

8. *Котляков В. М., Лосев К. С.* Исследование снежного покрова за рубежом.— В кн.: Снежный покров, его распространение и роль в народном хозяйстве. М.: Изд-во АН СССР, 1962, с. 59–86.
9. *Эльмесов А. М.* К вопросу о зависимости несущей способности снега от времени.— Тр. высокогорн. геофизич. ин-та, 1965, вып. 4, с. 35–40.
10. *Эльмесов А. М.* К вопросу о модели напряженно-деформируемого состояния снега.— Тр. Высокогорн. геофизич. ин-та, 1965, вып. 4, с. 35–53.
11. *Войтковский К. Ф.* Механические свойства льда. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 100 с.
12. *Раннелс Л. К.* Явление диффузии и релаксации во льду.— В кн.: Физика льда. Обзор докладов Междунар. симпоз. Мюнхен, 1968. Л.: Гидрометеиздат, 1973, с. 124–127.
13. *Kirgisa D.* Internal friction in ice.— Contrib. Inst. Low Temperature Sci., Ser. A, 1964, No. 18. 62 p.
14. *Анфилофьев Б. А., Эльмесов А. М.* Методика и некоторые результаты исследования реологических свойств снежного покрова при сдвиговых испытаниях.— Тр. Новосибир. ин-та инж. ж.-д. трансп., 1970, вып. 115, с. 95–106.
15. *Епифанов В. П.* Некоторые результаты экспериментальных исследований механических свойств ледяного покрова.— Изв. АН СССР, МТТ, 1985, № 2, с. 182–191.
16. *Виноградов С. Д.* Акустические наблюдения процессов разрушения горных пород. М.: Наука, 1964. 84 с.
17. *Канаев Л. А.* Об изменчивости свойств снега.— Тр. Среднеазиат. н.-и. гидрометеорол. ин-та, 1969, вып. 44(59), с. 25–42.
18. *Божинский А. Н.* О характеристиках структуры снега.— В кн.: Материалы гляциологических исследований. М.: Межвед. геофизич. комитет АН СССР, 1975, вып. 25, с. 116–121.
19. *Давурьев В. А., Дурьнин Ю. Ф., Слесаренко Ю. Е., Фролов А. Д.* Применение ультразвукового метода для изучения строения, состава и физико-механических свойств снежного покрова и оценки лавинной опасности.— В кн.: Снег и лавины Хибин. М.: Изд-во МГУ, 1967, с. 240–257.
20. *Болов В. Р., Залиханов М. Ч., Шабельников В. А.* О горизонтах разрыхления в толще снежного покрова и их значений в лавинообразовании.— Тр. Высокогорн. геофизич. ин-та, 1980, вып. 46, с. 21–28.
21. **Руководство по снеголавинным работам (временное).** Л.: Гидрометеиздат, 1965. 397 с.
22. *Королев А. И.* К вопросу о методике определения лавинной опасности.— Тр. Среднеазиат. н.-и. гидрометеорол. ин-та, 1967, вып. 30(45), с. 111–121.
23. *Епифанов В. П., Кудря В. П.* Метод оценки механических свойств вязкоупругих материалов при их ударном взаимодействии с индентором.— Завод. лаб., 1985, № 2, с. 64–66.
24. *Москалев Ю. Д.* Возникновение и движение лавин. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 152 с.
25. *Фомин А. Г.* Критерий устойчивости снежного покрова.— Тр. Новосибир. ин-та инж. ж.-д. трансп., 1970, вып. 115, с. 115–123.
26. *Мальгин В. А.* Исследование воздействия на снежный покров машин с гусеничным движителем.— Тр. Горьк. политехн. ин-та, 1971, т. 27, вып. 10, с. 58–62.
27. *Ишлинский А. Ю., Кондрагьева А. С.* О качении жестких и пневматических колес по деформируемому грунту.— В кн.: Тр. Совещания по проходимости колесных и гусеничных машин по целине и грунтовым дорогам. М.: Изд-во АН СССР, 1950, с. 68–88.

