

531(049.3)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Mechanics of Solids. I. Ed. C. Truesdell (Encyclopedia of Physics. Chief Editor S. Flugge. Vol. VIa/1): James F. Bell. The Experimental Foundations of Solid Mechanics. Berlin—Heidelberg—New York, Springer-Verlag, 1973, 813 p., 481 f.

Очередной том VI а «Физической энциклопедии» (под общей редакцией С. Флюгге) посвящен экспериментальным методам, используемым в механике деформируемых твердых тел. Книга объемом 813 страниц (из которых 72 составляют хронологический, алфавитный и предметный путеводитель по изданию) содержит 481 иллюстрацию, 139 таблиц, охватывает около 900 источников за 336 лет и отражает результаты практически всех основных экспериментальных работ в области механики деформации.

Автор тома, профессор университета им. Дж. Гопкинса в Балтиморе (США) Джеймс Белл, активно работающий в области импульсного нагружения, пишет во введении: «Ни одна монография, посвященная экспериментальным основам настолько же старой, насколько и важной, области физики, как механика, не может ограничиваться основными результатами последних одного-двух десятилетий, избежав при этом принципиальных ошибок». Любой глобальный подход к объяснению того или иного вопроса должен, по мнению автора, содержать сопоставление нескольких достоверных наблюдений. Именно в последовательном осуществлении этого принципа — залог успеха книги Белла, взявшего на себя труд собрать и проанализировать с современных позиций классические экспериментальные работы выдающихся механиков — Гука, Я. Бернулли, Кольрауша, Баушингера, Тейлора и многих других.

В книге подробно изложены основные достижения экспериментальной механики; описана суть обнаруженных явлений и используемое экспериментальное оборудование; перечислены сотни авторов, в большинстве случаев не известных советскому читателю.

Поскольку при описании каждого отдельного явления Белл придерживается хронологической последовательности, вначале создается впечатление о чрезмерном увлечении автора историей вопроса (значительная часть приводимого материала относится к XVII—XIX векам), однако это скорее только отражает вклад, внесенный в экспериментальную механику в прошлом. По мнению Белла, эксперименты в области механики деформируемого твердого тела, выполняемые в XX веке, в значительной степени повторяют работы XIX века с единственной целью повышения точности, что дале-

ко не всегда приводит к качественно иным выводам. При этом обычно исчезает память об используемой классиками экспериментальной технике, а результаты их экспериментов, будучи однажды процитированы в поддержку опровергнутой затем теории, с годами зачастую приобретают обратное толкование. Есть и другая сторона «исторического» интереса: например, первые наблюдения микродеформации (Викет, 1831 г.) были осуществлены с использованием весьма простых экспериментальных средств, обеспечивших, однако, возможность разрешения деформации с чувствительностью $1 \cdot 10^{-7}$ (Грюнайзен, применив интерферометр, в 1906 г. работал уже с чувствительностью $1 \cdot 10^{-8}$), хотя в экспериментальном и теоретическом плане проблема не утратила актуальности и до наших дней. Это же относится к экспериментам по изучению температурной зависимости коэффициента Пуассона, анизотропии модулей упругости и др. При этом, описывая, например, эксперименты Кольрауша (1863 г.), которому принадлежит открытие и первое на высоком экспериментальном уровне количественное исследование явления релаксации напряжений, Белл справедливо сетует, что ни один из авторов просмотренных им современных статей по релаксации напряжений не ссылается (потому что не знает) на работы Кольрауша.

«Распалась связь времени»... Томпсон, исследовавший нелинейность при малых деформациях (1891 г.), считал, что он первым подвергает закон Гука экспериментальной проверке, не зная о работах опередившего его на 25 лет Кельвина, а также об экспериментах Томлинсона в предыдущем десятилетии. Все это в значительной степени восполняется книгой Белла, освещающей последовательность экспериментов, за которыми следовали основополагающие открытия — эффекта изменения объема при пластической деформации (Баушингер, 1879 г.), уменьшения модуля в процессе деформации (Вертгейм, 1844—1848 гг.; Кельвин, 1865 г.); эффекта, полученного в 1923 г. имя Портевана — Ле Шателье (открытого на самом деле Савартом еще в 1837 г. и независимо — Мессоном в 1841 г.) и многих других.

При этом читателю предлагаются не биографии механиков и даже не биографии открытий в области механики. Излагается история не людей, но инженерной мысли, поисков, находок и опровержений. Сюда в первую очередь относятся двадцатилетние (1923—1946 гг.) эксперименты Тейлора, приведшие его к созданию теории дислокаций, полувекровая (1909—1961 гг.) экспериментальная деятельность Бриджмена по исследованию гидростатического сжатия, экструзии материалов, многолетние (с 1948 г.) эксперименты самого Белла и т. п.

