

**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  
«Деформационные методы получения мелкозернистых и ультрамелкозернистых  
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

Составитель:

гл. науч. сотр., д.т.н.

Ф.З. Утяшев

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 РАН 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, закономерностях её влияния на химическое, фазовое и зеренное строение металлических материалов, о физических основах и технологических аспектах применения деформационных методов получения ультрамелкозернистых, в том числе наноструктурных, материалов.

#### 1.2. Основные задачи изучения дисциплины

*В результате изучения дисциплины аспирант должен знать:*

- теоретические основы деформационного измельчения зерен в металлах и сплавах, основные методы интенсивной пластической деформации;
- роль механизмов деформации и дефектов в кристаллической структуре в измельчении зерен, влияние условий деформации на формирование ультрамелкозернистой структуры.
- влияние природы материала, исходной структуры и условий деформации на пластические свойства материала и на особенности формирования ультрамелкозернистой структуры.

*Аспирант должен уметь:*

- использовать знания о структурных изменениях в металлических материалах при термообработке и обработке давлением металлов и сплавов;
- осуществлять расчет и проектирование заготовок инструмента, операций, переходов, проходов, режимов деформационных методов подготовки УМЗ структуры в металлах и сплавах;
- использовать передовые отечественные и зарубежные достижения в области деформационных методов измельчения зерен в металлах и сплавах.

*Аспирант должен приобрести навыки:*

- проведения экспериментальных и расчетно-теоретических исследований, нацеленных на разработку перспективных материалов и технологических процессов, обеспечивающих получение УМЗ полуфабрикатов и деталей с улучшенными физико-механическими свойствами;
- проектирования заготовок для деформационной обработки с целью получения УМЗ полуфабрикатов;
- разработки технических требований на проектирование специализированного инструмента или выбор универсального инструмента, назначения режимов деформации, оформления конструкторско-технологической документации.

### 1.3. Компетенции, формируемые дисциплиной:

Дисциплина участвует в формировании следующих компетенций:

#### **общепрофессиональных –**

–способности и готовности разрабатывать технологический процесс, технологическую оснастку, рабочую документацию, маршрутные и операционные технологические карты для изготовления новых изделий из перспективных материалов (ОПК-11);

–способности и готовности участвовать в проведении технологических экспериментов, осуществлять технологический контроль при производстве материалов и изделий (ОПК-12);

#### **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 «Деформационные методы получения мелкозернистых и ультрамелкозернистых 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», а именно: кристаллография и дефекты кристаллического строения, теория термической обработки металлов, деформация и разрушение материалов. Дисциплина использует понятия и законы таких дисциплин, как «Физическое материаловедение», «Механические свойства металлов», «Основы физики пластической деформации и разрушения металлов», «Физика больших пластических деформаций», «Обработка металлов давлением».

Знания, умения и навыки, приобретенные в результате изучения дисциплины «Деформационные методы получения мелкозернистых и ультрамелкозернистых 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
Лекции	28 / 0,78	28
Лабораторные занятия	8 / 0,22	8
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	Лабораторные занятия	
1	Характеристики и масштабные уровни пластической деформации		4		5
2	Основные этапы измельчения и факторы, влияющие на размер зерен		4		5
3	Роль механизмов деформации в измельчении зерен		4		5
4	Общая методология выбора метода измельчения зерен. Предварительные методы измельчения зерен		2		7
5	Равноканальное угловое (РКУ) прессование		2	4	9
6	Кручение тонких дисков и прутков		2		7
7	Метод всестороннейковки		2		7
8	Метод порошковой металлургии		2		5
9	Практика формирования УМЗ структуры в объемных материалах		2		6
10	Структура, свойства и обрабатываемость наноматериалов		2		9
11					
	Итого	108	28	8	72

### 4.2. Содержание разделов дисциплины

#### 1. Характеристики и масштабные уровни пластической деформации

Атомный уровень. Описание пластической деформации на основе «первых принципов», молекулярной динамики с использованием компьютерных моделей.