Москва

Поступила в редакцию
20.1.1985

УДК 539.41

СОПРОТИВЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ ЧИСТОМУ РАСТЯЖЕНИЮ И СЖАТИЮ

ЖУКОВ А. М.

Приведены опытные данные о модулях упругости на растяжение и сжатие некоторых металлов и полимеров, показывающие, что эти модули практически одинаковы. Установлено, что для чугуна, пенополистирола и сплава Д16Т сопротивление растяжению и сжатию в нелинейной области различно.

В последние годы интенсивно развивается разномодульная теория упругости, принимающая материал однородным, но имеющим разные модули упругости на растяжение и сжатие в фиксированных направлениях. В [1] собраны опытные данные о модулях упругости при растяжении и сжатии ряда материалов. Различие в модулях (по отношению к наименьшему значению) достигает весьма больших величин: для серого чугуна 33,3%, оргстекла 100% и стекломата АС-30 595%. В публикуемой работе рассматриваются результаты корректно выполненных опытов и описываются дополнительные опыты на сером чугуне и сплаве Д16Т.

Модули упругости оргстекла при комнатной температуре, приведенные в [1], равны 1344 МПа при растяжении и 2688 МПа при сжатии. По данным наших испытаний, проведенных более 25 лет тому назад, в которых деформации образцов изме-

n	ρ , кг/м ³	E , МПа	μ
Растяжение радиальных образцов			
10	17,5±0,4	135±6	—
19	26,4±0,3	216±6	—
10	31,0±0,7	259±9	0,21±0,03
10	35,6±0,6	277±17	0,21±0,03
11	45,5±1,2	482±61	0,27±0,03
Сжатие радиальных образцов			
30	17,4±0,2	133±4	—
10	26,4±0,5	212±8	—
15	31,2±0,2	247±4	0,21±0,01
9	34,2±0,7	284±21	0,23±0,03
10	46,1±0,9	574±37	0,25±0,01
Растяжение продольных образцов			
10	17,1±0,4	164±7	—
9	26,2±0,4	274±15	—
10	29,9±0,8	327±7	0,27±0,03
10	35,1±1,0	348±21	0,24±0,02
12	42,6±0,3	526±59	0,26±0,04
Сжатие продольных образцов			
10	17,1±0,4	158±5	—
8	26,2±0,1	292±18	—
10	30,8±0,5	321±21	0,26±0,02
10	33,5±1,2	314±22	0,22±0,01
10	44,1±1,2	487±27	0,25±0,02

ряды оптико-механическим тензометром Мартенса, эти модули равны 2680 и 2650 МПа соответственно. Различие составляет всего 1,1%.

На ст. 30ХГСА в нормализованном состоянии было получено: модуль Юнга при растяжении $E_+ = 201\ 100$ МПа на одном образце и модуль Юнга при сжатии $E_- = 200\ 100$ МПа на другом. Различие составляет 0,5%. Такое же различие получено на третьем образце, который подвергался сжатию до напряжения, меньшего предела пропорциональности, а после разгрузки — растяжению. В этих опытах деформации вновь измерялись прибором Мартенса [2].

Ст. 45, закаленная с последующим отпускком, была испытана на растяжение (восемь образцов) и на сжатие (пять образцов). [3]. Деформации измеряли индуктивным тензометром, подвергавшимся градуировке. Средние значения E_+ и E_- оказались равными 201 800 и 202 800 МПа соответственно. Различие между ними составляет около 0,5% вместо 2,9 для ст. 40, приводимой в [1].

Стеклопластик, изготовленный из стеклоткани ТС-10/80 и эпоксидно-фенольной смолы 5-211БН, имеет различие в E_+ и E_- при нагружении вдоль утка не более 0,8% [4].