В целом книга подчинена логической, а не хронологической схеме и состоит, по сути дела (не считая введения), из трех частей. Первая часть посвящена экспериментальному наблюдению нелинейности в области малых деформаций, впервые отмеченной в 1690 г. Лейбницем на основании экспериментов Бернулли. Сюда относятся экспериментальные наблюдения нелинейности, введение понятия микропластичности, первые эксперименты по микродеформации, открытие явления ползучести (Кориолис и Викет, 1830—1834 гг.), термоупругости (Гаух, 1805 г. и Вебер 1830 г.), упругого последействия (Вебер, 1841 г.), нелинейности при циклическом нагружении (Фишер, 1882 г.). Здесь читатель найдет и результаты первых наблюдений вязкоупругости при измерении релаксации напряжений, изменения объема в ходе нагружения, влияния намагничивания на нелинейность при кручении, уменьшения модуля при увеличении степени деформации. В отдельный подраздел Белл выносит первое точное измерение нелинейности металлов при малой деформации (Томпсон, 1891 г.) и, как следствие, повторное открытие, вернее — подтверждение, параболической зависимости Я. Бернулли (1695 г.) и Ходгинсона (1824 г.).

Первая часть заканчивается кратким изложением последних работ по данному вопросу объединенных автором под названием «несколько примеров повторных «открытий» в XX веке», которые тем не менее дают важную количественную информацию для различных конкретных материалов. Сюда относятся эксперименты Пауэрс на бетоне (1938 г.), наблюдения Чалмерса «последействия» на монокристаллах свинца (1935 г.), измерения Лауренти и Понда (1966 г.) уменьшения модуля упругости в ходе деформации алюминия, данные самого Белла. В целом основной вывод данной части — нелинейность связи между напряжением и деформацией в области малых деформаций, а также зависимость модуля упругости от степени деформации — последовательно подтверждается экспериментами, проводимыми в течение 280 лет и осуществляемыми с 1811 г. — систематическим образом и, по мнению автора, с достаточной чувствительностью к деформации (Баушингер — 10^{-6} , 1879 г., Томпсон — 10^{-7} , 1891 г., Грюнайзен — 10^{-8} , 1906 г.). Качественно новые результаты, по мнению Белла, могут быть получены при разрешении деформации с чувствительностью 10^{-9} — 10^{-10} .

Вторая часть книги посвящена экспериментальному обоснованию и следствиям линейной аппроксимации связи между напряжением и деформацией в области малых деформаций. Здесь рассмотрены результаты экспериментальных измерений упругих констант (модулей упругости и коэффициента Пуассона) для различных материалов, в условиях различных схем и условий (температуры и скорости) нагружения — от экспериментов Гука, Мариотта, Эйлера, Леклерка, Кладни, Вертгейма и др. до современных ультразвуковых методов. Подробно обсуждается история введения модуля Юнга

1807 г.), первых измерений скорости звука в твердом теле, квазистатических методик изучения линейной упругости (Дулье, 1813 г.), экспериментов Кирхгофа (1859 г.) и Корню (1869 г.) по измерению коэффициента Пуассона (опять-таки затем анализируется попытка повторений экспериментов Кирхгофа в XX веке), исследование влияния на модули упругости анизотропии материалов (Фогт, 1882 г.).

По праву большое место в этой части занимают эксперименты Вертгейма (1842—1848 гг.) по определению абсолютных значений модуля нормальной упругости многих элементов и ряда двойных и тройных сплавов, а также по исследованию влияния на модуль состава и структуры материала, температуры и скорости испытаний, напряженности магнитного и электрического поля. Белл в этой части уделяет много внимания применению акустических методов для измерения упругих постоянных (по измерению скорости распространения упругих волн, их затуханию и т. д.) и сопоставлению результатов, полученных, в частности, ультразвуковым и квазистатическим методами. Часть заканчивается рассмотрением с позиций линейной механики таких релаксационных явлений, как термоупругость (термическое последствие) и вязкоупругость (внутреннее трение).

Третья часть посвящена экспериментам в области значительных деформаций, на участке деформационного упрочнения (прежде всего по изучению ползучести (Кориолис, 1830 г.)), обширным работам Треска по течению твердых тел (1864—1872 гг.), исследованию усталостного нагружения (Велер, 1863 г.), так называемого эффекта Баушингера (1886 г.) и т. д. Большое внимание уделено экспериментам по изучению влияния на деформируемость твердых тел приложения высоких гидростатических давлений в условиях выдавливания и экструзии широкого класса, в том числе неметаллических, материалов (Треска, 1873 г., Стринг, 1880 г., Тамман, 1902, Бриджмен, 1909—1961 гг.), позволившие еще в 1911 г. (фон Карман) наблюдать пластичность мрамора и песчаника. Отдельно рассмотрено влияние на величину предела упругости деформационного упрочнения (Чарстон, 1870 г., Людвик, 1919 г.), обобщены динамические характеристики деформации твердых тел, в том числе ударные эксперименты — от Дана (1897 г.), впервые с помощью фотооптических средств пытавшегося зафиксировать кризисную «ударная нагрузка — деформация» и Гопкинсона (1872 г.), впервые связавшим прочностные свойства материалов при динамическом нагружении (растяжении падающим грузом) с волновым характером распространения деформации. Многолетние эксперименты по выяснению правомерности экстраполяции пластического поведения материалов в условиях квазистатического нагружения на область динамических испытаний привели сначала к экспериментальному обнаружению неоднородного распределения деформаций при ударном нагружении (Дьюз, 1942—1946 гг.), к косвенным доказательствам волнового характера распространения пластической деформации (1942—1956 гг.) и затем, при участии самого Белла, к непосредственному измерению профиля волны деформации (с помощью дифракционной решетки, по смещению интерференционного пика, фиксируемого через фотоумножитель на осциллограф с разрешением в доли микросекунды).

