

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

Физический факультет



УТВЕРЖДАЮ:  
Декан физического факультета

С.Н. Филимонов

2021 г.

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  
**2021**

Код дисциплины в учебном плане Б1.В.ДВ.01.07.18

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 проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий

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

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

– ИПК-1.1. Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования

– 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

## **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: 24 ч.;

– практические занятия: 24 ч.;

в том числе практическая подготовка: 24 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 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 10, выполнение заданий по материалам курса – 30. Контрольная точка проводится не менее одного раза в семестр.

## **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.

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 зачета с оценкой определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Итоговая оценка по дисциплине складывается из суммы баллов, полученной по итогам текущего контроля и промежуточной аттестации (устного зачет с оценкой) и согласуется с принятым соответствием с 5-ти балльной шкалой оценивания: 100-86 – «отлично»; 85-66 – «хорошо»; 65-50 – «удовлетворительно», менее 50 – «неудовлетворительно».

Каждый экзаменационный билет состоит из двух теоретических вопросов, относящихся к различным разделам дисциплины. К экзамену допускаются только студенты, успешно прошедшие текущую аттестацию.

Экзаменационный билет включает 2 вопроса из списка контрольных вопросов по курсу (приведен в разделе 11), проверяющих сформированность компетенции ПК-1 и ОПК-2 в соответствии с индикаторами ИПК-1.1 и ИОПК-2.2. Ответы даются в развернутой форме.

Пример экзаменационного билета:

### **БИЛЕТ № 1**

Вопрос 1. Кристаллографическая природа пластической деформации. Системы скольжения. Первичная и скрытие системы скольжения

Вопрос 2. Дисклинационные диполи. Сочетание сдвига и поворот решетки. Экспериментальное наблюдение дисклинаций. Локализация сдвига.

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. Назовите системы скольжения, наблюдаемые экспериментально в ГЦК, ОЦК и ГПУ металлах.

Вопрос 2. В чем заключается закон Боаса-Шмида?

Вопрос 3. Перечислите экспериментальные закономерности пластического течения на стадии легкого скольжения.

Вопрос 4. Запишите уравнение Орована.

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=22044>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

Перечень вопросов, выносимых на экзамен.

1. Кристаллографическая природа пластической деформации. Системы скольжения. Первичная и скрытые системы скольжения
2. Влияние кристаллографической ориентации монокристалла. Критическое приведенное напряжение сдвига при скольжении. Закон Боаса- Шмида.
3. Реализация макроскопического сдвига движением и размножением дислокаций. Напряжение Пайерлса.
4. Пересечение скользящей дислокацией и «леса» дислокаций. Расчет напряжения пересечения.
5. Важнейшие закономерности течения и особенности субструктуры кристаллов на I и II стадиях скольжения. Дислокационные модели и феноменологические теории упрочнения на II стадии скольжения.
6. III стадия скольжения. Явление динамического дислокационного возврата. Общие закономерности теории упрочнения. Как и почему энергия дефектов упаковки влияет на развитие III стадии скольжения.
7. Условия возможности использования модели пробной дислокации при анализе закономерностей упрочнения кристаллов. Подобие дислокационных структур на различных стадиях скольжения. Модель Кульман-Вильсдорф упрочнения на II, III стадиях деформации монокристаллов.
8. Термическая и атермическая компоненты напряжения течения. Термическая активация движения дислокаций в поле локальных препятствий. Экспериментальные методы определения энергии и объема активации движения дислокаций.
9. Диффузионное переползание дислокаций. Особенности термически активируемого течения в ковалентных кристаллах, металлических кристаллах с О.Ц.К. и Г.Ц.К. решетками.
10. Понятие дисклинаций. Частичные и полные дисклинации. Поле напряжения клиновой дисклинации.
11. Дисклинационные диполи. Сочетание сдвига и поворот решетки. Экспериментальное наблюдение дисклинаций. Локализация сдвига.
12. Теория упрочнения твердых растворов. Поле напряжений сферического включения.
13. Сегрегации примеси на дислокациях. Атмосферы Коттрелла, Снука, Дебая-Хюккеля и Судзуки.
14. Сверхдислокации в упорядоченных сплавах и интерметаллидах. Плоское и объемное расщепление дислокаций. Какие особенности движения дислокаций обуславливают аномальную зависимость механических свойств от температуры в интерметаллидах?
15. Дислокационные модели взаимодействия дислокаций с частицами атомно-упорядоченных фаз. Дислокационная модель Герольда-Хаберкорна и теория предела текучести в сплавах с упругими включениями вторичных фаз.
16. Теория предела текучести в сплавах с некогерентными частицами вторичных фаз.

Модель Орована.

17. Геометрически необходимые дислокации. Модель Эшби образования призматических петель дислокаций на недеформируемой частице («выдаввливание» призматических петель).
18. Основные принципы создания современных высокопрочных материалов.

в) План семинарских / практических занятий по дисциплине.

