Введение

Изучение физики пластической деформации кристаллов давно привлекает внимание исследователей. Однако только к концу XX столетия, в связи с развитием теории дефектов в твердых телах и прежде всего теории дислокаций, в этой области наметились кардинальные сдвиги. В настоящее время не вызывает сомнений, что механические характеристики реальных кристаллических материалов определяются в первую очередь наличием в них структурных дефектов разного типа, перераспределение и взаимодействие которых обусловливают особенности поведения данного материала под нагрузкой при различных температурах.

Выяснение механизмов пластической макродеформации кристаллов, изменений в их микроструктуре, установление протекающих при этом процессов − главная задача физики пластической деформации кристаллов. Ее решение значительно упрощается благодаря достигнутым в последние годы весьма существенным успехам в развитии и усовершенствовании методов изучения структуры кристаллов в атомных масштабах. Это относится главным образом к рентгеновским и элоктронномикроскопическим методам исслндованиям. Применение указанных методов позволило выявить этапы эволюции дефектов решетки при пластической деформации: кристаллов и связать их с величиной и характером нагрузки, а также с температурой.

При этом оказалось, что для правильного понимания наблюдаемых явлений недостаточно представлений о дислокациях и их различных комбинациях; необходимо привлечь сведения, относящиеся к точечным, плоским, а также объемным дефектам, различного типа, к их взаимодействию друг с другом и с дислокациями.
В данном учебном пособии рассматривается широкий круг вопросов, касающихся поведения металлов и сплавов при различных условиях нагружения. При этом отличительной особенностью изложения является последовательное сопоставление результатов экспериментов и выводов теории, что позволяет, с одной: стороны, уяснить степень обоснованности тех или иных положений теории, а с другой − составить представление о мере надежности приведенных экспериментальных данных.

Весьма важно, что описание пластической деформации монокристаллов и поликристаллов металлов и сплавов тесно связано с рассмотрением вопроса о возникновении и развитии центров нарушения сплошности материала при вязком и хрупком разрушении, поведению материалов при высоких гомологических температурах, усталости, сверхпластичности, фазовых превращениях и т.п., чему посвящена вторая часть этого пособии.

ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Известны так называемые семь чудес света — висячие сады Семирамиды, Александрийский маяк, статуя Зевса, колосс Родосский, храм Артемиды Эфесской, мавзолей в Галикарнасе, пирамида Хеопса

Вавилонская башня не входит в «официальный» список чудес света. Однако она − одно из самых выдающихся сооружений Древнего Вавилона, а ее название и поныне является символом сумятиц.

Вавилонская башня - легендарное строение древности, которое должно было прославить его строителей на века и бросить вызов Богу. Однако дерзкий замысел завершился бесславием: перестав понимать друг друга, люди не смогли завершить начатое. Башня не была достроена и со временем разрушилась.

Идея строительства принадлежит Нимроду - сильному и жестокому правителю того времени. По мысли Нимрода, строительство Вавилонской башни должно было показать могуществ людей.
Было изготовлено множество кирпичей из обожженной глины Подсчёты позволяют говорить о том, что для возведения этой башни было использовано около 85 млн кирпичей. Связка - битум. Высота не менее 90 м. И началось строительство (строилась 43 года) печально известной башни, названной впоследствии Вавилонской.

Господь сошел на землю, чтобы «посмотреть город и башню», Он с сожалением увидел, что подлинным смыслом этого начинания является высокомерие и дерзкий вызов Небу. Чтобы спасти людей и не допустить распространения зла в таких масштабах, как это произошло во времена Ноя, Господь нарушил единство людей: строители перестали понимать друг друга, заговорив на разных языках.

Материалистическое объяснение постигших строителей неудачи кроется в представлениях о конечной прочности материалов (обожженный глиняный кирпич), удельная прочность, т.е. отношение прочности к плотности материала, у которого на порядки меньше, чем у камня. Башня рухнула под действием собственного веса. Несмотря на прошедшие тысячелетия, дух Вавилона в человечестве не угас. В конце XX – начале XXI века Европа объединилась под флагом единого парламента и правительства. По сути это означало восстановление древней Римской империи со всеми вытекающими последствиями.

