

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Физико-технический

Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии

Кафедра Физико-энергетические установки

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Моделирование температурной зависимости модуля сдвига чистых металлов

УДК 621.039.531

УДК 539.3/.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A2B	Матвеев Максим Витальевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	О.В. Селиваникова			

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСТ	А.А. Сечина	К.Х.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Т.С. Гоголева			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФЭУ ФТИ	Долматов О.Ю.	к.ф.-м.н., доцент		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Общекультурные компетенции	
Р1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
Р2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
Р3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления.
Р4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.
Р5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
Р6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
Р7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
Р8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
Р9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
Р10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов;
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Физико-технический

Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии

Кафедра Физико-энергетические установки

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой ФЭУ

_____ 12.05.2015 О.Ю. Долматов
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
0A2B	Матвеев Максим Витальевич

Тема работы:

Моделирование температурной зависимости модуля сдвига чистых металлов	
Утверждена приказом проректора-директора (директора) (дата, номер)	№

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Данные для температурных зависимостей: упругих модулей монокристаллов и модули Юнга для поликристаллов (экспериментальные данные).
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Обзор литературных источников для поиска исходных данных по модулю Юнга и сдвига для чистых ГЦК металлов и моделей температурных зависимостей упругих модулей. Построение усредненных температурных зависимостей модулей Юнга поликристаллов по данным для упругих модулей монокристаллов. Построение моделей температурной зависимости модуля Юнга. Расчет температурной зависимости модулей сдвига с учетом его взаимосвязи с модулем Юнга.
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	- Презентация - слайдов - Чертеж ячейки

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	А.А. Сечина
Социальная ответственность	Т.С. Гоголева
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	
Нет	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	16.05.2016
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	О.В. Селиваникова			16.05.2016

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A2B	Матвеев Максим Витальевич		16.05.2016

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0A2B	Матвеев Максим Витальевич

Институт		Кафедра	
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерные реакторы и энергетические установки

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научно-методических журналах, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Оценочная карта конкурентных технических решений по технологии QuaD SWOT-анализ
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Иерархическая структура работ Календарный план-график реализации проекта
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Определение ресурсной и финансовой эффективности проекта

Перечень графического материала:

1. Оценка конкурентоспособности технических решений по технологии QUAD
2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет НИ
4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	А.А. Сечина			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A2B	Матвеев Максим Витальевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0A2B	Матвеев Максим Витальевич

Институт		Кафедра	
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерные реакторы и энергетические установки

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования).	– Вредные проявления факторов производственной среды: электромагнитные поля, ионизирующее излучение, метеоусловия, шумы, освещение; – Опасные проявления факторов производственной среды: электрической, пожарной и взрывной природы.
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме.	Ознакомление с законодательной и нормативной документацией.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды.	– Электромагнитные поля и ионизирующее излучение от ЭВМ; – Действие фактора на организм человека; – Приведение допустимых норм с необходимой размерностью; – Предлагаемые средства защиты.
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды.	– Электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – Пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Т.С. Гоголева			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A2B	Матвеев Максим Витальевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа (ВКР) состоит из XX страниц, YY рисунков, ZZ таблиц, QQ литературных источников и DD формул.

Ключевые слова: Модуль сдвига, ГЦК-металлы, модуль Юнга, упругие постоянные, температурные изменения.

Объектом исследования являются модули сдвига и Юнга ГЦК-металлов при изменении температуры.

Целью работы является получение температурных зависимостей модулей сдвига чистых ГЦК-металлов. Достижение указанной цели позволит предсказывать поведение ГЦК-металлов в условиях изменяющейся температуры, без необходимости проведения экспериментов.

Для моделирования температурной зависимости были использованы программные комплексы Wolfram Mathematica и Excel. Моделирование проводилось для следующих ГЦК-металлов: медь, никель, алюминий, золото, серебро, свинец, платина, торий и иридий.

