

О ПРОЧНОСТНЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

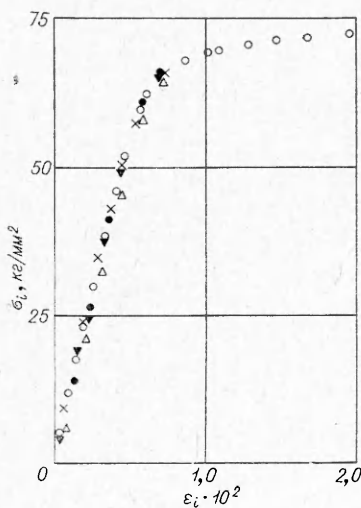
А. Ф. Никитенко, О. В. Соснин,
Н. Г. Торшенин, И. К. Шокало

(Новосибирск)

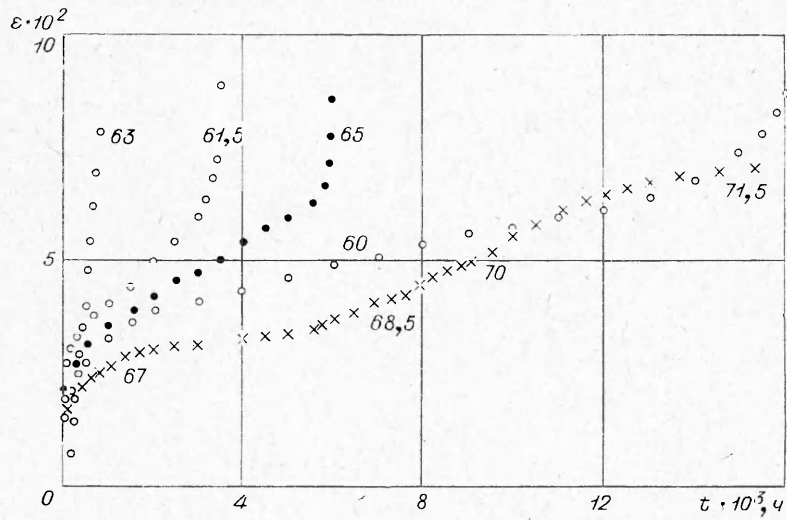
Экспериментальные результаты данной работы получены на том же титановом сплаве, что в [1], но в более широком диапазоне напряжений и с длительностями процессов до $2 \cdot 10^4$ ч. Программа экспериментов состояла из трех серий: 1) определение упругоупругих свойств материала при различных комбинациях растягивающего усилия и крутящего момента; 2) определение свойств ползучести и длительной прочности материала при одноосном нагружении; 3) определение свойств ползучести и длительной прочности материала при различных комбинациях растяжения и кручения. Как и в [1], направление наибольшего размера листа толщиной 20 мм, из которого вырезались заготовки для образцов, в дальнейшем условно называется продольным направлением, а перпендикулярное ему в плоскости листа — поперечным направлением. Вся экспериментальная программа проведена на трубчатых образцах наружным и внутренним диаметром соответственно 17 и 15 мм и длиной рабочей части 50 мм. После изготовления образцы никакой термообработке не подвергались.

На фиг. 1 представлены результаты экспериментов по определению упругоупругих свойств материала. На диаграмме светлые точки, темные треугольники и крестики — результаты экспериментов на продольных образцах соответственно при чистом растяжении, чистом кручении и при отношении $\sqrt{3}\tau/\sigma = 0,577$. Светлые треугольники и темные точки — данные испытаний поперечных образцов соответственно при чистом кручении и отношении $\sqrt{3}\tau/\sigma = 0,577$. Здесь $\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$, $\varepsilon_i = \sqrt{3\nu^2/4(1 + \mu)^2 + \varepsilon^2}$, μ — коэффициент Пуассона (найден из одноосных экспериментов на растяжение и сжатие) принят равным 0,37. В экспериментах с различными комбинациями σ и τ в процессе ступенчатой загрузки отношение τ/σ выдерживалось постоянным, т. е. осуществлялось «простое нагружение». Проведены эксперименты и в режиме не «простого нагружения» в пределах упругой области, при этом отклонений экспериментальных точек от представленной диаграммы не наблюдалось. Результаты фиг. 1, а также аналогичные данные при одноосных процессах, полученные в работе [1], показывают, что в смысле упругоупругих свойств материал можно считать полностью изотропным с одинаковыми свойствами на растяжение и сжатие.