Ведь это событие стало исполнением древнего пророчества, относящемуся к концу времен. Поразительно, но здание Европарламента оказалось построено по особому проекту − в форме недостроенной "башни до небес". Нетрудно догадаться, что означает этот символ.

Полторы тысячи лет прошло со времени исчезновения с лица земли шести из семи чудес света, когда Леонардо да Винчи начал эксперименты по изучению прочности материалов. Несколько тысяч лет зодчие рассчитывали прочность, главным образом, опираясь на интуицию. С опытов Леонардо начался экспериментальный период в развитии строительной механики. Жизнь великого художника, исследователя, инженера из крохотного итальянского городка Винчи, титана эпохи Возрождения, достаточно подробно освещена во многих книгах. Остановимся лишь на той стороне его деятельности, которая непосредственно связана с предметом нашего курса.

Леонардо да Винчи проводил интересные испытания на растяжение металлических проволок, лютневых струн, различных волокон. Он сконструировал оригинальное приспособление для определения сопротивления железной проволоки разрыву.

Новый значительный шаг в развитии представлений о прочности через 120 лет после Леонардо да Винчи суждено было сделать еще одному титану Возрождения - Галилею.

Великий Галилей вошел в историю прежде всего как астроном. Общеизвестна его борьба за учение Коперника, печальной страницей его биографии явилось отречение от этого учения. Как известно, ему было запрещено писать и говорить о движении Земли. Как "узник инквизиции" Галилей отправился в свою виллу в Арчетри близ Флоренции, где в уединении провел безвыездно последние годы жизни. Вот этот последний период своей жизни "великий еретик" и посвятил исследованиям в области механики. Величайшая заслуга Галилея заключается в том, что он положил начало развитию двух разделов механики – динамики и сопротивления материалов как самостоятельных наук.

Один вопрос мучил Галилея давно. Как-то он наблюдал за постройкой галер. Когда было решено построить галеру значительных размеров, мастера решили эту проблему весьма просто. Они увеличили вдвое каждый элемент и соединение, создав галеру, вдвое большую, но абсолютно подобную обычной. Каково же было изумление строителей, да и самого Галилея, когда большая галера разрушилась, не начав плаванья.

Галилей предлагал использовать пустотелые элементы - трубы металлические и деревянные, сравнивая их с созданием природы - костями птиц и животных, тростником, стеблем растения. Он заключает, что при сравнении сплошной и трубчатой балок, имеющих одинаковую площадь сечения, трубчатая будет во столько раз прочнее, во сколько диаметр трубы больше диаметра сплошной балки.

Немногим позднее вопросами прочности твердых тел заинтересовался французский ученый Мариотт (1620−1684). В связи с задачами, возникшими при проектировании Версальского дворца, он проводит большие эксперименты по растяжению и изгибу самых разных материалов. Мариотт, изучая прочность деревянных и стеклянных балок, проверил результаты Галилея и убедился в их справедливости.

Роберт Гук (1635−1703), сын провинциального священника с острова Уайт, с детства увлекался двумя вещами: устройством всякого рода механизмов и рисованием. Страсть к изобретательству, оригинальность мышления в сочетании с романтической увлеченностью и буйной фантазией позволили сконструировать мышцы для полета в воздухе.

Гуку сделать множество открытий в самых различных областях знания. Гук сконструировал прибор для измерения силы ветра, приспособление для деления круга, ряд приборов для исследования морского дна, ареометр, проекционный фонарь, дождемер, пружинные часы. Он изобрел карданную передачу и систему зубчатых колес, которые теперь известны как вайтовы колеса. Он усовершенствовал зрительную, трубу для измерения углов, телескоп, микроскоп, барометр и даже искусственные мышцы для полета в воздухе.

Гука, например, заслуженно признавали хорошим архитектором. После пожара в Лондоне в 1666 г. он создал проект восстановления и реконструкции города, а затем по поручению магистрата возглавил эти работы. По его проектам в Лондоне был построен ряд зданий, церквей и жилых домов. Самым значительным сооружением была знаменитая больница Бедлам, по праву считавшаяся гордостью лондонских жителей (название происходит от Beatlehem).

