полях 1 кЭ.

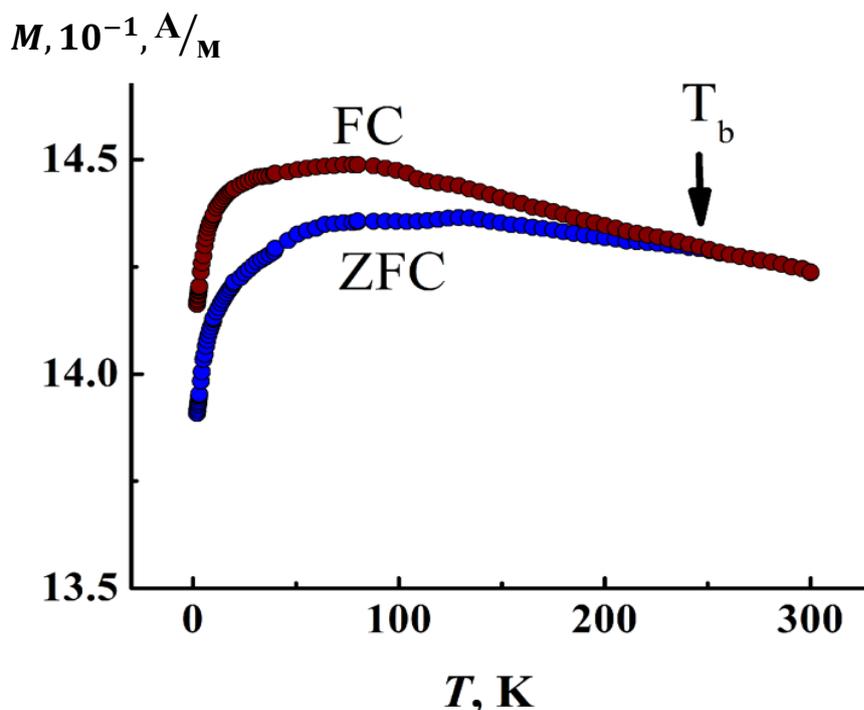


Рис. 3. Температурные зависимости магнитного момента M полевого охлаждения (FC) и охлаждения нулевого поля (ZFC), указывающие температуру блокировки в магнитном поле 1 кЭ (показано стрелкой)

Расхождение температурных зависимостей FC и ZFC при 250 К в магнитном поле 1 кЭ Рис. 3 указывает на переход ферромагнитных включений из суперпарамагнитного состояния (при высоких температурах) до заблокированного состояния (при низких температурах).

В **четвертой** главе описаны результаты тестов на ползучесть и микротвердость после предварительной экспозиции образцов в постоянном магнитном поле, а также предложены предполагаемые механизмы ползучести, основанные на магнитострикции ферромагнитных включений и динамики дислокаций.

Были получены кривые ползучести при ступенчатом нагружении до и после обработки образцов во внешнем магнитном поле. На Рис. 4 изображен график абсолютной деформации от времени для двух образцов. Один из образцов (2, Рис. 4) подвергался магнитной экспозиции в поле постоянного магнита индукцией $B = 0,4$ Тл в течение 30 минут при комнатной температуре. Нетрудно видеть, что предварительная экспозиция образца в постоянном магнитном поле способствует более интенсивной деформации алюминиевого сплава.

