

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем сверхпластичности металлов  
Российской академии наук**

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ИПСМ РАН

Р.Р. Мулюков

2015 г.



**Рабочая программа учебной дисциплины  
«Прочность и пластичность материалов»**

Составлена для аспирантов ИПСМ РАН, обучающихся по направлению подготовки 22.06.01  
«Технологии материалов», профиль 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка  
металлов и сплавов»

Форма обучения

очная

Составители

с.н.с., к.т.н., доцент по спец.

с.н.с., к.ф-м.н

М.А. Мурзинова

О.Ш. Ситдииков

Программа обсуждена и одобрена на заседании ученого совета ИПСМ РАН,  
протокол № 11-15 от 02 июля 2015 г.

Уфа 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Цель и задачи курса .....	3
1.1. Цель и задачи изучения дисциплины .....	3
1.2. Основные задачи изучения дисциплины.....	3
1.3. Компетенции, формируемые дисциплиной.....	3
2. Место дисциплины в учебном процессе .....	4
3. Объем дисциплины и виды учебной работы .....	4
4. Содержание дисциплины .....	4
4.1. Разделы дисциплины, трудоемкость (в часах) по видам занятий.....	4
4.2. Содержание разделов дисциплины .....	5
4.3. Самостоятельная работа .....	5
5. Текущая и промежуточная аттестация. Фонд оценочных средств.....	6
5.1. Организация текущего контроля освоения материала .....	6
5.2. Промежуточная аттестация .....	9
6. Материальное обеспечение дисциплины .....	11
7. Учебная литература для самостоятельной работы .....	11
7.1. Основная литература.....	11
7.2. Дополнительная литература .....	11

## Введение

Настоящая учебная программа составлена в соответствии с Федеральным законом «Об образовании в Российской Федерации» от 29.12.2012 г. № 273-ФЗ, Приказом Министерства образования и науки РФ от 19.11.2013 №1259 «Об утверждении Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре)», федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 22.06.01 «Технологии материалов» (уровень подготовки кадров высшей квалификации), утвержденным приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 30 июля 2014 г. N 888, с изменениями, утвержденными Приказом Минобрнауки России от 30.04.2015 г. № 464 «О внесении изменений в федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации)», паспортом специальности 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов», Уставом ИПСМ и положениями, регламентирующими работу аспирантуры ИПСМ РАН.

### 1. Цель и задачи изучения дисциплины

**1.1. Цель изучения дисциплины** – формирование у аспирантов углубленных знаний о развитии деформации и разрушения металлов и сплавов; о закономерностях влияния химического, фазового состава, структуры, а также различных внешних воздействий на механические свойства металлов и сплавов.

#### 1.2. Основные задачи изучения дисциплины

- формирование представлений о закономерностях развития деформации и разрушения металлов;
- формирование представлений о взаимосвязи механических свойств металлов и сплавов с их структурой (кристаллическим строением, фазовым составом, особенностями дислокационного строения и др.);

*В результате изучения дисциплины аспирант должен знать:*

- основные закономерности пластического течения и разрушения металлических материалов, особенности развития деформации и разрушения в зависимости от природы сплава и условий нагружения;
- принципы создания новых металлических материалов с повышенными технологическими свойствами и эксплуатационной надежностью.

*Аспирант должен уметь:*

- применять знания по физике прочности и пластичности для анализа механических свойств металлов и сплавов;
- прогнозировать влияние особенностей структуры материала на его механические характеристики;
- использовать передовые отечественные и зарубежные достижения в области физики прочности и пластичности при проведении научных исследований.

*Аспирант должен приобрести навыки:*

- использования современных методов исследования и анализа механических свойств металлов и сплавов в исследовательской работе.

#### 1.3. Компетенции, формируемые дисциплиной:

Дисциплина участвует в формировании следующих компетенций:

**универсальных -**

– способности к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);

**общепрофессиональных –**

– способности выбирать приборы, датчики и оборудование для проведения экспериментов и регистрации их результатов (ОПК-10);

**профессиональных -**

– способности использовать знания и передовые отечественные и зарубежные достижения в области металловедения и термической обработки металлов и сплавов при проведении экспериментальных и расчетно-теоретических научных исследований, нацеленных на разработку перспективных материалов и технологических процессов, обеспечивающих получение полуфабрикатов и деталей с улучшенными физико-механическими свойствами (ПК-1).

