

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО:  
Декан физического факультета  
С.Н. Филимонов

Рабочая программа дисциплины

**Микромеханика деформируемого твердого тела**

по направлению подготовки / специальности  
**03.04.02 – Физика**

Магистерская программа  
**«Фундаментальная и прикладная физика»**

Форма обучения  
**Очная**

Квалификация

**Магистр**

Год приема  
**2023**

СОГЛАСОВАНО:  
Руководитель ОП  
О.Н. Чайковская

Председатель УМК  
О.М. Сюсина

Томск–2023

## **1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

– ПК-1 – способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

– ИПК-1.1. Знает основные стратегии исследований в выбранной области физики, критерии эффективности, ограничения применимости

– ИПК-1.2. Умеет выделять и систематизировать основные цели исследований в выбранной области физики, извлекать информацию из различных источников, включая периодическую печать и электронные коммуникации, представлять её в понятном виде и эффективно использовать.

## **2. Задачи освоения дисциплины**

– Освоить основные понятия кристаллографии, термодинамики мартенситных превращений, механизмов эффекта памяти формы, сверхэластичности, элементы двойникования и типы двойников в упорядоченных и неупорядоченных сплавах.

– Научиться применять научные знания к анализу влияния внешних напряжений и магнитных полей на термодинамическое равновесие фаз, магнитный эффект памяти формы и магнитную сверхэластичность, а также выявлять роль двойникования в деформационном упрочнении и разрушении сплавов.

## **3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы**

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, входит в модуль по выбору "Физика конденсированного состояния вещества".

## **4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине**

Семестр 2, экзамен.

## **5. Входные требования для освоения дисциплины**

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: Кристаллография, Физика твердого тела, Дефекты в твердых телах, Теория дислокаций, Физические модели пластичности и прочности, Композиционные материалы, Структурные фазовые переходы. Знать основы современных методов исследования структуры, элементного и фазового состава (рентгеноструктурный анализ, растровая и просвечивающая электронная микроскопия), физических и механических свойств.

## **6. Язык реализации**

Русский

## **7. Объем дисциплины (модуля)**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 часов, из которых:

– лекции: 20 ч.;

– практические занятия: 4 ч.;

в том числе практическая подготовка: 4 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

## 8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Тема 1. Введение в понятие двойникования как механизма пластической деформации металлов и сплавов. Элементы двойникования. Эллипсоид двойникования.

Краткое содержание темы. Определение двойникования. Отличие двойникования от скольжения. Основные элементы двойникования. Типы двойников. Описание механического двойникования тремя способами: 1) изменение формы; 2) соотношение между кристаллографическими ориентациями решеток в двойниковой ламели и в матрице; 3) перемещение атомов в процессе двойникования.

Тема 2. Дислокационные механизмы зарождения и роста двойников.

Краткое содержание темы. Источники двойников. Развернутый тетраэдр Томпсона для демонстрации расщепления полных дислокаций в ГЦК кристаллах на частичные дислокации Шокли. Дислокационные модели зарождения двойников в ГЦК металлах и сплавах.

Тема 3. Определение сдвига при двойниковании. Понятие критических скалывающих напряжений для двойникования. Примеры двойниковых структур.

Краткое содержание темы. Морфология механических двойников. Понятие когерентной двойниковой границы. Понятие упругого и неупругого двойникования. Определение критических скалывающих напряжений для двойникования. Определение индексов Миллера кристаллографической плоскости и направления после двойникового сдвига. Получение матрицы преобразования для новых индексов кристаллографической плоскости на примере ГЦК структуры. Условие перехода от деформации скольжением к деформации двойникованием в моно- и поликристаллах на примере ГЦК сплавов.

Тема 4. Описание процесса взаимодействия скольжения и двойникования и двойникования с двойникованием.

Краткое содержание темы. Дислокационные реакции взаимодействия скольжения и двойникования. Дислокационные реакции взаимодействия двойникования с двойникованием. Матричное описание взаимодействия скольжения с двойникованием и двойникования с двойникованием. Получение матрицы преобразований для новых ориентировок плоскостей первичного и вторичного двойникования в ГЦК сплавах.

Тема 5. Двойникование в сверхструктурах.