При скорости нагружения 0,147 МПа/с был испытан фурфуролацетоновый мономер, используемый для изготовления полимербетона, обладающего высокой стойкостью к действию агрессивных сред. Испытания дали $E_+ = E_- = 3360$ МПа.¹

На чистое растяжение и сжатие испытывался серый чугун. Образцы были изготовлены из плиты толщиной 60 мм. На растяжение испытаны образцы с диаметром рабочей части 10 и длиной 95 мм, а на сжатие — цилиндрические образцы длиной 90 и диаметром 15 мм. Деформации измеряли прибором Мартенса на базе 50 мм.

При том и другом виде нагружения испытано по пять образцов. В результате испытаний получено: $E_+ = 90\ 200 \pm 8800$ и $E_- = 92\ 200 \pm 2900$ МПа, где здесь и в последующем доверительные интервалы соответствуют доверительной вероятности 95%. Разница в средних значениях модулей составляет 2,2 вместо 33,3%, указанных в [1].

Более 12 лет тому назад нами проведено испытание на растяжение и сжатие пенополистирола пяти плотностей. Образцы изготовлялись из круглых дисков диаметром около 500 и толщиной 110 мм в радиальном направлении и в направлении толщины. Была выявлена анизотропия материала. По этой причине пришлось испытать десять партий образцов от восьми и более в каждой партии [5]. Образцы для

¹ Н. А. Жигунова испытала полимербетон, в качестве связующего которого использован указанный мономер. Наполнителем служили щебень с максимальным линейным поперечным размером 1,5 мм, песок и адезитовая мука. На сжатие испытаны цилиндрические образцы диаметром 15 мм, а на растяжение — плоские образцы толщиной 10 и шириной 20 мм. В результате испытаний получено $E_+ = 12\ 000$ и $E_- = 12\ 300$ МПа. Разница в модулях составляет 2,5%.

Таблица 2

N	σ_p	σ_{s1}	σ_{s2}
6	602	632	642
7	612	632	692
X ₊	607	632	667
5	647	671	677
10	672	692	693
13	590	622	626
X ₋	636	662	672

Таблица 3

N	E	σ_p	σ_s
2	79 400	58,8	122,5
3	96 100	49,1	116,5
4	85 300	34,3	110,7
5	95 200	29,4	103,0
6	95 200	41,2	119,5
X ₊	90 200	42,2	114,7
2	89 200	73,5	—
3	92 200	83,3	211,7
5	93 100	83,3	211,7
6	93 100	63,8	206,0
7	95 200	63,8	222,0
X ₋	92 200	73,6	212,5

испытаний на растяжение и сжатие имели размеры (мм): длина 110 и диаметр около 30.

Испытания проводились на машине Т-56, обладающей погрешностью измерения усилий, не превышающей 0,1%. Деформации измерялись прибором Мартенса на базе 50 мм.

В табл. 1 приведены средние значения плотности ρ (кг/м³), модуля упругости E (МПа), коэффициента Пуассона μ и их доверительные интервалы (n — количество образцов, испытанных в каждой партии).

Для фиксированных значений r в семи случаях $|E_+ - E_-| \leq \epsilon_r$ и в трех $|E_+ - E_-| < 2\epsilon_r$, где ϵ_r — наибольшее из двух значений половины доверительного интервала. Разность $E_+ - E_-$ имеет как положительные, так и отрицательные значения.

Отметим, что модули упругости определялись по наклону начального линейного участка диаграммы деформирования, распространяющегося, как правило, почти до предела пропорциональности.

Испытанные материалы имеют разное строение и обладают различными свойствами. Для них практически получено совпадение E_+ и E_- . Из этого следует, что основная гипотеза разномодульной теории упругости не имеет опытного подтверждения.