Макроскопический уровень пластической деформации. Напряженно-деформированное состояние, однородность деформации, тензор деформации, истинная степень деформации, траектории и схема деформации, площадь и кривизна поверхности, Характеристики макроуровня, макроструктура, кристаллографическая текстура

Микро – и мезо-уровень. Дефекты и специфические характеристики дефектов кристаллической структуры, решеточные и зернограницные дислокации, петли дислокаций, источники и стенки дислокаций, полные и частичные дисклинации, границы зерен и фаз, скалярная, зарядовая, тензорная плотность дислокаций, приращение площади поверхности

очага деформации, кривизна формы, связь величины деформации с перемещением линейных дефектов. Закономерности изменений плотности дислокаций при интенсивной пластической деформации (ИПД).

## *2. Основные этапы измельчения и факторы, влияющие на размер зерен*

Эволюция дислокационной структуры при деформации. Закономерности упрочнения и фрагментации, дислокационные скопления. Ячейки. Блоки. Субзерна. Полосовые структуры, деформационные, переходные полосы, микрополосы, полосы сдвига. Двойникование. Взаимодействие дислокаций с границами. Влияние природы материала на структурообразование при ИПД. Влияние условий деформации на измельчение зерен: температура, степень и скорость деформации, квазигидростатическое давление, схема и характер деформирования, напряженное и деформированное состояние. Масштабный фактор и поверхность очага деформации, критические напряжения и поверхностные источники дислокаций.

## *3. Роль механизмов деформации в измельчении зерен*

Дислокационное скольжение, зернограницный сдвиг, главные и аккомодационные механизмы. Кинетика фрагментации и механизмов деформации. Изменение относительных вкладов механизмов деформации при ИПД.

Размеры фрагментов и полос. Принцип соответствия изгиба-кручения образца и кривизны-кручения кристаллической решетки. Массоперенос при изгибе, эвольвентные (по Ж. Фриделю) и дуговые траектории потоков дислокаций, образование скоплений дислокаций и стенок дислокаций по Р. Кану. Минимальные размеры фрагментов. Кинематика течения материала и полособразование, распределение полос по размерам, ламинарное и турбулентное течение, гаусовская кривизна поверхности полос и их дробление по Рэлею. Взаимосвязь полос и фрагментов - блоков. Особенности полособразования и пересечения полос при различных схемах деформации.

Влияние масштабного фактора на измельчение зерен. Соотношение Д. Холта, связь поверхности с дефектообразованием, энергетические флуктуации. Модель распределения деформации в области ядра дислокаций по В. Вольтера. Электронный ветер, дислокации и приращение площади поверхности площадь очага деформации. Гипотеза соответствия кривизны формы и кривизны-кручения кристаллической решетки, дивергенция тензорной плотности, изменение зарядовой плотности при деформации и масштабный фактор. Размеры фрагментов и зерен.

## *4. Общая методология выбора метода измельчения зерен. Предварительные методы измельчения зерен*

Формоизменение заготовки и фрагментация как релаксационные процессы пластической деформации. Закон Гука, упрочнение и релаксация, накопление и диссипация механической энергии в металле при монотонной и немонотонной деформации. Влияние характера и условий деформации на энергозатраты и релаксацию напряжений. Эффективная запасенная энергия и деградация энергии.

Рекристаллизационные методы измельчения зерен. Возврат. Первичная и динамическая рекристаллизация. Механизмы рекристаллизации. Непрерывная и прерывистая рекристаллизация, рекристаллизация «*in situ*». Критическая степень деформации, режим отжига, влияние химического и фазового состава, соотношение Зинера-Смита. «Холодная рекристаллизация», диаграмма рекристаллизации, влияние температуры, степени, скорости деформации, использование фазовых превращений.

## *5. Равноканальное угловое (РКУ) прессование*

Общая характеристика метода. Деформированное и структурное состояния материала. Простой и чистый сдвиг, очаг деформации, формулы для определения накопленной

деформации. Полосообразование. Маршруты, скорость, температура, тепловыделение, силовые характеристики прессования.

Модификации метода РКУ прессования. Прессование с противодавлением, многоцикловое, в параллельных каналах, многопроходное; конформ-процесс. Практика прессования, примеры экспериментального прессования. Оборудование, инструментальная оснастка.

#### *6. Кручение тонких дисков и прутков*

Основные параметры процесса. Напряженно-деформированное состояние. Кинематические параметры, параметр Одквиста, силовые параметры. Распределение давления.