В результате были получены температурные зависимости ГЦК-металлов, были подобраны коэффициенты соответствующих уравнений и оценены погрешности данной модели.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	12
1. Обзор литературы	15
1.1 Упругие постоянные.....	15
1.2. Модуль сдвига	16
1.2.1 Метод Фойгта-Реусса-Хилла	18
1.2.2 Метод Хашина-Штрикмана	18
1.3 Модуль Юнга.....	20
2 Расчетная часть	Ошибка! Закладка не определена.
2.1 Верификация полученных данных	Ошибка! Закладка не определена.
2.2 Проблема и метод её решения	Ошибка! Закладка не определена.
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	Ошибка! Закладка не определена.
3.1 Анализ конкурентных технических решений.....	Ошибка! Закладка не определена.
3.3.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	Ошибка! Закладка не определена.
3.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ.....	Ошибка! Закладка не определена.
3.3.3 Разработка графика проведения научного исследования.....	Ошибка! Закладка не определена.
3.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	Ошибка! Закладка не определена.
3.4.1 Расчет материальных затрат НТИ	Ошибка! Закладка не определена.
3.4.2 Основная заработная плата исполнителей темы.....	Ошибка! Закладка не определена.
3.4.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы	Ошибка! Закладка не определена.
3.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	Ошибка! Закладка не определена.

4	Социальная ответственность	Ошибка! Закладка не определена.
4.1	Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	Ошибка! Закладка не определена.
4.2	Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния на работающих	Ошибка! Закладка не определена.
4.2.1	Организационные мероприятия	Ошибка! Закладка не определена.
4.2.2	Технические мероприятия	Ошибка! Закладка не определена.
4.3	Условия безопасной работы	Ошибка! Закладка не определена.
4.3.1	Электробезопасность	Ошибка! Закладка не определена.
4.3.2	Пожарная и взрывная безопасность	Ошибка! Закладка не определена.
	Заключение	Ошибка! Закладка не определена.
	Список публикаций студента.....	Ошибка! Закладка не определена.
	Список использованных источников	Ошибка! Закладка не определена.

Введение

Перспективы развития материаловедения как правило связаны с созданием новых конструкционных материалов, допускающих эксплуатацию наиболее важных элементов конструкций в условиях наличия деформационных воздействий более интенсивных, чем ранее или таких, которые до определённого момента отсутствовали на практике. Направленный поиск этих материалов предполагает наличие математической модели, позволяющей прогнозировать поведение нового материала в условиях различных деформационных воздействий, изменяющих внутреннюю структуру материала. Поэтому на протяжении длительного времени остаётся актуальным создание новых математических моделей и их модификация для изучения различных видов деформационных воздействий. Любая математическая модель может содержать в себе различные физические, статистические и геометрические параметры.

Все конструкционные материалы ядерных установок подвергаются радиационному воздействию, что приводит к изменению механических свойств сталей и сплавов (диаграммы деформирования, модуля упругости, предела текучести, пределов прочности, ползучести и длительной прочности), а это в свою очередь приводит к изменению поведения конструкций из них. То есть под влиянием ионизирующего излучения происходит изменение напряженно-деформированного состояния нагруженных элементов конструкций, приводящее к сокращению их сроков службы.

Для прогнозирования поведения конструкционных материалов с целью обеспечения продления сроков эксплуатации ядерных установок необходимо иметь модели поведения сталей и сплавов под действием радиации.

Наиболее важными параметрами, характеризующими напряжённое состояние материала, являются упругие модули. Ввиду большого многообразия новых возможных материалов, нецелесообразно проводить экспериментальные исследования каждого из них. Значительно ускорить определение упругих модулей и других параметров модели может наличие

методов, позволяющих вычислить параметры модели исходя из уже известных экспериментальных данных. Металлические материалы в виде монокристаллов, поликристаллов и различных типов сплавов применяются в большинстве современных и перспективных разработок. Наиболее часто используемыми в математических моделях параметрами являются модуль сдвига и модуль Юнга, определяющие способность металла сопротивляться сдвиговой и упругой деформации. Хорошо известны методы экспериментального определения упругих постоянных для монокристаллов [1, 2, 11], однако ввиду сложностей в изготовлении монокристаллов новых сплавов продолжается исследования для создания методов их теоретического расчёта. Кроме того, использование монокристаллов ограничено их размерами, чаще всего недостаточными для нужд промышленности, поэтому в качестве конструкционных материалов используются преимущественно поликристаллы различных металлов и сплавов. Несмотря на то, что разработаны экспериментальные методики определения модулей Юнга и сдвига уже созданных материалов [15, 16], остаётся актуальной задача определения этих, а также и других необходимых физических параметров математической модели ещё до создания материала с целью экономии средств. Теоретические методы определения модулей сдвига и Юнга позволяют установить их значения лишь с некоторой точностью, различной для каждого метода.

Цель работы - разработка модели, которая позволяет получить температурные зависимости модуля Юнга и сдвига для выбранного ГЦК-металла.