## 2. Место дисциплины в учебном процессе

Дисциплина «Прочность и пластичность материалов» преподается во 2-й год обучения аспиранта и относится к дисциплинам вариативной части для профиля 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов», изучаемым по выбору аспиранта.

Данная дисциплина базируется на знании разделов дисциплины «Материаловедение и технологии современных и перспективных материалов», которая входит в программы первых двух уровней высшего образования по направлению «Материаловедение и технологии материалов» (150100), а именно: кристаллография и дефекты кристаллического строения, теория термической обработки металлов, деформация и разрушение материалов.

Знания, умения и навыки, приобретенные в результате изучения дисциплины «Прочность и пластичность материалов», используются в научно-исследовательской работе аспиранта и подготовке диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

## 3. Объем дисциплины и виды учебной работы

Вид учебной работы	Всего часов / зачетных единиц	Год
		2
Общая трудоемкость дисциплины	108 / 3	108
Аудиторные занятия	36 / 1	36
Семинары	36 / 1	36
Самостоятельная работа	72 / 2	72
Вид итогового контроля		зачет

## 4. Содержание дисциплины

### 4.1. Разделы дисциплины, трудоемкость (в часах) по видам занятий

№	Название раздела	Всего часов	Аудиторные часы			Самостоятельная работа
			Лекции	Семинары	Практические	

					занятия	
1	Напряжение и деформация. Упругая и пластическая деформация. Явления неупругости. Деформация при знакопеременной нагрузке.	22		8		14
2	Кристаллографическая природа пластической деформации. Особенности деформации монокристаллов.	21		8		13
3	Низкотемпературная деформация поликристаллов.	23		8		15
4	Высокотемпературная деформация поликристаллов.	22		8		14
5	Теория высокопрочного состояния металлов и сплавов	20		4		16
	Итого	108		36		72

## 4.2. Содержание разделов дисциплины

*1. Напряжение и деформация. Упругая и пластическая деформация. Явления неупругости. Деформация при знакопеременной нагрузке.*

Базовые определения. Определение условных и истинных деформаций и напряжений. Закон Гука. Неупругость. Упругое последствие и релаксация напряжений. Особенности поведения металлов и сплавов при малых знакопеременных нагрузках.

*2. Кристаллографическая природа пластической деформации. Особенности деформации монокристаллов.*

Пластическая деформация как результат движения дислокаций. Движение дислокаций в поле напряжений. Скорость движения дислокаций. Преимущественные системы скольжения в металлах с г.д.к., г.п.у. и о.д.к. решеткой. Закон Шмида—Боаса. Критическое напряжение сдвига. Стадии деформации монокристалла. Эволюция дислокационной структуры при деформации монокристалла. Факторы, влияющие на критическое напряжение сдвига и деформационное упрочнение.

*3. Низкотемпературная деформация поликристаллов.*

Зарождение и развитие пластической деформации в поликристаллах. Формирование и распространения полос Людерса — Чернова. Неоднородность и совместность пластической деформации кристаллов. Критерий Мизеса. Ориентационные факторы Закса и Тейлора. Взаимодействие границ зерен с решеточными дислокациями. Передача скольжения от зерна к зерну. Соотношение Холла-Петча. Дислокационное и субструктурное упрочнение.

*4. Высокотемпературная деформация поликристаллов.*

Влияние температуры и скорости испытаний на развитие пластической деформации металлов и сплавов. Пластическое течение как кинетический процесс. Связь механизмов деформации с процессами, протекающими на атомарном уровне. Феноменологические зависимости и активационные параметры пластической деформации. Микроструктурные изменения при горячей деформации. Особенности деформации при пассивном нагружении. Пластическое течение, контролируемое неконсервативным движением дислокаций. Зернограничное проскальзывание.