Эффекты комбинации кручения и осевой нагрузки. Роль трения. Эволюция структуры.

Винтовая экструзия, схемы экструзии, силовые параметры. Степень деформации. Дефекты.

Другие схемы деформации с использованием кручения. Ротационно-сдвиговое деформирование, метод бегающей шейки.

#### *7. Всесторонняя ковка*

Новаторские подходы. Схема изменения осей деформирования. Основные характеристикиковки, степень и удельная сила деформации, локализация деформации, ковочный крест. Ковка металлов, труднодеформируемых и малопластичных сплавов. Ковка титана и его сплавов; изотермическая и квазиизотермическая ковка, ковка с понижением температуры; использование фазовых превращений. Деформирование жаропрочных никелевых сплавов. Дробная деформация, субмикроструктурные и наноструктурные состояния сплавов.

#### *8. Метод порошковой металлургии*

Основные физико-химические, технологические свойства порошков. Размеры, форма и свойства нанопорошка. Методы получения порошка: металлургические, механические, газовая конденсация, электровзрыв, термолиз, импульсные лазерные методы, осаждение из коллоидных растворов. Методы консолидации порошка. Схемы и режимы прессования, прокатка, экструзия. Спекание.

#### *9. Практика формирования УМЗ структуры в объемных материалах*

Особенности режимов рекристаллизационного измельчения зерен в жаропрочных сплавах. Температурно-временные зависимости распада и области рекристаллизации. Типы структур. Горячая деформация, методы, использующие силовые схемы деформирования. Изотермическая деформация титановых сплавов.

Измельчение структуры методом деформации в режиме сверхпластичности. Деформационно-термическая обработка. Крупногабаритные УМЗ полуфабрикаты.

#### *10. Краткие сведения о структуре, свойствах и обрабатываемости наноматериалов*

Зависимость Петча-Холла. Особенности микроструктуры УМЗ материалов, модель Г. Гляйтера, неравновесные границы, рост зерен. Текстура, однородность структуры.

Физико-механические свойства. Технологические свойства УМЗ материалов. Температура Дебая, точка Кюри, магнитные и электрические свойства, работа выхода электрона, ультразвуковой контроль, шумы и полезный сигнал. Деформируемость, сверхпластичность, прочность, пластичность. Применение наноматериалов.

### **4.3. Лабораторные занятия**

Освоение дисциплины включает две лабораторные работы:

1. Равноканальное угловое прессование металлических прутков.
2. Аттестация структуры и механических свойств деформированного образца после РКУ прессования.

#### 4.4. 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 лабораторным занятиям и к сдаче зачета.

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

#### 5.1. Организация текущего контроля освоения материала

Текущий контроль знаний по дисциплине «Деформационные методы получения мелкозернистых и ультрамелкозернистых материалов» осуществляется путем:

- устных опросов во время лекционных занятий 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. Перечислите основные этапы структурных изменений в металлах при пластической деформации.
2. При каких значениях деформации начинается фрагментация? Повлияет ли на начало фрагментации исходное состояние металла: монокристаллическое, поликристаллическое, в том числе крупнозернистое и ультрамелкозернистое состояние?
3. В каких металлах активно развивается двойникование?
4. Чем отличаются ячейки с несовершенными границами от ячеек с совершенными границами?
5. Как зависят размеры разориентированных областей от плотности дислокаций?
6. Опишите условия, при которых возможно повышение разориентировок малоугловых границ за счет внесенных решеточных дислокаций.
7. Какие типы полосовых структур вы знаете? Перемещение каких дефектов приводит к полосообразованию? Какая связь между слабоориентированными ячейками и полосами?
8. Почему по мере образования микрополос ресурс деформации металла исчерпывается? Как далее может развиваться деформация?
9. Определите напряжение, необходимое для генерации дислокаций в микрополосе, толщина полос 0,1 мкм, в металле с вектором Бюргера  $b \approx 300 \times 10^{-10}$  м.
10. Могут ли при ИПД возникнуть полосы более тонкие, чем микрополосы, например, нанополосы?
11. Перечислите основные факторы, влияющие на измельчение структуры в металлах и сплавах.
12. Почему при изменении направления деформирования фрагментированная на предыдущем этапе деформации структура становится неустойчивой?