Задачами данной работы являются:

- Обзор литературных источников для поиска исходных данных по модулю Юнга и сдвига для чистых ГЦК металлов и моделей температурных зависимостей упругих модулей.
- Построение усредненных температурных зависимостей модулей Юнга поликристаллов по данным для упругих модулей монокристаллов.

- Построение моделей температурной зависимости модуля Юнга.
- Расчет температурной зависимости модуля сдвига с учетом его взаимосвязи с модулем Юнга.

1. Обзор литературы

1.1 Упругие постоянные

Начальной точкой в теории упругости является постулирование закона Гука, который гласит о том, что для малых деформаций компоненты тензора деформации линейно связаны с компонентами тензора напряжений. Для анизотропной среды (монокристаллов, текстур) это может быть представлено в виде:

$$\sigma_i = \sum_{k,m=1}^3 C_{ijkm} \varepsilon_{km} \text{ при } (i, k = 1, 2, 3), \quad (1.1)$$

или

$$\varepsilon_i = \sum_{k,m=1}^3 S_{ijkm} \sigma_{km} \text{ при } (i, k = 1, 2, 3). \quad (1.2)$$

Константа C_{ijkm} называется постоянной упругой жесткости, а S_{ijkm} – постоянная упругой податливости. Эта величина имеет размерность силы на единицу площади. В общем случае уравнения (1.1) и (1.2), несут в себе 81 коэффициент. Но в силу симметрии матрицы их количество сокращается до 36. Столько постоянных имеет твердое анизотропное тело без какой-либо симметрии.

В общей форме закон Гука представляется в виде:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix}. \quad (1.3)$$

Аналогично для системы (1.3). Все 36 постоянных независимы. Однако в связи с различной симметрией у кристаллов их может быть гораздо меньше. Так, матрица кубического кристалла имеет форму:

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & & & \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{55} & \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix}. \quad (1.4)$$

И получается всего три постоянных упругой жесткости - C_{11}, C_{12}, C_{44} и податливости S_{11}, S_{12}, S_{44} . Упругие постоянные жесткости и податливости взаимосвязаны, потому что они связывают компоненты тензора напряжений и деформации, в результате чего получаются следующие соотношения:

$$S_{11} = \frac{C_{11} + C_{12}}{(C_{11} - C_{12})(C_{11} + 2C_{12})}, \quad (1.5)$$

$$S_{12} = \frac{-C_{12}}{(C_{11} - C_{12})(C_{11} + 2C_{12})}, \quad (1.6)$$

$$S_{44} = \frac{1}{C_{44}}, \quad (1.7)$$

$$C_{11} = \frac{S_{11} + S_{12}}{(S_{11} - S_{12})(S_{11} + 2S_{12})}, \quad (1.8)$$

$$C_{12} = \frac{-S_{12}}{(S_{11} - S_{12})(S_{11} + 2S_{12})}, \quad (1.9)$$

$$C_{44} = \frac{1}{S_{44}}. \quad (1.10)$$

1.2. Модуль сдвига

Модуль сдвига – величина, характеризующая способность металла сопротивляться деформации, которая происходит в результате приложения силы параллельно одной плоскости объекта, в то время как параллельная ей другая плоскость остаётся неподвижной.

Когда объект длиной L и поперечным сечением A подвергается приложению силы F параллельно одной из его плоскостей, эта плоскость сместится на дистанцию Δx . Тогда сдвиговое напряжение будет определяться величиной силы отнесенной к единице поперечного сечения сдвигающейся плоскости $\frac{F}{A}$. Сдвиговая деформация определяется как $\frac{\Delta x}{L}$. И в общем случае модуль сдвига G может быть определен как отношение сдвигового напряжения к сдвиговой деформации:

$$G = \frac{\text{Сдвиговое напряжение}}{\text{Сдвиговая деформация}} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta x}{L}} = \frac{FL}{A\Delta x}, \quad [\text{Па}] \quad (1.11)$$

Чем больше модуль сдвига материала, тем более жестким он является, так как для смещения плоскости на одну и ту же длину требуется гораздо большая сила. По этой причине этот модуль иногда называют модулем жесткости.

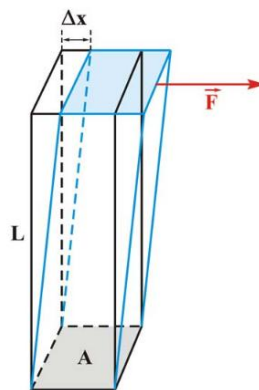


Рисунок 1.1. Модуль сдвига

В первом приближении при таких деформациях объем остается неизменным. Плоскости атомов просто скользят друг по другу. По этой причине поперечное сечение A является очень важной величиной. [4]

Существует несколько методов определения модулей сдвига, как практических, так и теоретических.