*5. Теория высокопрочного состояния.*

Эволюция дислокационной структуры при деформации поликристаллов. Влияние дислокационной структуры на упрочнение материала. Упрочнение атмосферами примесей и легирующих элементов. Твердорастворное упрочнение. Взаимодействие между дислокациями и частицами вторых фаз. Предел текучести в материалах с различным типом упрочнения.

Суперпозиция механизмов упрочнения. Эффективность различных механизмов упрочнения при повышенных температурах.

### 4.3. Самостоятельная работа

В курсе запланировано 72 часа на самостоятельную работу аспирантов, которая включает в себя самостоятельную проработку и расширенное изучение материала, систематизацию, закрепление знаний, выполнение заданий и подготовку к сдаче зачета.

## 5. Текущая и промежуточная аттестация. Фонд оценочных средств

### 5.1. Организация текущего контроля освоения материала

Текущий контроль знаний по дисциплине «Прочность и пластичность материалов» осуществляется путем:

- устных обсуждений на семинарских занятиях конспектов, подготовленных аспирантом самостоятельно по каждому из разделов (подразделов) дисциплины;
- письменных опросов по теме соответствующего раздела с использованием вопросов для текущего контроля;
- обсуждения с аспирантом задания, направленного на проверку сформированности компетенций при изучении дисциплины.

Объектами оценки при текущем контроле выступают:

- учебная дисциплина: посещаемость занятий, своевременность выполнения различных видов заданий, активность на занятиях;
- степень усвоения теоретических знаний;
- степень сформированности компетенций.

*Примерный перечень вопросов для подготовки аспирантов к текущему контролю теоретических знаний*

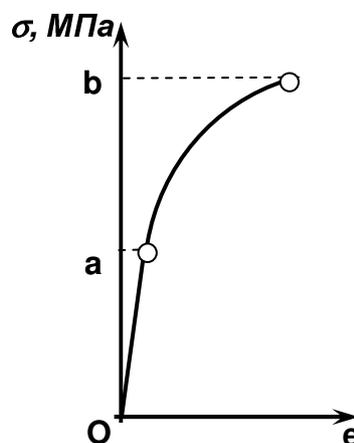
1. Что понимают под прочностью и пластичностью твердых тел? Дайте определение понятиям «деформация» и «напряжение».

2. Как определить величины условной и истинной пластической деформации, условного и истинного напряжения при растяжении цилиндрического стержня? Поясните с использованием схематического изображения экспериментальной кривой.

3. Какова природа упругой деформации? Сформулируйте закон Гука.

4. Что характеризуют упругие модули? Какие факторы оказывают влияние на величину упругих модулей?

5. На рисунке приведена зависимость «истинное напряжение – истинная деформация», полученная при испытаниях материала на растяжение. Выполните необходимые графические построения и определите величину упругой и пластической деформации, при напряжении  $\sigma < a$ ; при напряжении  $a < \sigma < b$ . Как изменяется величина упругой деформации с ростом  $e$ .



6. Какое явление называют прямым упругим последствием? Поясните, изобразив схему.

Какое явление называют обратным упругим последствием? Поясните, изобразив схему. Какое явление называют релаксацией напряжений? Поясните, изобразив схему. В чем заключается эффект Баушингера? Поясните, изобразив схему. Какое свойство твердых тел называют «внутренним трением»?

7. По каким кристаллографическим направлениям, и в каких кристаллографических плоскостях наиболее часто развивается скольжение в кристаллах? Почему? Дайте определение системы скольжения.

8. Назовите основные системы скольжения в ГЦК кристаллах. Изобразите одну из плоскостей скольжения и одно направление скольжения, лежащее в данной плоскости. Укажите индексы Миллера, изображенных Вами плоскости и направления. Докажите аналитически, что данное направление лежит в данной плоскости.

9. Назовите основные системы скольжения в ОЦК кристаллах. Изобразите одну из плоскостей скольжения и одно направление скольжения, лежащее в данной плоскости. Укажите индексы Миллера, изображенных Вами плоскости и направления. Докажите аналитически, что данное направление лежит в данной плоскости?