В 1665 г. был издан классический труд "Микрография", посвященный физической оптике и микроскопии. В эту работу вошли, в частности, результаты изучения Гуком клеточного строения растений. Он впервые ввел термин "клетка" и дал описание клеток целого ряда растений. Гук занимался волновой теорией света, провел глубокое исследование цветов тонких пластинок, описал явления дифракции и ряд других световых явлений.

Вместе с Гюйгенсом Гук установил постоянные температурные точки - таяния льда и кипения воды - и сконструировал термометр. Одной из наиболее значительных его работ была теория движения и взаимодействия небесных тел.

Гук в основном предвосхитил закон всемирного тяготения, открытый Исааком Ньютоном. Мало того, отношение между силой притяжения и расстоянием между телами, было им фактически найдено, о чем он и писал Ньютону. Но только один закон по праву носит его имя и принадлежит ему вне всякой конкуренции.

Это закон упругости материальных тел, известный под названием закона Гука. Суть его можно выразить в трех словах: "Деформация: пропорциональна нагрузке", или, как записал Гук в своей криптограмме: ceiiino-sssttu (Ut tensio sic uis) "Каково удлинение, такова и сила". Этот закон был выведен Гуком в 1676 г. после проведения ряда экспериментов, а именно: а) удлинения железной проволоки; б) растяжения винтовой пружины; в) сокращения спиральной часовой пружины; г) изгиба балки, закрепленной одним концом и нагруженной на другом конце.

Главное, был сделан очень важный шаг. Был найден основной закон сопротивления материалов. Рассуждения Леонардо и Галилея постепенно становились на научную основу, благодаря которой со временем они будут описаны математическими формулами.

Вопросы прочности и пластичности интересовали многих известных ученых:

Весь 19 век прошел в изучении связи между нагрузкой и деформацией. По мере совершенствования способов измерения деформации, тем больше накапливалось фактов, свидетельствующих о том, что на микроуровне закон Гука не соблюдается. В 1849 г. Британской Королевской комиссией по железу "отменила" закона Гука.

Переход от изучения макроскопических деформация к микроскопическим (10^{-4} – 10^{-6}) позволил обнаружить новые закономерности в деформационном отклике металлов и сплавов. Обнаружены были такие явления как ползучести и релаксация напряжений, усталость, прямое и обратное последействие и т. п. Определенное представление о направленности исследований этого периода могут дать две приведенные ниже таблицы.

Усилиями многочисленной когорты ученых (Е.Шмид, В. Боас, Н.Мотт, Э.Холл, Р.Кан, А.А..Фридман, А.Ф.Иоффе, А. Зегер, Е.Н.Андраде, Р.Э.Тейлор, Е.Ораван, А.Н.Коттрелл, М. Фридель и многие многие другие) к концу второй половины XX века была создана система представлений о природе и закономерностях деформационного отклика металлов и сплавов при различных условиях нагружения.

Изложение базовых представлений о закономерностях деформационного поведении кристаллических, аморфных, поликристаллических металлов и сплавов в зависимости от структуры, схемы, температуры деформации и составляет предмет курса "Физические основы прочности и пластичности".

Линейная аппроксимация

Автор(ы)	Год	Предмет исследования
Гук и Мариотт	1676, 1780	Деформация как функция напряжения
Риккати, Мусшенбрук, Гравесанд, Кулон; Эйлер	До 1780	Ведение концепции модуля упругости. Начало экспериментальной механики твердого тела как науки: изучение Кулоном кручения в 80-х гг. XVIII века. Эксперименты по вязкости и пластичности (1784). Об определении значений констант упругости
Юнг	1807	Оценка фактов и мифов о модулях упругости в лекциях по натуральной философии. Математическая запись закона Гука (1804)

Гийом Вертгейм, Фарадей, Максвелл	1843	Определение *E* для 15 элементов и первое изучение эффектов температуры окружающей среды, предварительной истории обработки образцов, уровня нагружения и межатомного расстояния
Вертгейм	1843	Первые эксперименты с двух- и трехкомпонентными сплавами, включающие изучение влияния на модуль *E* химического состава и скорости нагружения для 64 сплавов.
Вертгейм	1844	Первое изучение зависимости значения модуля *E* от напряженности электрического и магнитного полей.

