

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

Физический факультет



УТВЕРЖДАЮ:  
Декан физического факультета

С.Н. Филимонов

«15» апреля 2021 г.

Рабочая программа дисциплины

**Микромеханика деформируемого твердого тела**

по направлению подготовки  
**03.04.02 – Физика**

Направленность (профиль) подготовки:  
**«Фундаментальная и прикладная физика»**

Форма обучения

**Очная**

Квалификация

**Магистр**

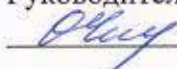
Год приема

**2021**

Код дисциплины в учебном плане: Б1.В.ДВ.01.04.07

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

 О.Н. Чайковская

Председатель УМК

 О.М. Сюсина

Томск–2021

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

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

– ПК-1 – Способен 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, Теория пластичности, 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: 24ч.;  
– в том числе практическая подготовка: 18 ч.  
Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

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

Тема 1. Введение в понятие мартенитных 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 2. 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 3. 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 4. Мартенситные ГЦК-ГПУ превращения.

Краткое содержание темы. Понятие дефекта упаковки вычитания и внедрения. Образование ГПУ-фазы при движении частичной дислокации Шокли. Габитусная плоскость и сдвиг при ГЦК-ГПУ превращении. Эффект памяти формы при ГЦК-ГПУ превращении в поли- и монокристаллах сталей FeMnNiCrSi.

Тема 5. Мартенситные ГЦК-ОЦК превращения.

Краткое содержание темы. Деформация Бейна. Ориентационное соотношение при ГЦК-ОЦК превращении. Эффект памяти формы и сверхэластичность при ГЦК-ОЦК превращении в поли- и монокристаллах FeNiCOAlTa.

Тема 6. 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.

Тема 7. 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 8. 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 9. 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 10. 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 11. 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 12. Двойникование при упрочнении и разрушении.

Краткое содержание темы. Влияние двойникование 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.

## 9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится с применением балльно-рейтинговой системы, включающей контроль посещаемости, результаты выполнения заданий по материалам курса (выступление и работа на практических занятиях), и фиксируется в форме баллов (нарастающим итогом): посещаемость – максимальный балл 5, выполнение заданий по материалам курса – 40. Контрольная точка проводится не менее одного раза в семестр.

## 10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

**Экзамен** проводится в устной форме по билетам. Экзаменационный билет состоит из двух частей. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

На промежуточную аттестацию планируется не более 60 баллов.

Итоговая оценка по дисциплине складывается из суммы баллов, полученных по итогам текущего контроля и промежуточной аттестации.

Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Экзаменационная оценка определяется исходя из результатов экзамена и текущей аттестации в течение семестра и согласуется с принятым соответствием с 5-ти балльной шкалой оценивания: 100-86 – «отлично»; 85-66 – «хорошо»; 65-50 – «удовлетворительно», менее 50 – «неудовлетворительно».

Экзаменационный билет включает 2 вопроса из списка контрольных вопросов по курсу (приведен в разделе 11), проверяющих сформированность компетенции ПК-1 в соответствии с индикаторами ИПК-1.1 и ИПК-1.2. Ответы даются в развернутой форме.

Пример экзаменационного билета:

### **БИЛЕТ № 1**

Вопрос 1. Геометрически-необходимые дислокации. Различие в появлении геометрически-необходимых и статически запасенных дислокаций. Зависимость плотности геометрически-необходимых дислокаций от размера и формы пластически недеформируемых частиц.

Вопрос 2. Критерий Мизеса. Что такое совместность пластической деформации на примере поликристалла?

Дополнительные и/или уточняющие вопросы по основным темам и содержанию курса (разделы 8, 11), позволяющие оценить уровень освоения всей программы. Ответ на уровне формулировки основных определений и/или краткого изложения физики явления и соответствующих представлений.

Например:

Вопрос 1. Дать определение эффекта памяти формы и сверхэластичности.

Вопрос 2. Механизмы пластической деформации.

Вопрос 3. Магнитный эффект памяти формы.

Вопрос 4. Пример двойниковых мод в свехрешетке.

И т.д.

## **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.

Перечень вопросов, выносимых на экзамен.

1. Вопрос 1. В чем физическое различие в появлении геометрически-необходимых и статически запасенных дислокаций?
2. Вопрос 2. Как связана кривизна решетки с плотностью геометрически-необходимых дислокаций?
3. Вопрос 3. Как связан поворот мезообъемов с плотностью геометрически-необходимых дислокаций?
4. Вопрос 4. Почему механические свойства могут зависеть от размера тела?
5. Вопрос 5. В чем состоит физическая причина появления обратимого пластического течения при скольжении в композиционных материалах с недеформируемыми частицами?
6. Вопрос 6. Что такое совместность пластической деформации на примере поликристалла?
7. Вопрос 7. В чем состоит различие сверхструктурных двойников от псевдодвойников на примере В2 свехрешетки?
8. Вопрос 8. Почему при охлаждении В2 монокристаллов никелида титана происходит деформация решетки, а деформация формы не наблюдается?
9. Вопрос 9. Почему при множественном двойниковании в ГЦК кристаллах наблюдается высокий коэффициент деформационного упрочнения?
10. Вопрос 10. В чем различие в движущих силах обратимого пластического течения при упругом двойниковании и при термоупругих мартенситных превращениях?
11. Вопрос 11. Сформулируйте условия для наблюдения сверхэластичности в кристаллах, испытывающих термоупругие мартенситные превращения?

12. Вопрос 12. В чем состоит роль пластического течения при разрушении твердых тел?
13. Вопрос 13. Почему одни твердые тела разрушаются хрупко, а другие вязко?
14. Вопрос 14. Может ли один и тот же кристалл разрушаться хрупко и вязко?
15. Вопрос 15. Как используя механические испытания кристаллов определить внутренние напряжения при пластическом течении?
16. Вопрос 16. Как влияет магнитное поле на сдвиг температур мартенситного превращения в случае ферромагнитного мартенсита?
17. Вопрос 17. В чем состоит механизм магнитной памяти формы? В чем состоит отличие обычного эффекта памяти формы и магнитного эффекта памяти формы?

в) План семинарских / практических занятий по дисциплине.

1. «Двойники в сверхструктурах  $L1_2$ ,  $D1_a$ ,  $DO_{22}$ ,  $B2$ . Сложное двойникование включающее перетасовки в  $B2$  решетке. Сверхструктурные двойники, псевдодвойники».

2. «Влияние магнитного поля на мартенситные превращения. Механизмы магнитного эффекта памяти формы».

г) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

Самостоятельная работа студента включает:

– углубленное теоретическое изучение разделов курса при подготовке к лекционным и практическим занятиям;

– подготовку к обсуждению материала, в том числе самостоятельный поиск необходимых источников информации, включая научно-образовательные ресурсы сети Интернет;

– подготовку к экзамену.

## 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 On-eNote, 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**

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.