Наиболее часто встречающимся практическим методом определения модуля сдвига является метод крутильных колебаний.

Из теоретических методов наиболее известными являются методы Фойгта-Реусса-Хилла, и Штрикмана-Хашина, которые позволяют рассчитать модули сдвига поликристалла в определенных диапазонах исходя из данных для упругих постоянных монокристаллов. Менее известны методами расчета модулей сдвига на данный момент являются методы Целлера, Кренера и Мидду.

1.2.1 Метод Фойгта-Реусса-Хилла

Метод Фойгта-Реусса позволяет определить модуль сдвига поликристалла через упругие постоянные для монокристалла по следующим формулам:

$$G_V = \frac{X-Y+3Z}{5}, \quad (1.12)$$

где $X = C_{11}$; $Y = C_{12}$; $Z = C_{44}$.

$$G_R = \frac{5}{4X'-4Y'+3Z'}, \quad (1.13)$$

где $X' = S_{11} = \frac{C_{12}+C_{11}}{-2C_{12}^2+C_{11}^2+C_{12}C_{11}}$; $Y' = S_{12} = \frac{C_{12}}{-2C_{12}^2+C_{11}^2+C_{12}C_{11}}$; $Z' = S_{44} = \frac{1}{C_{44}}$.

В результате расчета модуля сдвига по формулам (1) и (2) получается значение в интервале $G_V \geq G \geq G_R$, Хилл предложил арифметически усреднить интервал для получения непосредственного значения модуля сдвига G :

$$G_{VRH} = \frac{G_V+G_R}{2}. \quad (1.14)$$

1.2.2 Метод Хашина-Штрикмана

Модуль сдвига методом Хашина-Штрикмана определяется следующими уравнениями:

$$G_S = G_1 + 3 \left(\frac{5}{G_2 - G_1} - 4 * \left(\frac{-3(B+2G_1)}{5G_1*(3B+4G_1)} \right) \right)^{-1},$$

(1.15)

$$G_H = G_2 + 2 \left(\frac{5}{G_1 - G_2} - 6 * \left(\frac{-3(B+2G_2)}{5G_2*(3B+4G_2)} \right) \right)^{-1},$$

(1.16)

где $G_1 = \frac{C_{11}-C_{12}}{2}$; $G_2 = C_{44}$; $B = \frac{C_{11}+2C_{12}}{3}$.

Аналогично предыдущему методу получается интервал $G_H \geq G \geq G_S$.
Аналогично методу Хилла (3) усредняем полученные величины:

$$G_{HSA} = \frac{G_H + G_S}{2}.$$

(1.17)

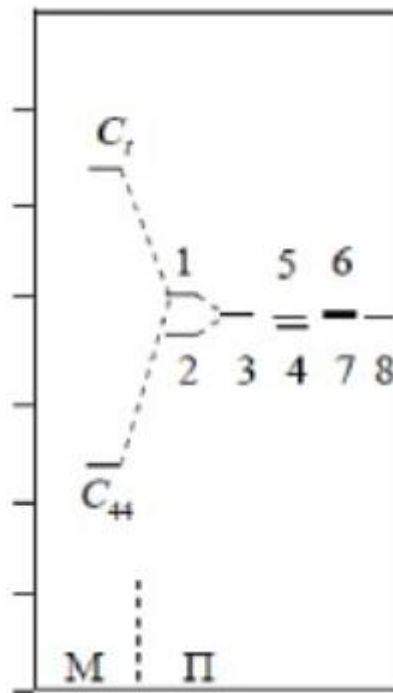


Рисунок 1.2. 1, 2, 3 - методы Фойгта-Реусса-Хилла; 4, 5 - метод Хашина-Штрикмана; 6, 7 - метод Целлера; 8 - экспериментальное значение

Наиболее известными и точными методами на данный момент являются метод Фойгта-Реусса-Хилла[2] и Хашина-Штрикмана[3], не смотря на то что получаемые значения дают лишь интервал, внутри которого может

лежать искомая величина, усреднение интервала даёт достаточно хорошую сопоставимость с экспериментальными данными.

1.3 Модуль Юнга

Все твердые тела под действием сил деформируются, т.е. изменяют объем и форму. Различаются деформации растяжения (сжатия), сдвига, изгиба, кручения (последние две сводятся к первым).