13. Чем объясняется благоприятное воздействие немонотонной деформации на формирование зерен, в сравнении с квазимонотонной деформацией?
14. Как влияет квазигидростатическое давление на измельчение зерен, при каких давлениях дефекты не образуются и при каких залечиваются?
15. Какие характеристики напряженного состояния вы знаете, и как они влияют на измельчение зерен?
16. Как влияет масштабный фактор на измельчение зерен?
17. Какие механизмы деформации вы знаете, чем вызвано их многообразие и изменение при деформации? Какой механизм деформации называют главным или основным, а какой аккомодационным?
18. В чем проявляется аналогия между фазовым превращением и измельчением структуры при ИПД?
19. Почему фрагментация и измельчение зерен при ИПД прекращается, несмотря на продолжающуюся деформацию металлов? Как следует изменить условия деформации, чтобы измельчение зерен продолжилось?
20. Как ориентировочно оценить тепловую энергию от работы сил деформации и мгновенную температуру разогрева? При каких условиях деформационный может вызвать рост фрагментов и зерен в материалах?
21. Как связаны изгиб и кручение образца с изгибом и кручением кристаллической решетки?
22. Может ли нейтральная линия при изгибе выйти за пределы заготовки. В чем при изгибе проявляется принцип Поляни – Тейлора и как на его основе ориентировочно определить минимальный размер малоугловых фрагментов и среднее значение углов разориентировки?
23. Нарисуйте поле скоростей для материальной точки заготовки, перемещающейся в устройстве для равноканального прессования на границах очага деформации и в очаге. *Указание: при построении поля зону пересечения каналов соедините плавными галтелями, т.е. рассмотрите очаг деформации, как сектор тора. Начало и конец очага деформации задайте поперечными сечениями, проходящими через точки сопряжения галтелей с цилиндрическими частями канала.*
24. Дайте качественное объяснение полосообразованию при течении металлического материала в изогнутом канале. Используйте при этом аналогию между возможностью протаскивания в канале многожильного провода и одножильного провода с поперечными площадями равными площади поперечного сечения канала.
25. Дайте объяснение причин формирования полос с компенсированными границами в канале, дробления полос и поворота фрагментов полос в направлении под углом к оси изогнутого канала.
26. Каковы отличительные особенности полосообразования при волочении и прессовании в сравнении с течением заготовки в изогнутом канале?
27. Почему скалярная плотность, достигнув максимума, снижается, а тензорную плотность можно суммировать, как величину, накапливающуюся по всей траектории холодной деформации?
28. В чем смысл и причины соответствия между приращением параметра кривизны образца и кривизны кручения кристаллической решетки?
29. Как следует изменить условия деформации, чтобы, не изменяя масштабного фактора (не редуцируя поперечное сечение образца), добиться большего измельчения зерен?
30. Какой параметр структуры характеризует масштабный фактор в многофазных сплавах?
31. Напишите обобщенное уравнение, описывающее принцип Поляни – Тейлора.
32. В чем суть принципа совместности деформации, и какие структурные изменения в поликристаллических материалах при больших деформациях обеспечивают его реализацию?