1. Стереографическая проекция кубических кристаллов. Анализ напряженности скрытых систем скольжения. Зависимость коэффициента упрочнения от ориентации кристалла.
2. Скольжение по скрытым системам и образование дислокационных барьеров.
3. Релаксация напряжений плоских скоплений. Формирование ячеистых дислокационных структур.
4. Явление динамического дислокационного возврата. Полосовые структуры. Разориентированные ячеистые структуры. Фрагментация кристаллов.
5. Критический анализ дислокационных моделей и феноменологических теорий упрочнения на II стадии скольжения ГЦК кристаллов.
6. Термически-активируемое движение дислокаций. Экспериментальное определение энергии и объема активации.
7. Экспериментальное наблюдение дисклинаций. Локализация сдвига.
8. Сегрегации примеси на дислокациях (атмосферы Коттрелла, Снука, Дебая-Хюккеля и Сузуки).
9. Механизмы закрепления сверхдислокаций Флинна, Кира, Витека в интерметаллидах.
10. Зависимость энергии антифазных границ в  $L_{12}$  сверхструктуре от параметра порядка. Экспериментальное наблюдение антифазных границ.
11. Анализ дислокационных моделей и экспериментальных исследований температурной зависимости предела текучести кристаллов со сверхструктурой B2 различных ориентации.
12. Дислокационная модель Герольда-Хаберкорна и теория предела текучести в сплавах с упругими включениями вторичных фаз.
13. Структура и особенности пластической деформации высокоэнтропийных сплавов
14. Геометрически необходимые дислокации. Дислокационная модель Эшби.
15. Особенности пластической деформации поликристаллических 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.*
4. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. - М: Атомиздат, 1972. - Гл. 9, 15, 19, 20, 21, 22.

5. Бернер Р., Кронмюллер Т. Пластическая деформация монокристаллов. - М.: Металлургия, 1969. - С. 272.
6. 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.
7. Kuhlman-Wilsdorf D. Theory of plastic deformation properties of low energy dislocation structures // Mater. Sci. and Eng. - 1989.-V. A 113.-P. 1-41.
8. Малыгин Г. А. Процессы самоорганизации дислокаций и пластичность кристаллов. УФН, 1999. - Т. 169 - № 9. - С. 979-1010. 8.
9. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. - М.: Металлургия, 1986. - С. 9-61.
10. Владимиров В. И., Романов А. Е. Дисклинации в кристаллах. - Л.: Наука, 1986. - С. 13-36.51-72,83-95.
11. 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.
12. Мартин Дж. Микромеханизмы дисперсного твердения. - М.: Металлургия. ; Физическая мезомеханика, 1998. - Т. I. № I. - С. 3-35.

б) дополнительная литература:

1. Набарро Ф. Р. Н., Базинский З. С, Холт Д. Б. Пластичность чистых монокристаллов. -М.: Металлургия, 1967. - Гл. I, III, IV
2. Мильман Ю. В., Трефилов В. И., Фирстов С. А. Физические основы прочности тугоплавких металлов. - Киев: Наукова Думка, 1975. - С. 316.
3. Клэрборо Л. М., Харгривс М. Е. Упрочнение металлов. // Успехи физики металлов. Т. 5.-М.: Металлургия, 1976. - С. 7-126.
4. Орлов А. Н., Перевезенцев В. Н., Рыбин В. В., Границы зерен в металлах -М.: Металлургия, 1980. - С. 5-52.
5. Хирш П. Распределение дислокаций и механизмы упрочнения в металлах. Структура и механические свойства в металлах. - М.: Металлургия, 1967. - С.42-75.
6. Физика деформационного упрочнения монокристаллов. - Киев: Наукова Думка, 1972.
7. Steeds J. V. Dislocation arrangement in copper single crystals as function of strain // S&Proc. Roy. Soc. -1966. - V. 292. - 1430. - P. 343.
8. 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. Elsever Science, V. 11. 2002. P. 343
9. 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).
10. 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).
11. Коротчаев А. Д., Тюменцев А. Н., Суховаров В. Ф. Дисперсное упрочнение тугоплавких металлов. - Новосибирск: Наука, 1989.
12. Трефилов В. И., Моисеев В. Ф. Дисперсные частицы в тугоплавких металлах. - Киев: Наукова Думка, 1978. - С. 39-59.
13. Гринберг Б.А., Иванов М.А. Интерметаллиды NiAl и TiAl: Микроструктура, деформационное поведение. - Екатеринбург: УРО РАН, 2002. - С. 350.
14. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: Академкнига, 2007. С. 398.
15. Kuhlman-Wilsdorf D. The LES theory of solid plasticity. Dislocations in Solids, Ed. F.R.N. Nabarro, M. S. Duesbery, Elsever 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); системы компьютерной вёрстки LaTeX; системы компьютерной алгебры Wolfram Mathematica, Waterloo Maple;

– 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?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/>
- 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 практических занятий, 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.

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