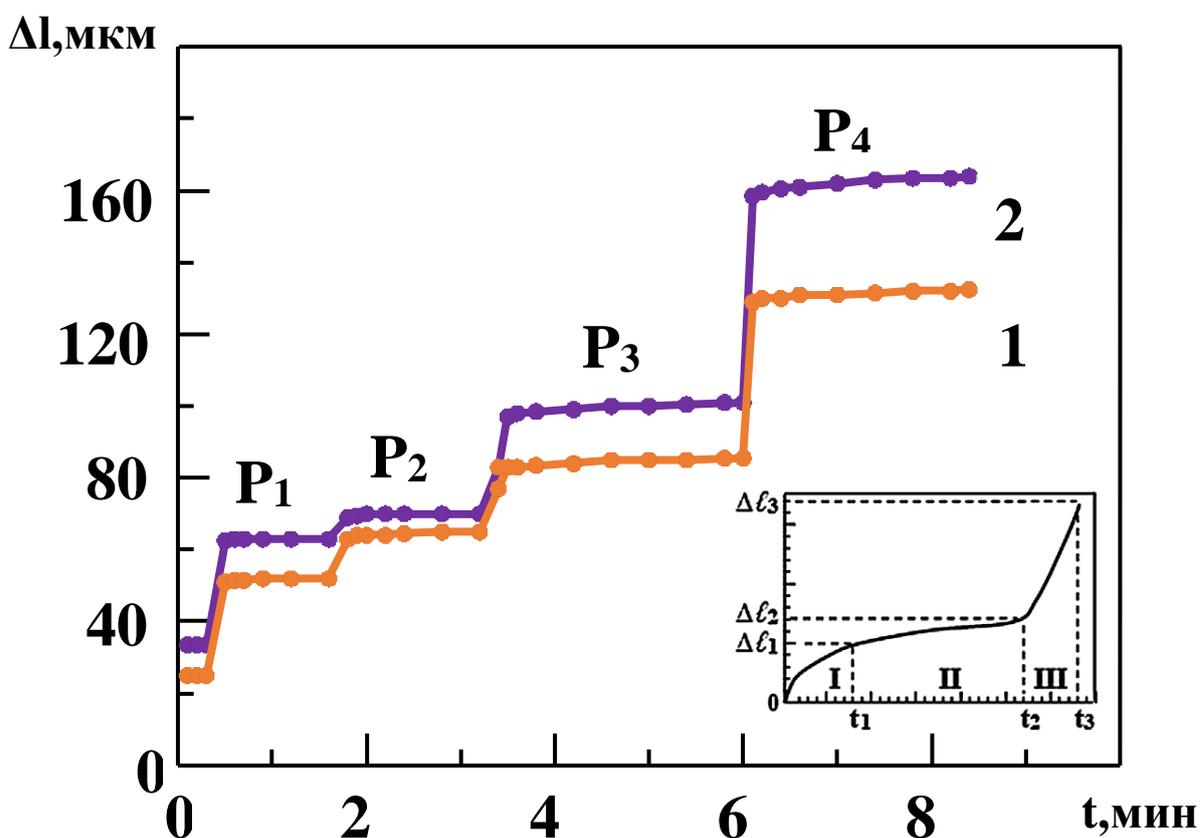


Рис. 4. Кривые ползучести для алюминия, снятые при ступенчатом напряжении в диапазоне нагрузок ($P=150\dots180$ Н) при комнатной температуре. 1 – Образец-свидетель. 2 – Экспозиция образца в магнитном поле $B = 0.4$ Тл. На вставке – условные стадии ползучести

Из многочисленных экспериментов было обнаружено, что наибольшее влияние магнитного поля образцы испытывают на нестационарной (первой) стадии ползучести. Кроме прироста деформации ползучести на этих стадиях, так же существенно меняется скорость ползучести, что отчетливо видно по различным значениям тангенса угла наклона кривых на нестационарных участках. Первую стадию ползучести аналитически можно описать с помощью следующего экспоненциального закона:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \cdot e^{\frac{(-E_a + \gamma\sigma)}{kT}}, \quad (1)$$

где $\dot{\varepsilon}_0$ – скорость деформации сразу после нагружения, E_a – энергия активации механизма, запускающего процесс ползучести, γ – активируемый объем процесса ползучести, σ – приложенное напряжение.

Полученные экспериментальные данные позволили сделать оценку энергии активации предполагаемого механизма ползучести и область активируемого объема процесса ползучести Рис.5.

