

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
Механико-математический факультет  
Кафедра инженерной механики и прикладной математики

**УТВЕРЖДАЮ**  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_/Ганиев Р.Ф./  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

**Наименование дисциплины (модуля):**

**Физические основы и модели пластической деформации  
и упрочнения металлов и сплавов**

---

*наименование дисциплины (модуля)*

**Уровень высшего образования:**  
*специалитет*

---

**Направление подготовки (специальность):**

***Фундаментальные математика и механика***

---

*(код и название направления/специальности)*

**Направленность (профиль) ОПОП:**

**Механика деформируемого твердого тела**

---

*(если дисциплина (модуль) относится к вариативной части программы)*

**Форма обучения:**

**очная**

---

*(очная, очно-заочная)*

Рабочая программа рассмотрена и одобрена  
на заседании кафедры инженерной механики и прикладной математики  
(протокол № \_\_\_\_\_, «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ года)

Москва 2022

Рабочая программа дисциплины (модуля) разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки / специальности « программы специалитета » (программы бакалавриата, магистратуры, реализуемых последовательно по схеме интегрированной подготовки; программы специалитета; программы магистратуры) в редакции приказа МГУ от 30 декабря 2016 г.

Год (годы) приема на обучение \_\_\_\_\_

1. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО (*относится к базовой или вариативной части ОПОП ВО, или является факультативом*).

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (если есть):

*Освоение следующих дисциплин:*

*Дифференциальные уравнения*

*Уравнения с частными производными*

*Основы механики сплошной среды*

3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников.

Компетенции выпускников (коды)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с компетенциями
<b>ОПК-1</b> Готовность использовать фундаментальные знания в области механики сплошной среды в будущей профессиональной деятельности	<b>Знать:</b> <i>Основные положения, основные модели и методы теории дислокаций.</i> <b>Уметь:</b> <i>Решать задачи о напряженно-деформируемом состоянии вблизи дислокаций. Использовать теорию дислокаций для определения пластической деформации твердых тел.</i>
<b>ПК-2</b> способность к самостоятельному анализу физических аспектов в классических постановках задач механики	<b>Знать:</b> <i>Знать основные модели механики деформируемого твердого тела и теории дислокаций.</i> <b>Уметь</b> <i>Правильно выбирать модели и постановки задач для рассматриваемых явлений.</i>

4. Формат обучения **очный**

5. Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., в том числе 36 академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 108 академических часов на самостоятельную работу обучающихся.

6. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),  Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) Виды контактной работы, часы			Самостоятельная работа обучающегося, часы <i>(виды самостоятельной работы – эссе, реферат, контрольная работа и пр. – указываются при необходимости)</i>
		Занятия лекционного типа*	Занятия семинарского типа*	Всего	
Тема 1. Введение. Структура металлов и сплавов на различных масштабных уровнях. Зерна и границы зерен. Дефекты кристаллической решетки. Вакансии, междоузлия, дислокации, дефекты упаковки. Механизмы пластической деформации металлов в различных процессах деформации. Обзор методов моделирования микроструктуры материала.	6	4	0	4	2
Тема 2. Дислокации. Виды дислокаций. Прямолинейная винтовая и краевая дислокация. Упругие поля перемещений, деформаций и напряжений. Собственная энергия.	2	2	0	2	2

Тема 3. Сила, действующая на дислокацию со стороны внешних напряжений. Сила Пича-Келера. Применение силы Пича-Келера для описания взаимодействия двух дислокационных сегментов. Взаимодействия краевых и винтовых дислокаций.	2	2	0	2	2
Тема 4. Зависимость скорости дислокаций от приложенного напряжения. Энергия движущейся дислокации. Движение дислокаций и пластическая деформация. Локальные напряжения вблизи движущихся дислокаций. Формула Орована.	4	2	0	2	2
Тема 5. Метод дискретных дислокаций в двумерной постановке. Система уравнений. Численные схемы интегрирования уравнений движения дислокаций. Практические занятия: поле напряжений от системы дислокаций. Расчет зависимости напряжения от деформации. Знакомство с открытым форматом VTK и средством визуализации Paraview.	8	2	2	4	4
Тема 6. Мультипольное разложение поля напряжения, создаваемого дислокационной линией. Использование мультипольного разложения для быстрого расчета напряжений от многих дислокаций.	8	2	2	4	4
Тема 7. Источники дислокаций. Источники Франка-Рида. Сила натяжения дислокационной линии. Размножение винтовых дислокаций посредством процесса поперечного скольжения (cross-slip). Гомогенное и гетерогенное зарождение дислокаций. Аннигиляция дислокаций.	8	4	0	4	4
Коллоквиум по темам 1–7	2				2
Тема 8. Постановка задачи теории упругости о динамике дискретных дислокации в теле конечного размера. Методы решения задачи. Пример:	8	2	2	4	2