Совершенно другая картина прочностных свойств материала при длительных процессах. На фиг. 2 представлены



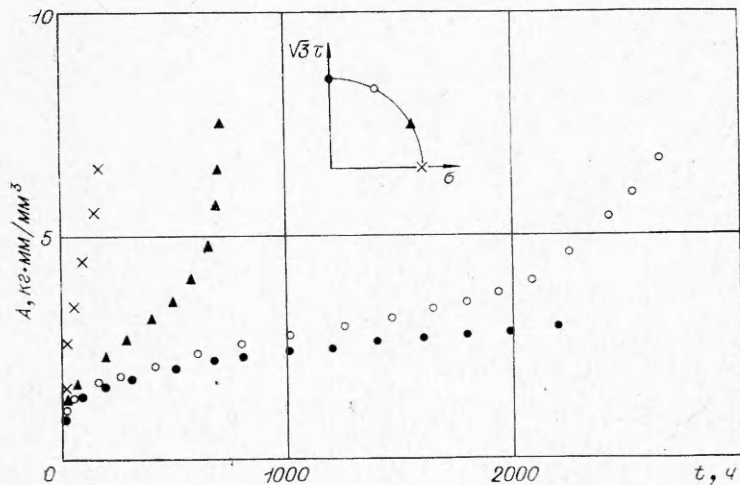
Фиг. 1



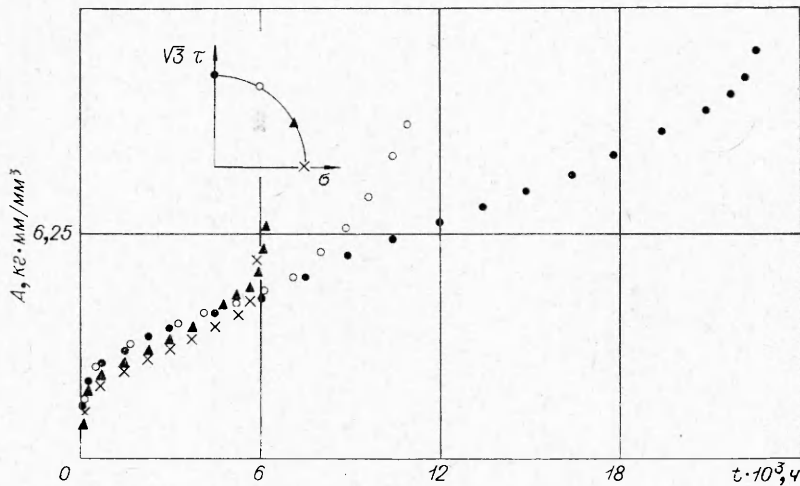
Ф и г. 2

диаграммы ползучести $\varepsilon = \varepsilon(t)$, полученные при растяжении образцов продольного направления (светлые точки) и образцов из поперечного направления (темные точки). Цифры у диаграмм обозначают величину начального напряжения в кг/мм^2 , крестиками отмечены данные по ползучести при сжатии образца из продольного направления. Последний эксперимент проводился со ступенчатым увеличением напряжения от $\sigma = 67$ на первой ступени до $\sigma = 71,5$ кг/мм^2 на последней.

Все эксперименты при растяжении проводились при постоянной внешней нагрузке P_0 . Отсюда из условия несжимаемости $F_0 l_0 = Fl$ следует, что напряжение в образце монотонно возрастало по зависимости $\sigma_t = \sigma_0 l/l_0 = \sigma_0(1 + |\varepsilon|)$. В экспериментах при сжатии, если оставить нагрузку постоянной, напряжение будет убывать по зависимости $\sigma = \sigma_0(1 - |\varepsilon|)$. Чтобы поставить процессы в одинаковые условия, нагрузка в экспериментах при сжатии корректировалась по зависимости $P =$



Ф и г. 3



Ф и г. 4

$= P_0(1 + |\varepsilon|)/(1 - |\varepsilon|)$, что вследствие несжимаемости вело к увеличению напряжения в образце в той же закономерности, что и при растяжении.

Представленные на фиг. 2 диаграммы отчетливо показывают, что в смысле процессов ползучести материал резко анизотропен и обладает разными свойствами на растяжение и сжатие. Длительность до разрушения при растяжении продольных образцов в 30 раз меньше длительности до разрушения поперечных образцов, растягиваемых тем же усилием, разница же в длительностях до разрушения при растяжении и сжатии достигает нескольких порядков.

Этот вывод подтверждают эксперименты, проведенные при различных комбинациях растяжения и кручения трубчатых образцов, вырезанных из продольного направления. На фиг. 3 представлены результаты экспериментов в виде диаграмм $A = A(t)$, где $A(t)$ — величина рассеянной в процессе ползучести удельной энергии. Эксперименты проводились при одной и той же величине интенсивности напряжений $\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = 65 \text{ кг/мм}^2$, знаки на диаграммах соответствуют знакам схемы, изображенной в центре вверху фиг. 3. Чтобы иметь возможность сопоставлять диаграммы $A = A(t)$, соответствующие различным комбинациям σ и τ , с диаграммой чистого растяжения так же, как и в экспериментах при сжатии, исходные осевая нагрузка P_0 и крутящий момент M_0 корректировались по зависимостям

$$P = P_0(1 + \varepsilon')/(1 + \varepsilon), \quad M = M_0(1 + \varepsilon')/(1 + \varepsilon),$$

где ε — осевая деформация на текущее время в проводимом эксперименте; $\varepsilon' = A(t)/\sigma_i$ — осевая деформация, которая соответствовала бы текущему уровню рассеянной энергии $A = A(t)$ в эксперименте при растяжении той же интенсивности напряжений.