Если деформации исчезают после прекращения действия приложенных сил, то они называются упругими. Деформации, частично сохраняющиеся после снятия нагрузки, называются пластическими. Разделение деформаций на упругие и пластические условно. Строго говоря, после любой нагрузки, сохраняются остаточные деформации. Но если они пренебрежимо малы, то деформации считаются упругими.

Если вызывающая деформацию сила не слишком велика, то выполняется закон Гука: относительная деформация в пределах упругости пропорционально вызывающему ее усилию. Каждый вид деформации характеризуется своим коэффициентом, или модулем (величиной, обратной коэффициенту). Так как видов деформации может быть много, то столько же будет коэффициентов и модулей. Однако в теории упругости показано, что различные коэффициенты (модули) связаны между собой определенными соотношениями. При этом число соотношений на два меньше числа коэффициентов. Это значит, что любое тело всегда имеет два независимых коэффициента, характеризующих его упругие свойства. Физически это объясняется следующим образом. Всякая деформация представляет собой смещение молекул тела, а всякое движение может быть сведено к поступательному и вращательному движению. Так как два эти движения независимы, то и деформации, связанные с ними, например, удлинение и кручение, будут независимы. Все остальные деформации можно будет свести к этим двум.

Для упругих тел между действующими силами и вызванными ими деформациями существует однозначная зависимость (при пластических деформациях такой однозначности нет).

Рассмотрим деформацию растяжения на примере одного изотропного образца, например, проволоки. Пусть верхний конец проволоки закреплен, а к нижнему подвешиваются различные грузы $P = mg$. В качестве меры деформации растяжения используют абсолютное удлинение $\Delta l = l - l_0$ или относительное удлинение $\varepsilon = \Delta l / l_0$, где l_0 – начальная длина проволоки, а l – ее длина при нагрузке. Относительное удлинение ε рассчитывается на единицу начальной длины и поэтому, в отличие от абсолютного удлинения Δl , от длины проволоки не зависит.

Выделим мысленно произвольный элемент проволоки (рис. 1.3). Из условия равновесия следует, что со стороны соседних частей проволоки на концы рассматриваемого участка действуют равные по величине, но противоположно направленные силы F . Это силы упругости, возникшие в проволоке в результате ее деформации. Если деформация однородная, то каждая из сил равномерно распределена по поверхности поперечного сечения проволоки S . Величина

$$\sigma = F/S, \quad (1.18)$$

определяет упругую силу, действующую на единицу площадки, перпендикулярной направлению силы. Она называется нормальным напряжением. При однородной деформации нормальное напряжение одинаково в любом поперечном сечении образца. При неоднородной деформации для определения нормального напряжения

$$\sigma = dF/dS, \quad (1.19)$$

площадку dS , перпендикулярную к силе dF , следует выбирать элементарно малой, в пределах которой деформацию можно приближенно считать однородной. В разных точках неоднородно деформированного образца напряжение σ разное.

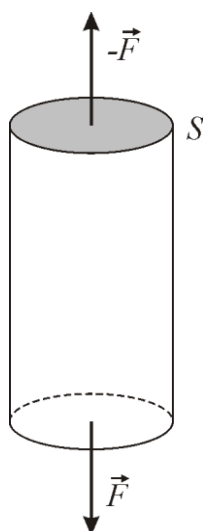


Рис. 1.3. Элемент проволоки с действующими на него силами

В пределах упругих деформаций нормальное напряжение прямо пропорционально относительному удлинению (закон Гука для деформации растяжения):

$$\sigma = \varepsilon E, \quad (1.20)$$

где E – коэффициент пропорциональности, называемый модулем продольной упругости (модулем Юнга) материала образца. Модуль продольной упругости численно равен нормальному напряжению, которое возникло бы в теле при его относительном удлинении, равном единице, если бы деформация оставалась упругой.

Удлинение проволоки прямо пропорционально растягивающей силе, первоначальной длине l и обратно пропорционально площади ее поперечного сечения S :

$$\Delta l = k \frac{F}{S} l, \quad (1.21)$$

где Δl – удлинение,

k – постоянная величина (коэффициент упругости), зависящая от материала проволоки. Обычно в формулу вводят не k , а величину, обратную ей: $E = 1/k$. Величина E носит название модуля упругости (модуля Юнга). Подставляя в уравнение (1) вместо k величину E , получим

$$\Delta l = \frac{Fl}{ES},$$

откуда

$$E = \frac{F}{S} : \frac{\Delta l}{l}, \quad (1.22)$$

и величина $P = F / S$ носит название усилия и характеризует величину упругих сил, развивающихся в деформируемом материале (напряжение).