решение упругой задачи методом конечных элементов.					
Тема 9. Поле напряжений, порождаемое криволинейной дислокацией. Поле напряжений прямого дислокационного сегмента.	4	2	0	2	2
Тема 10. Метод дискретных дислокаций линий в 3D. Обзор метода. Практические занятия: динамика дислокационной петли.	8	2	2	4	2
Тема 11. Обзор континуальных моделей дислокационной пластичности. Упрочнение металлов. Закон упрочнения Тейлора. Кристаллическая пластичность.	4	2	0	2	2
Тема 12. Описание границ зерен в металлах. Соотношение Холла-Петча. Скольжение и поворот зерен. Сверхпластичность. Взаимодействие дислокаций и границ зерен.	4	2	0	2	2
Промежуточная аттестация: экзамен	4				4
<b>Итого</b>	<b>72</b>			<b>36</b>	<b>36</b>

*\*Внимание! В таблице должно быть зафиксировано проведение текущего контроля успеваемости, который может быть реализован, например, в рамках занятий семинарского типа.*

*\*\* Часы, отводимые на проведение промежуточной аттестации, выделяются из часов самостоятельной работы обучающегося*

7. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю)

7.1. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

1. Коллоквиум по темам 1–7:

- 1.1. Перечислить параметры кристаллических решеток твердых тел и типы дефектов,
- 1.2. Сформулировать определение дислокации, плоскости скольжения и привести примеры процессов, происходящих с дислокациями, во время пластической деформации.
- 1.3. Сформулировать какие процессы пластической деформации характерны для различных скоростей деформации.
- 1.4. Записать выражение для поля напряжений от винтовой дислокации. Указать области, в которых компоненты тензора напряжений положительны и отрицательны.
- 1.5. Записать выражение для поля напряжений от краевой дислокации. Указать области, в которых компоненты тензора напряжений положительны и отрицательны.
- 1.6. Вывести выражение для силы Пича-Келера, действующей на дислокационный сегмент.
- 1.7. Описать зависимость скорости одиночной дислокации от приложенного сдвигового напряжения.
- 1.8. Вывести формулу Орована.
- 1.9. Алгоритм метода дискретных краевых дислокаций.
- 1.10. Основные положения метода мультипольного разложения для ускорения дискретно-дислокационных расчетов.
- 1.11. Источник Франка-Рида. Сила натяжения дислокационной линии.
- 1.12. Механизм двойного поперечного скольжения.
- 1.13. Зарождение дислокаций. Аппроксимации скорости зарождения дислокаций.

8.2. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

1. Список билетов к экзамену:

1. Кристаллические структуры в металлах. Дефекты в металлах. Плоскости скольжения. Дислокации. Виды дислокаций. Характеристики дислокаций. Свойства дислокаций. Основные механизмы деформации металлов в зависимости от скорости деформации.
2. Поле напряжений и перемещений, собственная энергия винтовой и краевой дислокаций.
3. Сила Пича-Келера. Вывод формулы для силы Пича-Келера. Применение силы Пича-Келера для взаимодействия двух прямолинейных дислокаций.
4. Скорость дислокации. Энергия движущейся дислокации. Поле напряжений винтовой и краевой дислокации, движущейся с постоянной скоростью. Связь между движением дислокаций и пластической деформацией. Формула Орована.