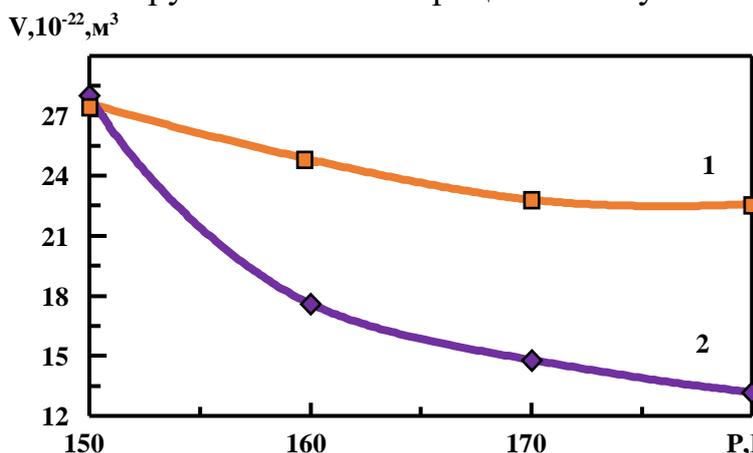


Рис. 5. Зависимость активационного объема процесса ползучести от нагрузки: 1- образец-свидетель, 2- предварительная экспозиция образца в МПВ = 0,4 T в течение 30 минут при комнатной температуре.

Как можно видеть из полученной зависимости, предварительная экспозиция образцов в МП снижает активационный объем в два раза. Это означает, что магнитное поле влияет на дефектную структуру, увеличивая общую плотность дислокаций в материале. Так как температура и действующее напряжение при одноосном растяжении образцов выдерживались постоянной, энергия активации

механизма, запускающего процесс ползучести, также не изменялась.

Уравнение, описывающее первую и вторую стадии абсолютной деформации ползучести:

$$\Delta l(t) = \Delta l_0 + \beta \cdot l_0 \cdot t^{\frac{1}{3}} + k \cdot l_0 \cdot t, \quad (2)$$

где, Δl , Δl_0 , l_0 – абсолютная деформация, абсолютная деформация в начальный момент времени и начальная длина образца соответственно; β -

постоянная, независящая от времени нагружения; k - скорость ползучести на второй стадии.

Результаты расчетов для констант ползучести β и k по уравнению (2) приведены на Рис.(6,7). Следует подчеркнуть заметное влияние магнитного поля на константу β , увеличивающуюся при $P=180\text{Н}$ после «магнитной» экспозиции практически в два раза. Вместе с тем, скорость ползучести k на второй стадии также меняется после экспозиции в магнитном поле. Это позволяет сделать вывод, что основные магнитоиндуцированные изменения происходят на первых двух стадия ползучести.

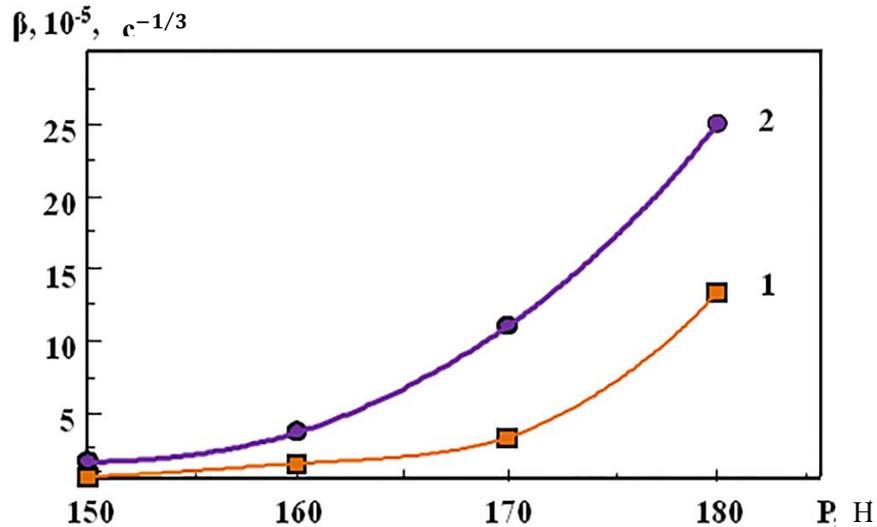


Рис. 6. Зависимость константы β от действующей нагрузки P : 1 - образец-свидетель; 2 - образец после предварительной экспозиции в МП $B=0.7\text{T}$ в течение 30 минут при комнатной температуре

