

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

**Физические модели пластичности и прочности**

по направлению подготовки

**03.04.02 Физика**

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

Форма обучения  
**Очная**

Квалификация  
**Бакалавр**

Год приема  
**2023**

СОГЛАСОВАНО:  
Руководитель ОП  
О.Н. Чайковская

Председатель УМК  
О.М. Сюсина

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

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

– ПК-1 – способность проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий;

– ОПК-2 – способность проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

– ИОПК 2.2. Анализирует и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные выводы по результатам исследования;

– ИПК-1.1. Владеет навыками сбора и анализа научно-технической информации по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования;

## **2. Задачи освоения дисциплины**

– Освоить фундаментальные физические модели пластичности и прочности металлических материалов.

– Научиться применять основные физические представления о закономерностях пластической деформации и различных механизмах упрочнения металлов и сплавов при решении практических и теоретических задач профессиональной деятельности.

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

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

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

Семестр 8, зачет с оценкой.

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

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования. Особенно важно для понимания данного курса знать и владеть основными понятиями и методами из курса Теории дислокаций в анализе физических явлений при пластическом течении различных металлических материалов.

## **6. Язык реализации**

Русский

## **7. Объем дисциплины (модуля)**

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

– лекции: 38 ч.;

– семинарские занятия: 8 ч.

в том числе практическая подготовка: 30 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

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

Тема 1. Кристаллография скольжения. Природа предела текучести.

Системы скольжения в кристаллах. Кривые течения монокристаллов. Первичная и скрытые системы скольжения. Анализ касательных напряжений в скрытых системах. Влияние ориентации кристалла. Физическая природа критического скалывающего напряжения. Реализация макроскопического сдвига движением и размножением дислокаций. Напряжение Пайерлса. Взаимодействие пробной дислокации с дислокационной решеткой Тейлора и лесом дислокаций. Дальнедействующее и короткодействующее взаимодействие дислокаций.

Тема 2. Термически-активируемое скольжение дислокаций.

Термическая и атермическая компоненты напряжения течения. Термическая активация движения дислокаций в поле локальных препятствий. Скорость активируемого движения дислокаций. Энергия и объем активации. Термически активируемые движения дислокаций в потенциале Пайерлса. Термически активируемое движение дислокаций и макроскопическое течение в кристаллах. Особенности термически активируемого течения в ковалентных кристаллах, металлических кристаллах с О.Ц.К. и Г.Ц.К. решетками.

Тема 3. Теория деформационного упрочнения монокристаллов.

Три стадии скольжения в кубических кристаллах. Феноменология скольжения и упрочнения на I стадии. Скольжение по скрытым системам и образование дислокационных барьеров. Формирование дальнедействующих напряжений в дислокационных скоплениях. Релаксация напряжений плоских скоплений. Формирование ячеистых дислокационных структур. II стадия скольжения. Дислокационные модели и феноменологические теории упрочнения (модели дальнедействующего и короткодействующего взаимодействия дислокаций, модель композита, модель Кульман-Вильсдорф). Массовое поперечное скольжение. III стадия скольжения. Явление динамического дислокационного возврата. Полосовые структуры. Разориентированные ячеистые структуры. Фрагментация кристаллов.

Тема 4. Коллективные и ротационные моды деформации.

Понятие дисклинаций. Частичные и полные дисклинации. Поле напряжения клиновой дисклинации. Дисклинационные диполи. Сочетание сдвига и поворот решетки. Экспериментальное наблюдение дисклинаций. Локализация сдвига. Структурные аспекты и характерные дефектные субструктуры мезоуровня деформации и кривизна кручение решетки как количественная характеристика дефектной структуры мезоуровня деформации. Особенности пластической деформации поликристаллических материалов.

Тема 5. Твердорастворное упрочнение. Сегрегации примеси на дислокациях. Структура и движение дислокаций в интерметаллидах.

Теория упрочнения твердых растворов. Поле напряжений сферического включения. Сегрегации примеси на дислокациях. Атмосферы Коттрелла, Снука, Дебая-Хюккеля и Судзуки. Сверхдислокации в упорядоченных сплавах и интерметаллидах. Плоское и объемное расщепление дислокаций в сверхструктуре  $L1_2$ . Механизмы закрепления сверхдислокаций Флинна, Кира, Витека. Зависимость энергии антифазных границ в  $L1_2$  сверхструктуре от параметра порядка. Аномальная температурная зависимость сопротивления движению дислокаций в сверхструктурах.

Тема 6. Дислокационные модели и теория дисперсного упрочнения в гетерофазных сплавах.

Дислокационные модели взаимодействия с частицами атомно-упорядоченных фаз и теория предела текучести в сплавах с атомно-упорядоченной фазой. Упругое взаимодействие дислокаций с частицами вторичных фаз. Дислокационная модель Герольда-Хаберкорна и теория предела текучести в сплавах с упругими включениями вторичных фаз. Огибание дислокациями включений вторичных фаз. Механизм Орована. Теория предела текучести в сплавах с частицами некогерентных фаз. Дислокационные кольца Орована. Особенности упрочнения гетерофазных сплавов. Геометрически необходимые дислокации.