5. Кривая напряжения-деформация. Пластическая деформация. Предел упругости. Стадии упрочнения. Соотношение Холла-Петча и Тейлора.
6. Метод дискретных дислокаций. Основные положения метода. Уравнения движения дислокаций. Численные схемы.
7. Мультиполюсное разложение поля напряжения, создаваемого дислокацией. Метод быстрых мультиполей. Вычисление поля напряжений от системы краевых дислокаций.
8. Источники дислокаций. Источник Франка-Рида. Двойное поперечное скольжение. Гомогенное и гетерогенное зарождение дислокаций.
9. Поле напряжений, порождаемое криволинейной дислокацией. Поле напряжений, порождаемое прямым сегментом дислокации.
10. Основы метода дискретных дислокационных линий.
11. Обзор континуальных теорий дислокационной пластичности.
12. Зерна и границы зерен.

2. Защита результатов самостоятельной работы

<b>ШКАЛА И КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ результатов обучения (РО) по дисциплине (модулю)</b>				
Оценка	2	3	4	5
РО и соответствующие виды оценочных средств				
<b>Знания</b> (виды оценочных средств: устные и письменные опросы и контрольные работы, тесты, и т.п.)	Отсутствие знаний	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Сформированные систематические знания

<b>Умения</b> (виды оценочных средств: практические контрольные задания, написание и защита рефератов на заданную тему и т.п.)	Отсутствие умений	В целом успешное, но не систематическое умение	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение (допускает неточности не принципиального характера)	Успешное и систематическое умение
<b>Навыки (владения, опыт деятельности)</b> (виды оценочных средств: выполнение и защита курсовой работы, отчет по практике, отчет по НИР и т.п.)	Отсутствие навыков (владений, опыта)	Наличие отдельных навыков (наличие фрагментарного опыта)	В целом, сформированные навыки (владения), но используемые не в активной форме	Сформированные навыки (владения), применяемые при решении задач

#### 9. Ресурсное обеспечение:

- Перечень основной и дополнительной литературы:

Основная:

1. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. Атомиздат. 1972г. 600с.
2. Фридель Ж. Дислокации. Издательство МИР 1967 г. 642 с.
3. Судзуки Т., Есинага Х., Такеути С. Динамика дислокаций и пластичность. Москва «МИР» 1989 г., 296с.
4. Миркин Л.И. Физические основы прочности и пластичности 1968 г.
5. Bulatov V., Bulatov V. V., Cai W. Computer simulations of dislocations. – Oxford University Press, 2006.
6. Hull D., Bacon D.J., Introduction to dislocations. Butterworth-Heinemann 2001, 242p.
7. Косевич А.М. Динамическая теория дислокаций. Успехи физических наук 1964г, 4, 579-609.

Дополнительная:

8. Cai W. et al. A non-singular continuum theory of dislocations //Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2006. – Т. 54. – №. 3. – С. 561-587.

9. Van der Giessen E., Needleman A. Discrete dislocation plasticity: a simple planar model //Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. – 1995. – Т. 3. – №. 5. – С. 689.
10. Arsenlis A. et al. Enabling strain hardening simulations with dislocation dynamics //Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. – 2007. – Т. 15. – №. 6. – С. 553.
11. Krasnikov V. S., Mayer A. E. Influence of local stresses on motion of edge dislocation in aluminum //International Journal of Plasticity. – 2018. – Т. 101. – С. 170-187.

- Перечень лицензионного программного обеспечения (при необходимости):  
Не требуется.
- Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем:  
Не требуется.
- Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» (при необходимости):  
Электронная библиотека попечительского совета механико-математического факультета МГУ (<http://lib.mechmat.ru>)  
Библиотека кафедры инженерной механики и прикладной математики (<http://enmech.ru/education/library/>)
- Описание материально-технического обеспечения:
  - Аудитория
  - Доска
  - Мел
  - Экран
  - Проектор

10. Язык преподавания:  
Русский

11. Преподаватель (преподаватели):  
К.ф.-м.н. Брюханов Илья Александрович

12. Автор (авторы) программы:  
К.ф.-м.н. Брюханов Илья Александрович