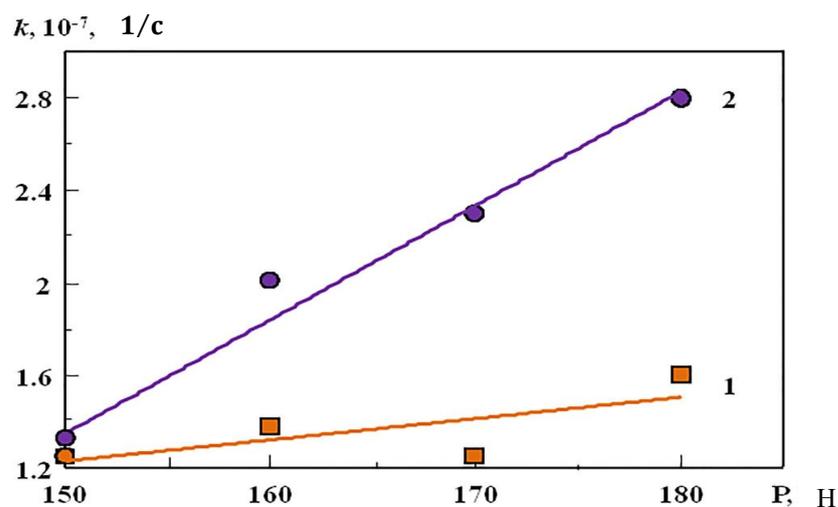


Рис. 7. Зависимость параметра k от приложенной нагрузки P : 1- образец-свидетель; 2- образец после экспозиции в поле $B=0.7\text{T}$ в течение 30 минут при комнатной температуре

В пятой главе изучен вопрос динамики расплавленных включений алюминия в области структурной неоднородности кремния и влияния магнитного поля на этот процесс. Для образования включений второй фазы образец разогревался до температуры, превышающей температуру образования эвтектики (850 К). Зарождение расплавленных зон в объеме матрицы возникает за счет контактного плавления на границе металл-полупроводник при изотермическом отжиге при температурах 1123...1273 К. За счет структурной неоднородности линейных дефектов процессы миграции являются причиной изменения химического потенциала на межфазных границах $\Delta\mu_k = \varepsilon \cdot \omega_k \cdot (\partial N_d / \partial x) \cdot \ell$. Именно из-за различий химического потенциала происходит процесс растворения вещества матрицы на «лобовой» и накопления на «тыльной» поверхностях включения и, таким образом, смещения включения как целого с некоторой скоростью w .

Зависимость скорости миграции $w(\ell)$ расплавленной зоны:

$$w = \frac{\bar{\beta} c D_i}{c D_i + \bar{\beta} \omega_i k T \ell} \left(\varepsilon \omega_k \frac{\partial N_d}{\partial x} \ell - \Delta\mu^* \right), \quad (3)$$

где $\Delta\mu^* = \Delta\mu_p^* + \Delta\mu_0^*$; $\Delta\mu_p^*, \Delta\mu_0^*$ - скачки химического потенциала на растворяющейся и растущей поверхностях включения; $\bar{\beta} = \frac{\beta_0 \beta_p}{\beta_0 + \beta_p}$; β_0, β_p - нормированные на kT удельные потоки растворения и кристаллизации; D_i, ω_i, c - коэффициент диффузии, атомный объем и концентрация в объеме включения. Опытные исследования показали, что магнитное поле способно влиять на скорость миграции расплавленной зоны при изотермическом отжиге Рис. 8.

Экспериментально обнаружено, что наибольший вклад предварительной магнитной экспозиции образцов кремния с дислокационной неоднородностью происходит при отжиге с температурой $T = 1123$ К. Так же обнаружена температура купирования эффекта, которая составила $T = 1200$ К. Полученная критическая температура купирования эффекта не противоречит результатам, полученным при изучении магнитостимулированной диффузии в монокристаллах кремния. Так же получены данные, свидетельствующие о сокращении среднего размера мигрирующей фазы за счет изменений, вносимых магнитным полем в удельные потоки растворения и кристаллизации.