33. На какие составляющие можно разложить тензор дисторсии?
34. Каков смысл компонент тензора деформации, расположенных на главной диагонали и вне её?
35. Какие деформации описывает тензор поворота?
36. По какой причине сумма компонент тензора поворота, расположенных на главной диагонали равна нулю?
37. Какова роль поворотной деформации в обеспечении её совместности?
38. Перемещение каких дефектов кристаллической структуры приводит к поворотной деформации?
39. Напишите уравнение Остроградского - Гауса по отношению к вектору Бюргерса и объясните физический смысл его составляющих.
40. Напишите векторное уравнение Остроградского - Гауса по отношению к тензору дисторсии и объясните физический смысл его составляющих.
41. Какая часть механической энергии деформации, приводит к структурным изменениям материала и какая её часть расходуется на его нагрев.
42. Какие изменения кристаллического материала при деформации свидетельствуют о возрастании его энтропии?
43. Перечислите основные методы ИПД и общие характеристики.
44. Перечислите факторы, влияющие на силу РКУ прессования.
45. Чем отличается простой сдвиг от чистого сдвига?
45. Каковы достоинства и недостатки РКУ прессования?
46. Особенности метода конформ- прессования.
47. Достоинства и недостатки метода кручения под давлением.
48. По какой причине при кручении под давлением снижается осевая составляющая нагрузки на дисковый образец?
49. Какие силы обеспечивают кручение и сжатие тонкого диска? Напишите соотношение между напряжением течения образца и компонентами активного и реактивного напряжения трения.
50. По какой причине кручение и активное трение при кручении под давлением способствует повышению однородности деформации тонкого диска?
51. Напишите формулу для определения степени деформации в диске при его кручении под давлением.
52. Достоинства и недостатки метода винтовой экструзии.
53. Достоинства и недостатки порошковой металлургии как метода ИПД.
54. В каких деформированных порошковых материалах при спекании возможно сохранение наноразмерной структуры?
55. Всесторонняя ковка, возможности, достоинства и недостатки как метода ИПД.
56. Как вычисляют степень деформации при всесторонней ковке?
57. Почему для формирования наноструктуры всестороннюю ковку многофазных сплавов выполняют с понижением температуры в переходах, а чистых металлов, например меди, при постоянной комнатной температуре или температуре жидкого азота?
58. Методы обработки титана и его сплавов, обеспечивающих формирования наноструктурного состояния.
59. По какой причине крупнозернистые жаропрочные никелевые сплавы относят к наноструктурированным материалам?
60. Как обрабатывают жаропрочные никелевые сплавы с целью получения из них сверхпластичных полуфабрикатов и с целью возврата жаропрочных свойств?
61. Какие физические свойства кристаллических материалов существенно изменяются при измельчении зерен до нанометрических размеров?
62. Какие механические свойства кристаллических материалов существенно изменяются при измельчении зерен до нанометрических размеров?

63. Стабильность структуры и свойств наноматериалов.
64. Область использования наноматериалов конструкционного назначения.
65. Дайте определение понятия наноматериала и нанотехнологии.
66. Какое деформирующее оборудование и оснастку применяют для получения наноматериалов?
67. Какая термообработка целесообразна для наноматериалов? Приведите примеры.
68. В каких случаях целесообразна комбинация методов деформации для получения наноматериалов?

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

Для проверки степени сформированности элементов компетенций ОПК-11, ОПК-12 и ПК-1 аспиранты выполняют расчетно-графическую работу.

Примерная тематика работ - разработка технологического проекта изготовления металлического УМЗ полуфабриката в виде прутка, поковки, проволоки, диска, со специальной формой. Основные функциональные задачи (стадии выполнения): разработка технического задания, расчет и/или выбор режимов деформации, проектирование заготовки и инструмента. Формы представления результатов - конструкторская, техническая (пояснительная записка) и технологической документации (маршрутная и технологическая карты).

## **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. Масштабные уровни деформации и структурообразования, их характеристики, описание и связь.
2. Основные этапы структурных изменений в металлах при пластической деформации.
3. Явление фрагментации, причины, механизмы, структурные изменения.

4. Роль двойникования в измельчении зерен.
5. Возникновение и эволюция областей разориентации при деформации
6. Связь между размерами разориентированных областей и плотностью дислокаций.
7. Причины возникновения полосовых структур и их типы.
8. Основные факторы, влияющие на измельчение структуры в металлах и сплавах.
9. Понятие монотонности и немонотонности деформации и их влияние на измельчение структуры.
10. Влияние квазигидростатического давления на деформируемость, поведение дефектов при деформации и на измельчение зерен.
11. Масштабный фактор в металлах и многофазных сплавах и его влияние на размеры измельченных зерен.
12. Механизмы деформации их роль в обеспечении совместности деформации и в структурообразовании.
13. Влияние фазовых превращений на измельчение структуры при ИПД.
14. Влияние типа кристаллической решетки на измельчение зерен.
15. Рекристаллизационные методы измельчения зерен.
16. Характеристики деформированного и структурного состояния.
17. Роль линейных дефектов кристаллической структуры в деформационном измельчении зерен.
18. Понятие совместности деформации, механическая и структурная интерпретация.
19. Скалярные и векторные характеристики деформации.
20. Тензор дисторсии, как мера деформации и его компоненты.
21. Уравнения Остроградского-Гауса в отношении вектора Бюргерса и физический смысл его составляющих. Вклад вектора Бюргерса в повышение плотности дислокации и в приращение площади поверхности материала при холодной деформации.
22. Векторное уравнение Остроградского-Гауса в отношении тензора дисторсии, физический смысл его составляющих и их вклад в формоизменение – приращение площади внешней поверхности в изменение структуры формоизменение материала и изменение поверхности.
23. Связь между изменением тензорной плотности металла при холодной деформации и относительным приращением площади поверхности образца.
24. Особенности границ ячеек и их роль в измельчении зерен. Зависимость размера ячеек от кривизны кручения кристаллической решетки.
25. Влияние механизмов деформации на измельчение зерен и их угловые разориентировки.
26. Влияние температуры деформации в металлах и многофазных сплавах на деформационное измельчение зерен. Учет деформационного разогрева.