Вертгейм	1845—1846	Первое изучение упругости стекла, древесины и тканей человеческого тела
Вертгейм	1848	Первые эксперименты по определению коэффициента Пуассона, доказавшие неприменимость атомистической теории Пуассона — Коши для описания напряженно-деформированного состояния кристаллических тел
Кирхгоф	1859	Эксперименты по непосредственному определению коэффициента Пуассона
Корню.	1869	Эксперимент, в котором использовалась оптико-интерференционная техника для определения коэффициента Пуассона.

Фохт	1882	Эксперименты по изучению изотропности стекла и определению для него значений модулей упругости
Грюнайзен	1883	Эксперименты по проверке теоретической зависимости между постоянными упругости изотропного тела посредством независимого определения значений *E, p,* и V. Повторение эксперимента Кирхгофа по определению значения коэффициента Пуассона, выполненное в середине XX века.
Больцман	(1881 и последующие годы)	Осевое соударение стержней в предположении линейности функции отклика: эксперименты и сопоставление их результатов с теорией Сен-Венана (1867).

Хаузманингер	1936	Использование методики Пуйе (1844) измерения продолжительности контакта при ударе в эксперименте Больцмана и в аналогичных экспериментах, выполнявшихся на протяжении полустолетия
Фаннинг и Бассет	1940	Первое использование электротензометрических датчиков сопротивления для изучения профилей волн в эксперименте Больцмана:

Нелинейность при малых деформациях

Автор(ы)	Год	Предмет исследования
Бюффон	1741	Нелинейность зависимости между напряжением и деформацией для дерева при малых деформациях
Дюамель	1742	Нелинейность зависимости между напряжением и деформацией для дерева при малых деформациях
Готэ	1774	Нелинейность зависимости между напряжением и деформацией для дерева при малых деформациях
Гафа	1805	Первые эксперименты, связанные с термоупругостью

Дюпен	1815	Нелинейность зависимости между напряжением и деформацией для дерева при малых деформациях
Вильгельм Вебер	1830	Первые эксперименты, связанные с термоупругостью
Веберо	1835	Открытие упругого последействия
Ходкинсон	(1824—1844)	Эксперименты по нелинейному поведению дерева, железа и камня и введение понятия микропластичности
Кориолис и Вика	(1830—1834).	Открытие ползучести металлов

Л. Вика	1831	Открытие микродеформации:
Леблан	1839	Эксперименты по устойчивости остаточной деформации в железной проволоке
Савар Массон	(1837) (1841)	О явлении, открытом и известном под названием эффекта Портвена—Ле Шателье (1923)
Вертгейм	(1846—1847).	Эксперименты по упругости и прочности основных тканей человеческого тела
Вертгейм	(1844—1848)	Уменьшение модулей с увеличением остаточной деформации: эксперименты
	1849 г.	*«Отмена» закона Гука Британской Королевской комиссией по железу*

Кольрауш	1863	Эксперименты по релаксации напряжений в стекле и латуни: исток линейной вязкоупругости
Кельвина Томлинсона Фишера	1865 1881 1882	Уменьшение модулей с увеличением остаточной деформации: эксперименты и с металлами.
Мюллер	1882	Циклическое нагружение шелка-сырца

Джозеф Томпсон	1891	Первое точное инструментальное наблюдение нелинейности металлов при инфинитезимальных деформациях:
Хартиг	1893	Нелинейный закон: общая функция отклика в случае малых деформаций твердых тел
Бах — Шюле	1897	Переоткрытие параболической функции отклика Якова Бернулли (1695) и Ходкинсона (1824).

$\varepsilon = f(\sigma)$ *Мягкая* схема нагружения

$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ *Жесткая* схема нагружения