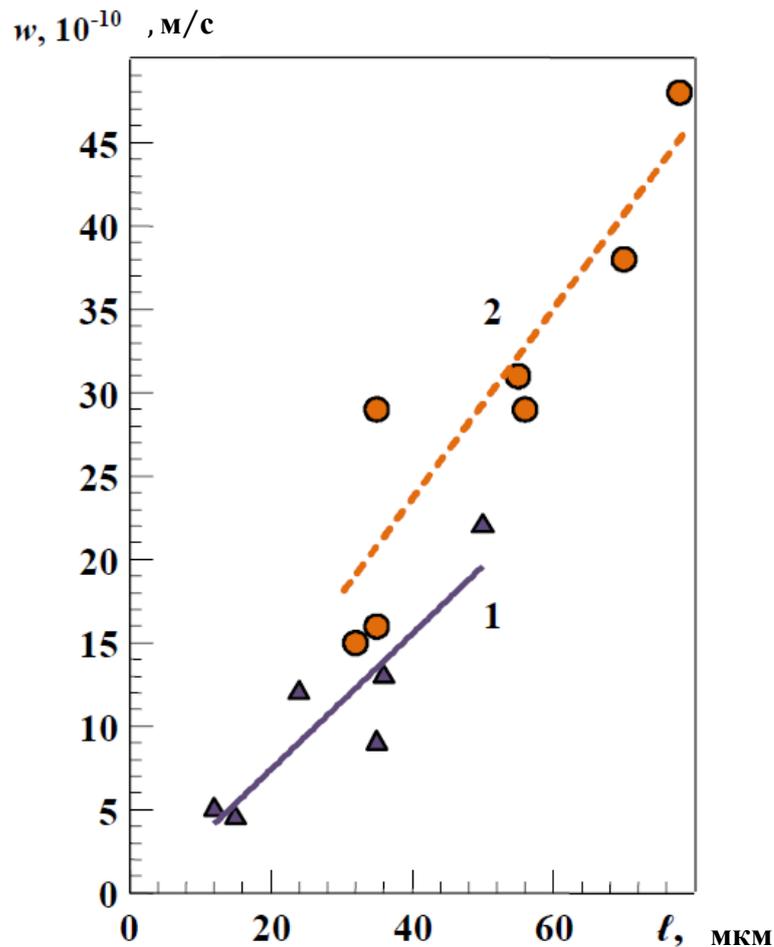


Рис. 8. Размерная зависимость скорости движения включений при температуре изотермического отжига кристаллов кремния $T=1123$ К. **1**- образцы без экспозиции в магнитном поле, **2** - образцы с предварительной экспозицией в постоянном магнитном поле $B=0.7$ Тл в течение 30 минут при комнатной температуре

Основные результаты и выводы

1. Методами оптической и электронной микроскопии выявлено распределение включений по размеру в алюминиевом сплаве (средний размер включения составил $\sim 2,5$ мкм, а концентрация включений в сплаве $\sim 10^{15} \text{ м}^{-3}$). Экспериментально определены химический состав включений (в среднем $C_{\text{Fe}} \sim 50\%$, $C_{\text{Al}} \sim 30\%$), а также объемная концентрация атомов железа в алюминии ($C_{\text{Fe}} \sim 0,5\%$). Из анализа мёссбауэровских спектров установлено преимущественное химическое соединение, составляющее включение (FeAl). Методами СКВИД-магнитометрии определены значения коэрцитивной силы образцов (с железосодержащими включениями) - 3500 Э при 2К и 25 Э при 300 К свойств образцов. Сделан вывод о том, что сплав семейства Fe_xAl является магнитомягким.

2. Обнаружено, что предварительная экспозиция алюминиевого сплава с железосодержащими включениями в постоянном магнитном поле ($B \leq 0,7$ Тл) приводит к увеличению деформации сплава (до 30%) и двукратному уменьшению величины активационного объема сплава γ .

3. Экспериментально зафиксированы времена релаксации (~25 часов) процессов ползучести сплава после его экспозиции в постоянном магнитном поле.

4. Экспериментально установлено влияние температуры (в диапазоне 263...573 К) на магнестимулированное поведение сплавов: наибольший эффект наблюдался при температуре отжига $T = 313$ К.