Дислокационная модель Эшби. Теория упрочнения и модели локального призматического скольжения на частицах вторичных фаз. Основные принципы создания современных высокопрочных материалов. Структура и особенности пластической деформации высокоэнтропийных сплавов.

## **9. Текущий контроль по дисциплине**

Текущий контроль по дисциплине осуществляется путем контроля посещаемости, результатов выполнения заданий по материалам курса (выступление и работа на семинарских занятиях), проведения фронтального опроса, теста 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**

**Зачет с оценкой** в восьмом семестре проводится в письменной форме по билетам. Продолжительность зачета 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=22044>

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

в) План семинарских/практических занятий по дисциплине.

1. Анализ критических сдвиговых напряжений для действующих систем скольжения в ГЦК монокристаллах. Влияние ориентации кристалла.

2. Структура и особенности пластической деформации многокомпонентных (высокоэнтропийных) сплавов.

3. Особенности пластической деформации и упрочнения поликристаллических материалов.

4. Аномальная температурная зависимость сопротивления движению дислокаций в сверхструктурах.

5. Основные принципы создания современных высокопрочных материалов.

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 зачету.

## **12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет**

а) основная литература:

2. Металловедение: учеб. в 2 т. Т.1. Основы металловедения/ И.И. Новиков, В.С. Золоторевский, В.К. Портной [ и др. ]; под общ. Ред. В.С. Золоторевского. – 2-е изд., испр. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2014. 496 с.

3. Physical Metallurgy. Edited by: David E. Laughlin and Kazuhiro Hono – Elsevier, 2014, Volume II

- (Chapter 16 Dislocations, Chapter 17 Plastic Deformation of Metals and Alloys) – P.1073-2008.
- Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. - М.: Атомиздат, 1972. - Гл. 9, 15, 19, 20, 21, 22.
  - Бернер Р., Кронмюллер Т. Пластическая деформация монокристаллов. - М.: Металлургия, 1969. - С. 272.
  - Штремель М. А. Прочность сплавов, ч. II. Деформация. - М., Изд. МИСИС, 1997. - Гл. 1. - С. 13-58; Р. 3.3. - С. 114-119; 137-147, Р 4.2. - С. 1185-187; Гл.V. - С. 230-314; Гл. VI. - С. 364-408.
  - Kuhlman-Wilsdorf D. Theory of plastic deformation properties of low energy dislocation structures // Mater. Sci. and Eng. - 1989.-V. A 113.-P. 1-41.
  - Малыгин Г. А. Процессы самоорганизации дислокаций и пластичность кристаллов. УФН, 1999. - Т. 169 - № 9. - С. 979-1010. 8.
  - Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. - М.: Металлургия, 1986. - С. 9-61.
  - Владимиров В. И., Романов А. Е. Дисклинации в кристаллах. - Л.: Наука, 1986. - С. 13-36. 51-72, 83-95.
  - Физическое металловедение / Пер. с англ. Под ред. Абрамова О. В., Копецкого Ч. В., Серебрякова А. В. т. 3. -М.: Металлургия, 1987. - С. 12-142, 188-245.
  - Мартин Дж. Микромеханизмы дисперсного твердения. - М.: Металлургия. ; Физическая мезомеханика, 1998. - Т. I. № I. - С. 3-35.

б) дополнительная литература:

- Набарро Ф. Р. Н., Базинский З. С, Холт Д. Б. Пластичность чистых монокристаллов. -М.: Металлургия, 1967. - Гл. I, III, IV
- Мильман Ю. В., Трефилов В. И., Фирстов С. А. Физические основы прочности тугоплавких металлов. - Киев: Наукова Думка, 1975. - С. 316.
- Клэрборо Л. М., Харгривс М. Е. Упрочнение металлов. // Успехи физики металлов. Т. 5-М.: Металлургия, 1976. - С. 7-126.
- Орлов А. Н., Перевезенцев В. Н., Рыбин В. В., Границы зерен в металлах -М.: Металлургия, 1980. - С. 5-52.
- Хирш П. Распределение дислокаций и механизмы упрочнения в металлах. Структура и механические свойства в металлах. - М.: Металлургия, 1967. - С.42-75.
- Физика деформационного упрочнения монокристаллов. - Киев: Наукова Думка, 1972.
- Steeds J. V. Dislocation arrangement in copper single crystals as function of strain // S&Proc. Roy. Soc. -1966. - V. 292. - 1430. - P. 343.
- Mughrabi H., Unga T. Long-Range internal stresses in deformed single-phase materials: The composite model and its consequences. Dislocations in Solids, Ed. F.R.N. Nabarro, M. S. Duesbery. Elsevier Science, V. 11. 2002. P. 343
- Перспективные материалы. Том I. Структура и методы исследования. / Учебное пособие / Под редакцией Д. Л. Мерсона – Тольятти (ТГУ), Москва (МИСиС), 2006. – 536 с. (Глава 7, стр. 267- 319; Глава 9, стр. 345-374).
- Перспективные материалы. Том III. Наноматериалы технического и медицинского назначения./ Учебное пособие / Под редакцией Д. Л. Мерсона – Тольятти (ТГУ), Москва (МИСиС), 2009. – 496 с. (Глава 2, стр. 55- 139).
- Коротаев А. Д., Тюменцев А. Н., Суховаров В. Ф. Дисперсное упрочнение тугоплавких металлов. - Новосибирск: Наука, 1989.
- Трефилов В. И., Моисеев В. Ф. Дисперсные частицы в тугоплавких металлах. - Киев: Наукова Думка, 1978. - С. 39-59.
- Гринберг Б.А., Иванов М.А. Интерметаллиды NiAl и TiAl: Микроструктура, деформационное поведение. - Екатеринбург: УРО РАН, 2002. - С. 350.
- Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: Академкнига, 2007. С. 398.
- Kuhlman-Wilsdorf D. The LES theory of solid plasticity. Dislocations in Solids, Ed. F.R.N.