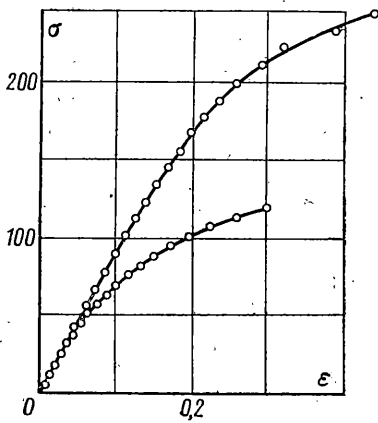
В расчетах на прочность и жесткость элементов конструкций, работающих на изгиб в упругой области, с практической достоверностью можно принимать $E_+ = E_-$. По-видимому, равенство модулей упругости существует и для обычных бетонов. Подтвердить это могут корректно поставленные опыты.

Вопрос о законах упрочнения материалов при растяжении и сжатии в нелинейной области, по нашему мнению, недостаточно изучен. Объясняется это, видимо, тем, что испытания на сжатие значительно сложнее, чем на растяжение.

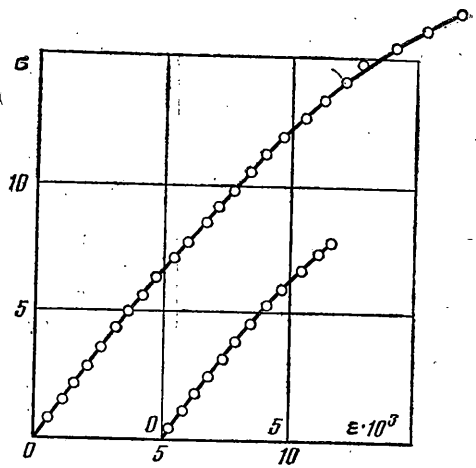
В условиях сжатия возникает потеря устойчивости образца при сравнительно малых деформациях. Для повышения критического напряжения приходится уменьшать длину образца, сокращая тем самым участок, на котором напряженное состояние однородно, а также добиваться более точного центрирования образца. Последнее сопряжено с немалыми трудностями.

В упругой области влияние внецентренности приложения нагрузки можно полностью исключить, используя двусторонние приборы, измеряющие деформации образца. За счет различия упрочнения в наиболее напряженных волокнах, если по ним производить измерения деформаций, исключить влияние внецентренного изгиба нельзя. Его можно снизить только путем уменьшения эксцентриситета.

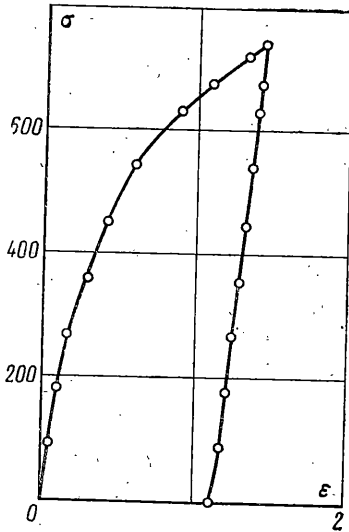
До недавнего времени основные характеристики строительных материалов (камень, бетон, дерево) определялись испытаниями на сжатие образцов в виде кубиков или коротких цилиндров, а деформации в лучшем случае измерялись по перемещению опорных плит. За счет трения по торцам и обмятия плит в таких образцах возникает сложное и неоднородное по объему напряженное состояние, которое невозможно рассчитать теоретически. При обработке же результатов испытаний этой неоднородностью пренебрегалось и тем допускалась грубая ошибка, которая не



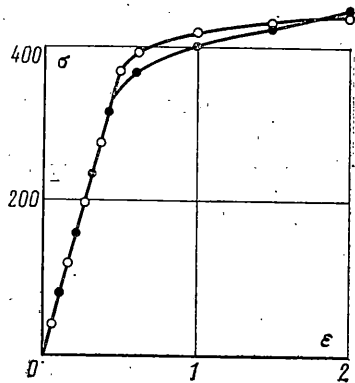
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

позволяла даже приближенно определить фактическое сопротивление материалов сжатию.