## **6. Материальное обеспечение дисциплины**

Для проведения занятий используются аудитории ИПСМ РАН (ком. 44, 31), лаборатории световой и электронной микроскопии, лаборатория рентгеноструктурного анализа, опытное производство инновационного центра - участки раскатки, прокатки, штамповки. Отмеченные помещения позволяют выполнять технологические работы и выполнять исследования структурного и деформированного состояния материала при проведении лабораторных работ.

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

### **7.1. Основная литература**

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. - М.: Логос, 2000. 272 с.
2. Штремель М.А. Прочность сплавов. Часть 1. Дефекты решетки. - М.: МИСИС. 1997. 384 с.

3. Утяшев Ф.З. Современные методы интенсивной пластической деформации: учебное пособие. - Уфа: УГАТУ, 2008. 250с.
4. Утяшев Ф.З. Рааб Г.И. Деформационные методы получения и обработки ультрамелкозерн и наноструктурных материалов. Уфа: Гилем–НИК Башк. энцикл, 2013. 376 с.
5. Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: Эксперимент, теория, технологии / Р.Р. Мулюков, Р.М. Имаев, А.А. Назаров, В.М. Имаев, М.Ф. Имаев, В.А. Валитов, Р.М. Галеев, С.В. Дмитриев, А.В. Корзников, А.А. Круглов, Р.Я. Лутфуллин, М.В. Маркушев, Р.В. Сафиуллин, О.Ш. Ситдиков, В.Г. Трифонов, Ф.З. Утяшев; под ред. Р.Р. Мулюкова, Р.М. Имаева, А.А. Назарова, В.М. Имаева, М.Ф. Имаева. - М.: Наука, 2014. - 284 с.

## **7.2. Дополнительная литература**

1. Фридель Ж. Дислокации. Изд. «Мир», Москва, 1967. Перевод под ред. А.Л. Ройтбурга. (J. Friedel. Dislocation. Pergamon. Oxford. 1964).
2. Васин Р.А., Еникеев Ф.У. Введение в механику сверхпластичности. Уфа 1998. Гилем ч.1. 280 с.
3. Патент № 2134308 RU C1 6C 22 F 1/18 Способ обработки титановых сплавов / Кайбышев О.А., Салищев Г.А., Галеев Р.М. и др. 10.08.99.Бюл 22.
4. Утяшев Ф.З. Лабораторный практикум по дисциплине «Современная технология интенсивной пластической деформации» Уфа, УГАТУ. 2008. 20 с.
5. Утяшев Ф.З. Методические указания к курсовой работе по дисциплине «Современная технология интенсивной пластической деформации». Уфа, УГАТУ. 2008. 20с
6. Утяшев Ф.З. Практикум по дисциплине «Современная технология интенсивной пластической деформации» Уфа, УГАТУ. 2008. 20с.
7. Кайбышев О.А., Утяшев Ф.З. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов. М. «Наука». 2002. 438 с.
8. Гусев А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства. Екатеринбург: УрО РАН. 2006, 200 с., с ил.
9. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. М.: Academia. 2005. 192 с.
10. Физическое металловедение. Вып.3. Под ред. Р. Кана. М.: «Мир». 1968. 484 с.
11. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. М. Металлургия 1986. С.480.