Краткое содержание темы. Двойниковые моды в сверхструктурах на примере сплава никелида титана. Определение типов двойникования в сверхструктурах. Различие сверхструктурных двойников от псевдодвойников на примере В2 сверхрешетки.

Тема 6. Двойникование при упрочнении и разрушении.

Краткое содержание темы. Влияние двойникования на деформационное упрочнение на примере стабильных ГЦК высокоэнтропийных сплавов с низкой величиной энергии дефекта упаковки. Модель Реми и Мюльнера для определения вклада двойникования в деформационное упрочнение на примере стали Гадфильда. Хрупкое разрушение при деформации двойникованием.

Тема 7. Введение в понятие мартенситных превращений. Кристаллографические особенности мартенситных превращений.

Краткое содержание темы. Мартенситные превращения в металлах и сплавах как сдвиговые фазовые переходы I-го рода. Способы определения мартенситных переходов: 1) исследование температурной зависимости электрического сопротивления; 2) исследование выделения и поглощения тепла при мартенситных переходах; 3) рентгеновские,

электронно-микроскопические методы определения мартенситных превращений. Кристаллографические особенности мартенситных превращений. Деформация решетки, деформация с инвариантной решеткой, понятие габитусной плоскости.

Тема 8. Термодинамика мартенситных превращений.

Краткое содержание темы. Свободная энергия Гиббса, вклад поверхностной, химической и диссипативной энергии в термодинамический баланс превращений. Термодинамическое равновесие. Нетермоупругое и термоупругое мартенситное превращение. Развитие мартенситного превращения под нагрузкой.

Тема 9. Механизмы эффекта памяти формы и сверхэластичности.

Краткое содержание темы. Кристаллографический и структурный механизм эффекта памяти формы и сверхэластичности. Критерий развития сверхэластичности. Примеры развития эффекта памяти формы и сверхэластичности в моно- и поликристаллах. Ориентационная зависимость эффекта памяти формы и сверхэластичности.

Тема 10. Мартенситные ГЦК-ОЦК превращения.

Краткое содержание темы. Деформация Бейна. Ориентационное соотношение при ГЦК-ОЦК превращении. Мартенситные превращения в сталях. Типы мартенситных кристаллов, эффект памяти формы и сверхэластичность при ГЦК-ОЦК превращении в сплавах на основе железа.

Тема 11. Кристаллографические характеристики мартенситных превращений в различных материалах.

Краткое содержание темы. Кристаллография В2-R-B19' мартенситных превращений в сплавах Ti-Ni и В2-L1<sub>0</sub> превращений в ферромагнитных сплавах NiFeGa и CoNiAl. Закономерности проявления эффекта памяти формы и сверхэластичности в В2-сплавах.

Тема 12. Влияние магнитного поля на мартенситные превращения в ферромагнитных сплавах.

Краткое содержание темы. Влияние магнитного поля на температуры мартенситных превращений. Магнитный эффект памяти формы. Термодинамика мартенситных превращений в магнитном поле. Влияние магнитного поля на изменение тонкой структуры мартенсита. Превращение магнитной энергии в механическую энергию.

## 9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине осуществляется путем контроля посещаемости, проведения фронтальных опросов по лекционному материалу, выполнения домашних заданий, и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр. Оценочные материалы текущего контроля размещены на сайте ТГУ в разделе «Информация об образовательной программе» – <https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>.

## 10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

**Экзамен во втором семестре** проводится в устной форме по билетам. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации размещены на сайте ТГУ в разделе «Информация об образовательной программе» – <https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>

## 11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=24594>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине (<https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>).

в) План практических занятий по дисциплине.

1. Новые индексы Миллера при двойниковании. Матрица преобразования.

2. Кристаллография В2-L1<sub>0</sub> мартенситного превращения, ориентационная зависимость деформации решетки при превращении в сплаве CoNiAl/