При испытании коротких образцов из пластичных материалов на некоторой стадии они приобретают форму бочки. Эту бочку иногда обтачивают, превращая образец в прямой круглый цилиндр, и вновь испытывают для получения диаграммы сжатия до больших значений относительно укорочения. Незаконность этого метода очевидна.

Ст. 30ХГСА в нормализованном состоянии испытывалась на растяжение (два образца, $N=6, 7$) и на сжатие (три образца, $N=5, 10, 13$). Результаты этих испытаний представлены в табл. 2, где σ_p — предел пропорциональности, σ_{s1} — предел текучести по допуску 0,1%, σ_{s2} — предел текучести по допуску 0,2% остаточной деформации (X_+, X_- — средние значения напряжений в МПа).

Из таблицы видно, что осредненная кривая сжатия располагается несколько выше соответствующей кривой растяжения. Различия в средних значениях σ_p , σ_{s1} и σ_{s2} по отношению к наименьшему составляют менее 5%. Этим различием в практических расчетах можно пренебречь, так как оно лежит в рамках разброса опытных данных.

В табл. 3 собраны результаты испытаний на растяжение ($N=2-6$) и сжатие ($N=1, 3, 5, 6, 7$) серого чугуна, где σ_s — предел текучести по допуску 0,1%. Данные этой таблицы были использованы для определения доверительных интервалов. В случае растяжения получено $\sigma_p=42,2 \pm 14,5$ МПа, $\sigma_s=114,7 \pm 10$ МПа, а в случае сжатия $\sigma_p=73,6 \pm 12,2$ МПа, $\sigma_s=212,5 \pm 3$ МПа.

Как видно, разброс данных при растяжении больше, чем при сжатии. Видно, что σ_p и σ_s в условиях сжатия почти в два раза больше, чем в условиях растяжения.

На фиг. 1 изображены кривые деформирования образца 5 при растяжении:

ρ , кг/м ³	σ_p , МПа	σ_l , МПа	ε_b , %
Растяжение радиальных образцов			
17,5	0,26±0,03	0,85±0,07	0,70±0,07
26,4	0,30±0,02	0,85±0,04	0,49±0,03
31,0	0,27±0,02	0,86±0,07	0,43±0,03
35,6	0,26±0,03	0,77±0,11	0,40±0,09
45,5	0,29±0,03	1,35±0,19	0,40±0,10
Сжатие радиальных образцов			
17,4	0,28±0,01	1,71±0,06	1,71±0,09
26,4	0,41±0,04	2,78±0,10	1,70±0,14
31,2	0,84±0,06	4,03±0,02	1,94±0,08
34,2	1,07±0,08	3,56±0,67	1,31±0,30
46,1	2,41±0,09	7,98±0,56	1,74±0,22
Растяжение продольных образцов			
17,1	0,32±0,04	0,75±0,06	0,47±0,05
26,2	0,30±0,03	0,75±0,05	0,35±0,11
29,9	0,32±0,05	0,80±0,05	0,27±0,03
35,1	0,28±0,04	0,76±0,11	0,26±0,07
42,6	0,33±0,04	1,45±0,24	0,37±0,08
Сжатие продольных образцов			
17,1	0,38±0,03	1,54±0,14	1,11±0,13
26,2	0,50±0,09	2,90±0,10	1,19±0,17
30,8	0,90±0,05	3,05±0,20	0,98±0,02
33,5	0,93±0,08	3,30±0,21	0,98±0,04
44,1	1,17±0,12	7,27±0,56	1,77±0,22

(нижняя кривая) и образца 7 при сжатии (верхняя кривая). Для этих образцов модули упругости одинаковы, но в нелинейной области кривые деформирования различны.