10. Назовите основные системы скольжения в ГПУ кристаллах. Изобразите одну из плоскостей скольжения и одно направление скольжения, лежащее в этой плоскости. Укажите индексы Миллера, изображенных Вами плоскости и направления. Докажите аналитически, что данное направление лежит в данной плоскости.

11. Экспериментально установлено, что в монокристалле металла **A** одиночное скольжение развивалось по плоскости  $(1\bar{1}0)$  в направлении  $[111]$ . Изобразите эту систему скольжения. Какую из кубических кристаллических решеток может иметь металл **A**? Докажите аналитически, что направление  $[111]$  лежит в плоскости  $(1\bar{1}0)$ .

12. Экспериментально установлено, что в монокристалле металла **B** одиночное скольжение развивалось по плоскости  $(12\bar{1})$  в направлении  $[\bar{1}11]$ . Изобразите эту систему скольжения. Какую из кубических кристаллических решеток может иметь металл **B**? Докажите аналитически, что направление  $[\bar{1}11]$  лежит в плоскости  $(12\bar{1})$ .

13. Экспериментально установлено, что в ГПУ монокристалле металла **C** одиночное скольжение развивалось по плоскости  $(0001)$  в направлении  $[\bar{1}2\bar{1}0]$ . Изобразите эту систему скольжения. Выберите верный вариант ответа: 1) в решетке металла **C** соотношение осей  $\frac{c}{a} > 1.63$ ; 2) в решетке металла **C** соотношение осей  $\frac{c}{a} < 1.63$ .

14. Экспериментально установлено, что в ГПУ монокристалле металла **D** одиночное скольжение развивалось по плоскости  $(10\bar{1}0)$  в направлении  $[\bar{1}2\bar{1}0]$ . Изобразите эту систему скольжения. Выберите верный вариант ответа: 1) в решетке металла **C** соотношение осей  $\frac{c}{a} > 1.63$ ; 2) в решетке металла **C** соотношение осей  $\frac{c}{a} < 1.63$ .

15. Охарактеризуйте процесс пластической деформации как результат движения дислокаций в поле приложенных напряжений.

16. Приведите уравнение Орована. Степень и скорость пластической деформации. Факторы, определяющие сопротивление движению дислокаций.

17. Сформулируйте закон Шмида-Боаса. При каких условиях скольжение по плоскости развиваться не может?

18. Какое напряжение называют приведенным касательным напряжением? Зависит ли величина приведенного касательного напряжения сдвига от действующей плоскости скольжения? Как изменяется величина приведенного касательного напряжения сдвига с увеличением содержания легирующих элементов в твердом растворе? Как изменяется величина приведенного касательного напряжения сдвига с повышением температуры испытаний?

19. Изобразите типичную кривую деформации монокристалла, который изначально ориентирован для одиночного скольжения. Какую величину называют коэффициентом

деформационного упрочнения? Как изменяется величина коэффициента деформационного упрочнения при переходе от первой ко второй и третьей стадиям деформации монокристалла?

20. Изобразите типичную кривую деформации монокристалла, который изначально ориентирован для одиночного скольжения. Какова дислокационная структура и величина плотности дислокаций на различных стадиях деформации?

21. Как зарождается и развивается пластическая деформация в поликристаллах? Как происходит передача скольжения от зерна к зерну на стадии микропластической деформации? Как формируются и распространяются полосы Людерса—Чернова в поликристалле?

22. Изобразите кривую «напряжение-деформация» с «зубом текучести». Укажите «площадку текучести», верхний и нижний пределы текучести? В чем основное различие кривых с «зубом текучести» и без «зуба текучести»? Какова природа «зуба текучести» и условия его появления?

23. С чем связана неоднородность пластической деформации поликристаллов?

24. Почему соседние зерна в поликристаллических агрегатах должны деформироваться совместно? Каковы основные предпосылки и критерии оценки совместности пластической деформации, согласно теории Мизеса?