## 12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

1. Введение в микромеханику. Под редакцией М. Онами. М.: Металлургия, 1987. С. 10-28; 54-72.
2. Дж. Эшелби. Континуальная теория дислокаций. М.: Из-во иностр. Литературы, 1963. С. 11-49.
3. М.В. Классен-Неклюдова. Механическое двойникование. М.: Из-во АН СССР, 1960. С. 12-19; 69-93; 163-195.
4. А. Келли, Г. Гровс. Кристаллография и дефекты в кристаллах. М.: Мир, 1974. С. 337-362.
5. Сплавы с эффектом памяти формы. Под редакцией Фунакубо Х. М. М.: Из-во Металлургия, 1990. С. 24-41.
6. А.М. Косевич. Дислокации в теории упругости. М., 1978. 256 с.
7. В.И. Владимиров. Физическая природа разрушения металлов. М.: Металлургия, 1984. С. 8-22; 118-210.
8. М.А. Штремель. Прочность сплавов. Часть 2. Деформация. Учебник для вузов. М.: МИСиС, 1997. 527 с.
9. М.А. Штремель. Прочность сплавов. Часть 1. Дефекты решетки. Учебник для вузов. М.: МИСиС, 1999. 384 с.
10. М.А. Штремель. Разрушение материала. М.: Изд. Дом МИСиС, 2014.–670 с.
11. М.А. Штремель. Разрушение структур. М.: Изд. Дом МИСиС, 2015.–976 с.
12. В.Е. Панин, В.А. Гриняев, В.И. Данилов и др. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск, Наука, 1985. С. 20-53.

б) дополнительная литература:

1. Сплавы никелида титана с памятью формы. Часть I. Структура, фазовые превращения и свойства. Под редакцией В.Г. Пушина. Из-во Екатеринбург, 2006. С.169-248, 356-413.
2. M.F. Ashby. The deformation of plastically non-homogeneous alloys. I: Strengthening methods in crystal. Ed. By A. Kelly, P. Nickolson, Elsevier. 1971. P. 137-192.
3. Структурно-фазовые состояния и свойства металлических систем. Под ред. А.И. Потекаева. Томск: Из-во НТЛ, 2004. С. 31- 45.
4. Эволюция, структура и свойства металлических материалов. Под ред. А.И. Потекаева. Томск: Из-во НТЛ, 2007. С. 401-435.
5. Y. I. Chumlyakov, I. V. Kireeva, E. Y. Panchenko, E. E. Timofeeva, I. V. Kretinina, O. A. Kuts Physics of thermoelastic martensitic transformation in high-strength single crystals // Materials science foundations. – 2015. –V. 81-82, P. 107-173.

в) ресурсы сети Интернет:

1. микромеханика электронная библиотека [http://cyberleninka.ru/search?f\[cat term\\_grnti\\_id\]=2262&q=](http://cyberleninka.ru/search?f[cat term_grnti_id]=2262&q=)
2. WEB ИРБИС. Рубрика «Микромеханика» [http://irbis.sstu.ru/cgi-bin/irbis64r\\_13](http://irbis.sstu.ru/cgi-bin/irbis64r_13)
3. Пластическая деформация металлов двойникованием. Пластическая деформация и деформационное упрочнение. Курс лекций. [http://studopedia.ru/3\\_2406\\_plasticheskaya-deformatsiya-metallov-dvoynikovaniem.html](http://studopedia.ru/3_2406_plasticheskaya-deformatsiya-metallov-dvoynikovaniem.html)

4. Скрипко З.А. Изучение темы «Эффект памяти формы металлов»  
<http://cok.opredelim.com/docs/300/index-57842.html>
5. Общероссийская Сеть КонсультантПлюс Справочная правовая система.  
<http://www.consultant.ru>

### 13. Перечень информационных технологий

- а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:  
– Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office OneNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook);  
– публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).
- б) информационные справочные системы:  
– Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ –  
<http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>  
– Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ –  
<http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>  
– ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>  
– ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>  
– Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>  
– ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>  
– ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

### 14. Материально-техническое обеспечение

- Аудитории для проведения занятий лекционного типа.  
Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.  
Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.  
Аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешанном формате, оснащенные системой «Актру».  
Все виды материально-информационной базы Научной библиотеки ТГУ.  
Мультимедийное оборудование физического факультета ТГУ.  
Программное обеспечение курсов, предшествующих изучению представленной дисциплины.

### 15. Информация о разработчиках

- Панченко Елена Юрьевна, доктор физико-математических наук, доцент, кафедра физики металлов физического факультета ТГУ, профессор.  
Чумляков Юрий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра физики металлов НИ ТГУ, профессор.  
Киреева Ирина Васильевна, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, кафедра физики металлов НИ ТГУ, профессор.