5. Предложен механизм влияния МП на процессы ползучести изучаемого сплава, связанный с магнестрикцией Fe-включений, находящихся в объеме сплава. Получены численные оценки локальных механических напряжений (~560 МПа), возникающих вблизи включения.

6. Экспериментально обнаружена миграция включений вторых фаз на основе алюминия в области структурной неоднородности монокристаллов кремния. Доказано, что возникающие расплавленные зоны (на основе Al) в монокристаллах кремния движутся в поле градиента концентрации дислокаций в область с большей концентрацией, а лимитирующей стадией миграции зон являются процессы плавления-кристаллизации на межфазных границах расплава с матрицей. Впервые экспериментально зафиксировано влияние предварительной экспозиции дислокационных образцов Si в постоянном магнитном поле на размерную зависимость скорости миграции, а также на средний размер мигрирующей зоны.

Основные публикации по теме диссертации

1. Influence of permanent magnetic fields on creep and microhardness of iron containing aluminum alloy / Danila E. Pshonkin [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. 2019. Vol. 8. Issue 3. P. 2481-2485. (0,49 п.л. / 0,24 п.л.).

2. The effect of constant magnetic fields on the dynamics of molten zones in the field of structural inhomogeneity of silicon / Danila E. Pshonkin [et al.] // Technical Physics letters. 2018. № 6. P. 498-501. (0,37 п.л. / 0,18 п.л.).

3. Skvortsov A.A., Pshonkin D.E., Lyk'yanov M.N. Influence of constant magnetic fields on defect formation under conditions of heat shock in surface layers of silicon // Key engineering materials. 2018. № 771. P. 124-129. (0,62 п.л. / 0,31 п.л.).

4. Deformations of aluminum alloys under the influence of an additional load / Danila E. Pshonkin [et al.] // Periodicotechnica. 2018. № 30. P. 421-427. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.).

5. On the effect of magnetic fields on electromigration processes of liquid inclusions in aluminum and silicon / Danila E. Pshonkin [et al.] // Solid state phenomena. 2017. № 236. P.31-36.(0,47 п.л. / 0,23п.л.).
6. Effect of static magnetic fields on creep of aluminum alloy / Danila E. Pshonkin [et al.] // Solid state phenomena.2017. № 269. P. 1-6.(0,34 п.л. / 0,17 п.л.).
7. Skvortsov A.A., Koryachko M.V., Pshonkin D.E. Phase transitions on silicon surfaces with local surface heating // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2016: Тез. докл. международн. конф. Новосибирск. 2017. DOI: 10.1109/APEDE.2016.7879079.(0,1 п.л. / 0,05 п.л.).
8. Electromigration processes in silicon single crystals involving melt inclusions / Danila E. Pshonkin [et al.] // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Science. 2016. Vol. 7, Issue 6. P. 998-1003.(0,3п.л. / 0,14п.л.).
9. The electrothermal impact on a contact metal-semiconductor: applications to the germanium-silver system / Danila E. Pshonkin [et al.] // Microelectronics International. 2018. Vol. 35. No. 4. P. 197-202.(0,32п.л. / 0,16п.л.).
10. Softening of the Al-Mg-Si-Fe alloy under magnetostriction of FeAl microinclusions / Danila E. Pshonkin [et al.] // Journal of Applied Physics. 2019. Vol.125. Issue 2.(0,7 п.л. / 0,35 п.л.).
11. Пшонкин Д.Е., Корячко М.В. Динамика расплавленных включений в дислокационном кремнии // «Ломоносов - 2018»: Тез. докл. международн. конф. Москва. 2018. С.378 (0,12 п.л. / 0,06 п.л.).
12. Скворцов А.А., Пшонкин Д.Е. Влияние магнитного поля на ползучесть алюминиевого сплава с Fe-содержащими включениями // «ФППК – 2018»: Тез. докл. международн. конф. Черногловка. 2018. С.91. (0,13 п.л. / 0,07 п.л.).

Подписано в печать 19.02.2020
Объем: 1 усл. п. л.
Тираж: 100 экз. Заказ № ____
Отпечатано в типографии «11-й ФОРМАТ»
115230, г. Москва, Варшавское ш., 36
(499)788-78-56 www.autoreferat.ru