25. Что характеризуют ориентационные факторы Тейлора и Закса? Каковы основные предпосылки и ограничения моделей Тейлора и Закса?

26. В чем заключается типичное отличие кривых напряжение-деформация для поликристалла и монокристалла? Каковы основные особенности формирования субструктуры в процессе деформации поликристалла?

27. Что понимают под металлографической и кристаллографической текстурой? С чем связано формирование кристаллографической текстуры при деформации? От чего зависит вид кристаллографической текстуры, формирующейся при деформации?

28. Как можно описать кристаллографическую текстуру?

29. Какова роль границ зерен в упрочнении поликристаллического материала? Как изменяется величина упрочнения при изменении размера зерна? Как отражена эта зависимость в уравнении Холла-Петча?

30. Охарактеризуйте основные физические модели, описывающие зернограничное упрочнение.

31. Как влияют дислокации/дислокационные скопления на прочность деформируемого материала? Каково соотношение между величиной упрочнения и плотностью решеточных дислокаций?

32. Как влияет формирование ячеистой/субзеренной структуры на упрочнение материала?

33. Как влияет повышение температуры деформации на упругие напряжения материала? Как влияют температура и скорость пластической деформации на уровень напряжений течения, предел текучести, коэффициент деформационного упрочнения чистых металлов?

34. Что понимается под элементарным актом пластической деформации? Схематически изобразите потенциальный барьер для движения дислокации вблизи препятствия. При каком условии становится возможным преодоление этого барьера, если дислокация движется только под действием приложенных напряжений? Как повлияет термическая активация на частоту и вероятность преодоления потенциального барьера?

35. Какие основные механизмы пластического течения, связанные с движением дислокаций и вакансий, можно условно выделить? Каковы основные особенности этих процессов при низких и повышенных температурах?

36. Какие основные механизмы деформации могут контролировать скорость высокотемпературной деформации? Охарактеризуйте эти механизмы с точки зрения их формального описания (величин  $n$  и  $Q$ ) по карте механизмов деформации.

37. Приведите основные формулы и опишите (изобразите графически) экспериментальные проявления низкотемпературной ползучести.

38. Каковы основные положения моделей диффузионной ползучести Набарро-Херринга и Кобла?

39. Опишите экспериментальные проявления и основные закономерности процесса

зернограничного проскальзывания.

40. Каковы методы изучения зернограничного проскальзывания, классификация, вклад в деформацию?

41. Какие микроструктурные явления сопровождают горячую деформацию? Каковы особенности взаимодействия границ зерен с дислокациями при высоких температурах? Миграция границ зерен. Рекристаллизация.

42. Какие эмпирические выражения устанавливают связь между макроскопическими параметрами пластической деформации (напряжение течения  $\sigma$ , скорость деформации  $\dot{\epsilon}$ , температура  $T$ )? Как экспериментально определить энергию активации пластической деформации при реализации степенного закона пластической деформации?

43. Каково принципиальное различие между дисперсным и дисперсионным твердением? Каковы основные механизмы упрочнения когерентными и некогерентными частицами?

44. Опишите, как происходит преодоление препятствий (частиц) посредством их огибания дислокациями (механизм Орована).

45. Какие основные факторы вызывают упрочнение материала при «перерезании» когерентных частиц решеточными дислокациями?

46. Каковы основные структурные факторы, обеспечивающие упрочнение материала? Охарактеризуйте. Какие виды упрочнения определяют предел текучести в материалах (суперпозиция механизмов упрочнения)?

47. Какова эффективность различных механизмов упрочнения при повышенных температурах?

#### *Задание для оценки степени сформированности компетенций*

Для демонстрации степени сформированности компетенций при изучении дисциплины аспирант самостоятельно выполняет задание следующего содержания.

1. Письменный критический анализ одной из научных статей, в которой рассматривается влияние структуры материала на его механические свойства. В этом анализе необходимо отразить:

1.1. Насколько актуальна задача, поставленная авторами статьи. Для обоснования своего мнения привести описание состояния исследований и нерешенных задач по данной проблеме (УК-1).