В табл. 4 собраны значения σ_p , предела прочности σ_b и деформации при разрушении ε_b в условиях растяжения пенополистирола. В условиях сжатия σ_b и ε_b соответствуют моменту потери устойчивости образцов.

Из таблицы видно, что σ_p , σ_b и ε_b имеют большие значения при сжатии, чем при растяжении. На фиг. 2 представлены кривые растяжения (нижняя кривая) и сжатия (верхняя кривая), полученные на двух образцах одинаковой плотности и имеющих равные модули E_+ и E_- .

В [2] приведены кривая растяжения за пределами упругости, разгрузки и последующего сжатия, а также кривая сжатия в пластическую область, разгрузки и последующего растяжения ст. 30ХГСА. Они наглядно показали, что кривая последующего деформирования имеет существенное отличие от кривой начального деформирования. Это отличие только частично отражает эффект Баушингера (уменьшение предела текучести пластически деформированного металла при изменении знака нагрузки на обратный).

Известно, что естественное старение восстанавливает упругие свойства пластически деформированного металла. На фиг. 3 приведена кривая сжатия образца, полученная через 42 суток после удлинения образца из ст. 30ХГСА на 3,2%. Криволинейная зависимость σ от ε не изменилась по сравнению с аналогичной, полученной сразу же после растяжения. Отсюда можно заключить, что естественное старение металла не устраняет эффект Баушингера в его расширенном понимании.

Прутки из алюминиевого сплава, как правило, изготавливаются прессованием, которое создает направленный процесс пластического деформирования. В основном металл течет вдоль оси прутка, вызывая его удлинение.

Если последнее справедливо, то кривые растяжения и сжатия в направлении оси прутка из алюминиевого сплава должны различаться. Для проверки этого факта были выполнены специальные опыты на сплаве Д16Т. Образцы на растяжение имели диаметр около 7 мм, а на сжатие — около 28 мм и длину 100 мм. При каждом режиме нагружения испытано пять образцов. Получены следующие средние значения модулей упругости: $E_+ = 74\ 800$ и $E_- = 74\ 500$ МПа. Разница в модулях составляет всего 0,4%.

На фиг. 4 представлены в условных напряжениях осредненные кривые растяжения (светлые точки) и сжатия (темные точки) сплава Д16Т. В условиях сжатия образцы теряли устойчивость при $\varepsilon = 2\%$. По пределам пропорциональности разница составляет около 15%, а по пределам текучести — около 7%. С увеличением ε расхождение кривых уменьшается.

Из изложенного следует, что корректно проведенные опыты для упомянутых выше материалов дали практически одинаковые модули при растяжении E_+ и сжа-

тие E ... Законы упрочнения при растяжении и сжатии в нелинейной области при этом различны. Таким образом, можно заключить, что основная гипотеза разномодульной теории упругости [1] не имеет экспериментального подтверждения.

Автор благодарит Р. А. Авакяна и В. Б. Сопотову за участие в проведении испытаний для отдельных материалов (серый чугун).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Амбарцумян С. А.* Разномодульная теория упругости. М.: Наука, 1982. 317 с.
2. *Жуков А. М.* Некоторые особенности поведения металлов при упругопластическом деформировании.— В кн.: Вопросы теории пластичности. М.: Изд-во АН СССР, 1961, с. 30–57.
3. *Кочин О. М.* Исследование поведения ст. 45 при повторном нагружении обратного знака.— Тр. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та физико-техн. и радиотехн. измерений, 1976, вып. 26 (56), с. 19–25.
4. *Авакян Р. А., Кочин О. М.* Исследование упругих деформационных и прочностных характеристик полимерного композита при растяжении и сжатии.— Тез. докл. конф. по композитным материалам, 1981, вып. 1, с. 173–174.
5. *Жуков А. М.* Свойства пенополистирола ПС-Б при чистом растяжении и сжатии.— Механика полимеров, 1971, № 5, с. 808–812.

Москва

Поступила в редакцию
16.X.1983