- Nabarro, M. S. Duesbery, Elsevier Science, 2002, P. 213-335.
16. Ball A., Smallman R.E. The deformation properties and electron microscopy studies of the intermetallic compound NiAl. *Acta Metall.*, Volume 14, Issue 10, 1966, Pages 1349-1355.
  17. Nembach E. Order strengthening: recent developments, with special reference to aluminium-lithium-alloys // *Progress in Materials Science* 45 (2000) 275-338.
  18. R.Z. Valiev, A.P. Zhilyaev, T.G. Langdon. *Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications*. – John Wiley & Sons, Inc, 2014. – P. 456.
  19. Горбань В., Крапивка Н., Фирстов С. - Высокоэнтропийные сплавы - электронная концентрация - фазовый состав - параметр решетки – свойства//*Физика металлов и металловедение* - 2017г. №10 С.1017–1029.
  20. Y. Zhang, T. T. Zuo, Z. Tang ect. All. Microstructures and properties of high-entropy alloys // *Progress in Materials Science*, 2014. V.61 С. 1–12; 34-53.
  21. S. S. Nene, M. Frank, K. Liu, R. S. Mishra, B.A. McWilliams, K. C. Cho. Extremely high strength and work hardening ability in a metastable high entropy alloy// *Scientific Reports* 8 (2018) 9920 DOI:10.1038/s41598-018-28383-0
  22. Z. Cheng, H. Zhou, Q. Lu, H. Gao, L. Lu. Extra strengthening and work hardening in gradient nanotwinned metals., *Science* 362, eaau1925 (2018) DOI: 10.1126/science.aau1925

в) ресурсы сети Интернет:

1. Издательство «Юрайт» [Электронный ресурс] : электрон.-библиотечная система. – Электрон. дан. – М., 2013- . URL: <http://www.biblio-online.ru/>
2. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., 2000- . – URL: <http://elibrary.ru/defaultx.asp?>
3. Консультант Плюс [Электронный ресурс]: справ. правовая система. – Электрон. дан. – М., 1992- . – Доступ из локальной сети Науч. б-ки Том. гос. ун-та.
4. Гарант [Электронный ресурс] : информ.-правовое обеспечение / НПП «Гарант-Сервис». – Электрон. дан. – М., 2016. – Доступ из локальной сети Науч. б-ки Том. гос. ун-та.
5. ScienceDirect [Electronic resource] / Elsevier B.V. – Electronic data. – Amsterdam, Netherlands, 2016. – URL: <http://www.sciencedirect.com/>
6. SpringerLink [Electronic resource] / Springer International Publishing AG, Part of Springer Science+Business Media. – Electronic data. – Cham, Switzerland, [s. n.]. – URL: <http://link.springer.com/>
7. ProQuest Ebook Central [Electronic resource] / ProQuest LLC. – Electronic data. – Ann Arbor, MI, USA, [s. n.]. – URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tomskuniv-ebooks/home.action>

### 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 (GoogleDocs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

- Электронный каталог [Электронный ресурс] / НИ ТГУ, Научная библиотека ТГУ. – Электрон. дан. – Томск, 2008-2016. – URL: <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>
- Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ [Электронный ресурс] . – Электрон. дан. – Томск, 2011. – URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>
- ЭБС Издательство «Лань» [Электронный ресурс]:/ – Электрон. дан. – СПб., 2010. – URL: <http://e.lanbook.com/>

- ЭБС Консультант студента [Электронный ресурс] / ООО «Политехресурс». – М, 2012. – URL: <http://www.studentlibrary.ru/>
- Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>
- ЭБС Znanium.com [Электронный ресурс] / Научно-издательский центр Инфра-М.
- Электрон. дан. – М., 2012. – URL: <http://znanium.com/>
- ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>
- в) профессиональные базы данных:
  - Электронная библиотека учебников и учебно-методических пособий по материаловедению <http://www.materialscience.ru/subjects/materialovedenie/knigi/>

#### **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».

#### **15. Информация о разработчиках**

Панченко Елена Юрьевна, доктор физико-математических наук, доцент, кафедра физики металлов физического факультета ТГУ, профессор.

Коротаев Александр Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра физики металлов физического факультета ТГУ, профессор.