1.2. Насколько подробно описаны в статье методы исследования механических свойств. Самостоятельно рассмотреть и описать возможности и ограничения предлагаемых методов исследования механических свойств и используемого оборудования (ОПК-10).

1.3. Насколько полно и достоверно в статье описаны результаты. Отметить те результаты, которые вызвали сомнение, объяснить почему (УК-1).

1.4. Дать свои предложения о возможностях дальнейшего развития исследований по данной теме (ПК-1).

2. По результатам проделанного анализа подготовить презентацию и представить ее на учебном семинаре (продолжительность выступления 10-15 мин.).

#### *Примечания.*

1. Желательно, чтобы статья, выбранная аспирантом для критического анализа, соответствовала тематике диссертационной работы аспиранта.

2. По выбору аспиранта задание, описанное в п.1, может быть заменено на выступление аспиранта с устной презентацией статьи, в которой он сам является соавтором. При этом в докладе подробно освещается актуальность выполненного исследования (УК-1) и методика исследования механических свойств (получение первичных данных и алгоритм их обработки), дается характеристика использованного оборудования, отмечаются возможности и ограничения выбранной методики.

## **5.2. Промежуточная аттестация**

Промежуточная аттестация осуществляется с целью выявления степени освоения

аспирантом теоретических знаний по дисциплине. Промежуточная аттестация проводится в форме зачета в конце 4-го семестра.

Обучающийся допускается к зачету в случае выполнения всех учебных заданий, предусмотренных настоящей программой. В случае учебной задолженности (пропущенных занятий и (или) неудовлетворительных ответов при письменном опросе) аспирант допускается к зачету, если подготовит конспект с ответами на вопросы для текущего контроля по темам соответствующих разделов и завизирует его у научного руководителя диссертационной работы. При несвоевременном выполнении Задания для оценки степени сформированности компетенций аспирант допускается к зачету, если выступит с указанной презентацией на семинаре института или лаборатории и предоставит выписку из протокола семинара.

*Зачет* проводится в письменно-устной форме. Аспиранту выдается задание в виде двух вопросов из приведенного ниже перечня. Зачет проводится в аудитории, время на написание и подготовку к ответам 60 минут.

Оценка «зачтено» выставляется при правильном и достаточно полном ответе, правильно использующем специальную терминологию, и умении отвечать на дополнительные вопросы, непосредственно связанные с темой билета. При этом могут допускаться ошибки не принципиального характера.

Оценка «не зачтено» выставляется при недостаточно полном ответе, при неправильном использовании специальной терминологии, неумении отвечать на дополнительные вопросы, непосредственно связанные с темой билета, при наличии в ответе ошибок принципиального характера.

Получение зачета является необходимым условием аттестации аспиранта за второй год обучения.

*Перечень вопросов для подготовки аспирантов к промежуточной аттестации по дисциплине.*

1. Что понимают под прочностью и пластичностью твердых тел? Дайте определение понятиям «деформация» и «напряжение». Условная и истинная деформация; условное и истинное напряжение (методика оценки при растяжении цилиндрического стержня).

2. Охарактеризуйте особенности развития деформации при приложении малых знакопеременных нагрузок.

3. Упругие модули. Факторы, оказывающие влияние на величину упругих модулей.

4. Представление о системах скольжения. Системы скольжения в ГЦК, ОЦК, и ГПУ кристаллах. Напряжение Пайерлса – Набарро.

5. Закон Шмида-Боаса. Условия развития скольжения (в соответствии с законом Шмида-Боаса). Приведенное касательное напряжение, приведенное критическое напряжение сдвига. Факторы, влияющие на величину приведенного критического напряжения.

6. Развитие деформации монокристалла, который изначально ориентирован для одиночного скольжения. Коэффициент деформационного упрочнения. Изменение коэффициента деформационного упрочнения и эволюция дислокационной структуры на различных стадиях деформации монокристалла.

7. Пластическая деформация поликристаллов. Микропластичность. Зарождение и развитие пластической деформации в поликристаллах. Формирование и распространение полос Людерса—Чернова в поликристалле.