В этой же части обсуждается проявление (в экспериментах начиная от Саварта, 1837 г.) эффекта Портевена — Ле Шателье (пилообразная кривая деформации) при медленном линейном приращении нагрузки, который связывают также с распространением волн деформации. Здесь рассмотрены также эксперименты по непосредственному изучению неомогенности деформации отдельных зерен поликристаллических материалов (Доусон, 1968 г.), анализируются факторы, определяющие собственно показатели механических свойств материалов. Рассмотрено влияние типа напряженного состояния и схемы нагружения (Гест, 1900 г.), широко представлены измерения предела упругости, текучести и сопротивления деформации ряда поли- и монокристаллических металлов и сплавов.

Значительное количество хорошо обобщенных цифровых данных, собранных Беллом, отличается широтой набора материалов (металлы, сплавы, резина, дерево, ткани человеческого тела, мрамор, и т. д.). Тщательность, с которой описаны методики получения той или иной информации, позволяют использовать данную книгу как справочное пособие по методам механических испытаний. Почти во всех случаях Белл дает по возможности исчерпывающую характеристику достоверности экспериментальных данных (число экспериментов, тип образцов, конструкцию и погрешность оборудования), особо отмечая состав и структурное состояние материала, строго анализируя возможность корректного сопоставления результатов аналогичных экспериментов за ряд лет.

Вопреки представлению о компилятивном и фрагментарном характере энциклопедических изданий по самому определению, данная книга весьма монографична. Авторское отношение к предмету отражено в построении тома, многочисленных сносках, сопоставлении оценок, полученных различными авторами. Многозначность изложения Белла, по-видимому, обязан опыту работы со студентами. Ретроспективный подход и хронологичность изложения не мешают, а скорее помогают книге быть весьма современной, чему способствуют четкие оценки каждого явления, гипотезы или методики с сегодняшних позиций. В значительной части представленные экспериментальные

данные могут рассматриваться как достаточно стабильные. При этом Белл четко оговаривает время, к которому относится истинное выяснение («закрытие») вопроса. Для других, «метастабильных» данных автор указывает на незаконченность исследований, отмечая динамику взглядов, широко используя наложение более поздних экспериментальных результатов или кривых, полученных расчетным путем. Следует отметить тот факт, что монография, изданная в 1973 г., содержит ссылки на новейшие экспериментальные данные (например, обнаружение ударных волн при деформации растяжением резины (Кольский, 1969 г.) вплоть до 1972 г.

Конечно, книга не свободна от некоторых недостатков, один из которых — недостаточно четкое оглавление отдельных подразделов и вообще некоторая непоследовательность в принципах оглавления, названия которого иногда отражают хронологию, в ряде случаев — авторов и далеко не всегда (что было бы оптимальным) — суть описываемых экспериментов. Другой недостаток, продолжающий оставаться хроническим для большей части американской научно-технической литературы, — незнание работ русских и советских ученых. В силу, возможно, личных пристрастий автора не всем явлениям уделено место, соответствующее их истинной важности.

Тем не менее по количеству обобщенного материала данный том является уникальным собранием сведений об экспериментальных методах исследования механических характеристик деформируемых твердых тел и представляет значительный интерес для растущего числа исследователей (теоретиков и экспериментаторов), посвятивших себя проблемам механики деформируемого твердого тела и физики прочности, а также инженерам самых разных отраслей промышленности, связанным с определением параметров механического поведения различных материалов.

Н. М. Фонштейн

Успехи физических наук, том 114, вып. 2

Редактор *В. В. Власов*

Технический редактор *Л. И. Курдянова*

Корректор *Н. Д. Дорохова*

Сдано в набор 1/VIII 1974 г. Подписано к печати 23/IX 1974 г. Бумага 70×108¹/₁₆. Физ. печ. л. 13+вкладна. Условн. печ. л. 18,38. Уч.-изд. л. 18,55. Тираж 4655 экз. Т-16626. Цена 1 р. 20 к.
Заказ № 0419

Издательство «Наука»

Главная редакция физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Трудового Красного Знамени Московская типография № 7 «Искра революции»
Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли
Москва, К-1, Трехпрудный пер., 9