8. Природа «зуба текучести» и условия его появления. Условный предел текучести.

9. Неоднородность и совместность развитой пластической деформации поликристаллов. Основные предпосылки и критерии оценки совместности пластической деформации.

10. Факторы Закса и Тейлора. Основные предпосылки и ограничения моделей Закса и Тейлора.

11. Металлографическая и кристаллографическая текстура. Факторы, определяющие вид текстуры, формирующейся при деформации. Описание кристаллографической текстуры. Основные типы деформационных текстур и их роль в формировании комплекса механических

свойств (упрочнении) материала.

12. Элементарные акты пластической деформации. Потенциальный барьер для движения дислокации. Частота и вероятность преодоления потенциального барьера при термической активации скольжения.

13. Влияние температуры и скорости пластической деформации на предел текучести, коэффициент деформационного упрочнения, уровень напряжений течения чистых металлов. Особенности влияния температуры на напряжения течения материалов с разным типом кристаллической решетки.

14. Диаграммы механизмов деформации. Связь между напряжением течения, температурой и скоростью деформации. Связь механизмов деформации с процессами, протекающими на атомарном уровне. Активационные параметры пластической деформации.

15. Высокотемпературная деформация. Динамический возврат и динамическая рекристаллизация.

16. Особенности деформации при постоянной нагрузке или постоянном приложенном напряжении. Диффузионный массоперенос в поле приложенных напряжений. Модели Кобла и Набарро - Херринга.

17. Специфические механизмы деформации поликристаллов. Экспериментальные проявления и основные закономерности процессов зернограничного проскальзывания. Роль зернограничного проскальзывания в сверхпластической деформации мелкозернистых материалов.

18. Взаимодействие решеточных дислокаций с границами зерен. Уравнение Холла-Петча. Основные физические модели, описывающие зернограничное упрочнение.

19. Влияние дислокаций/дислокационных скоплений на прочность деформируемого материала. Соотношение между величиной упрочнения и плотностью решеточных дислокаций. Соотношение между параметрами ячеистой/субзеренной структуры и упрочнением материала.

20. Повышение прочности при легировании сплавов матричного типа. Твердорастворное упрочнение. Взаимодействие дислокаций с когерентными и некогерентными частицами. Дисперсное и дисперсионное твердение.

21. Суперпозиция механизмов упрочнения, обеспечивающих достижение высокопрочного состояния в материале, не подверженном полиморфному превращению. Эффективность различных механизмов упрочнения при повышении температуры.

## **6. Материальное обеспечение дисциплины**

Для проведения занятий используется аудитория, оснащенная компьютером, проектором и экраном.

## **7. Учебная литература для самостоятельной работы**

### **7.1. Основная литература**

1. Штремель М.А. Прочность сплавов. Часть 2. Деформация. - М.: МИСИС, 1997. 527с.
2. Трефилов В.И., Моисеев В.Ф., Печковский Э.П., Горная И.Д., Васильев А.Д. и др. Под ред. Трефилова В.И. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов. 2-е изд. перераб. и доп. – Киев: Наук. Думка, 1989. 256 с.
3. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. - М.: Мир. 1972. - 408 с.
4. Полухин П. И., Горелик С. С., Воронцов В. К. Физические основы пластической деформации. - М. : Металлургия, 1982. - 584 с.

### **7.2. Дополнительная литература**

1. Новиков И.И., Розин К.М. Кристаллография и дефекты кристаллической решетки. - М.: Металлургия, 1990. - 335 с.
2. Штремель М.А. Прочность сплавов. Часть 1. Дефекты решетки. - М: МИСИС, 1999. - 383 с.

3. Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения. М. Бинوم. Лаборатория знаний, 2009. - 400 с.
4. Жияев А.П., Пшеничнюк А.И. Сверхпластичность и границы зерен в ультрамелкозернистых материалах., М., Физматлит, 2008, с. 320.
5. Пуарье Ж.-П. Ползучесть кристаллов. Механизмы деформации металлов, керамики и минералов при высоких температурах. - М.: Мир, 1988. - 287 с.