Из фиг. 3 видно, что длительность процессов ползучести в экспериментах, напряженное состояние в которых ближе к чистому кручению, резко увеличивается. Как известно [2], для изотропных материалов процессы ползучести для $\sigma_i = \text{const}$ и различных комбинаций компонент напряжений практически одинаковы.

Несмотря на резко выраженную анизотропию свойств ползучести материала, гипотеза подобия между девиаторами напряжений и прираще-

Т а б л и ц а 1

Время, ч	$\varepsilon \cdot 10^2$	$\gamma \cdot 10^2$	ε/γ	Время, ч	$\varepsilon \cdot 10^2$	$\gamma \cdot 10^2$	ε/γ
$\sigma=32,5 \text{ кг/мм}^2, \tau=32,5 \text{ кг/мм}^2,$ $\sigma/3\tau=0,333$				$\sigma=56,4 \text{ кг/мм}^2, \tau=18,8 \text{ кг/мм}^2,$ $\sigma/3\tau=1$			
311	1,409	4,372	0,322	48	2,255	2,151	1,048
503	1,701	5,242	0,324	128	2,841	2,666	1,065
1008	2,042	6,421	0,318	192	3,195	3,027	1,055
1511	2,380	7,519	0,316	288	3,691	3,558	1,037
2015	2,902	9,029	0,321	376	4,066	3,925	1,036
2519	3,242	10,236	0,317	472	4,571	4,434	1,031
2553	4,422	13,800	0,320	575	5,358	5,214	1,028
2623	4,712	14,691	0,321	672	7,144	7,111	1,000
2647	4,854	15,187	0,320	691	8,819	8,981	0,982

ний деформаций ползучести $\Delta\varepsilon/\Delta\gamma = \sigma/3\tau$ выполняется достаточно удовлетворительно вплоть до разрушения материала. Соответствующие данные для продольных образцов приведены в табл. 1. Отсюда следует, что подобие между девиаторами напряжений и деформаций (или их скоростей) является совершенно недостаточным признаком изотропности среды.

На фиг. 4 приведены результаты экспериментов на растяжение и кручение трубчатых образцов, вырезанных из поперечного направления. Во всех представленных здесь экспериментах интенсивность напряжений та же, что и в предыдущей серии ($\sigma_i = 65 \text{ кг/мм}^2$), знаки на диаграммах соответствуют знакам схемы. В табл. 2 приведены величины деформаций и их отношений для некоторых экспериментов с различными комбинациями напряжений растяжения и кручения. Если не учитывать третью стадию процесса ползучести, то из фиг. 4 и табл. 2 можно сделать совершенно ошибочный вывод об изотропии свойств ползучести рассматриваемого материала. По-видимому, с изменением напряженного состояния от чисто-

Т а б л и ц а 2

Время, ч	$\varepsilon \cdot 10^2$	$\gamma \cdot 10^2$	ε/γ	Время, ч	$\varepsilon \cdot 10^2$	$\gamma \cdot 10^2$	ε/γ
$\sigma=32,5 \text{ кг/мм}^2, \tau=32,5 \text{ кг/мм}^2,$ $\sigma/3\tau=0,333$				$\sigma=56,4 \text{ кг/мм}^2, \tau=18,8 \text{ кг/мм}^2,$ $\sigma/3\tau=1$			
				9575	4,856	17,159	0,283
				10007	5,447	18,689	0,291
500	0,842	3,273	0,257	10513	5,816	19,974	0,291
1007	1,010	3,960	0,255	10967	6,371	22,282	0,286
1511	1,066	4,191	0,254				
2015	1,291	4,827	0,267				
2519	1,512	5,640	0,268				
3023	1,707	6,361	0,268	504	2,833	3,070	0,924
3527	1,803	6,709	0,269	1008	3,350	3,644	0,919
4031	1,928	7,199	0,268	1512	3,546	3,859	0,919
4535	2,094	7,834	0,267	2016	3,717	4,070	0,913
5039	2,195	8,222	0,267	2520	4,000	4,375	0,914
5543	2,287	8,595	0,266	3024	4,389	4,814	0,912
6047	2,516	9,258	0,272	3504	4,655	5,097	0,913
6551	2,828	10,385	0,272	4008	5,082	5,567	0,913
7055	3,106	11,230	0,276	4512	5,310	5,851	0,907
7559	3,391	12,215	0,278	5016	5,705	6,268	0,910
8015	3,627	13,070	0,277	5520	6,048	6,610	0,915
8567	4,156	14,817	0,280	6024	6,968	7,595	0,917
9071	4,399	15,671	0,281	6122	7,493	8,196	0,914
				6192	8,190	9,001	0,910

го растяжения к чистому кручению, с одной стороны, начинает влиять разупрочняющий эффект свойств ползучести продольного направления, с другой — упрочняющий эффект свойств ползучести сжатия. Как показывают эксперименты на материалах с разными свойствами на растяжение и сжатие, различие в свойствах наиболее сильно сказывается в третьей стадии, что наглядно иллюстрируется на фиг. 4.

Из представленных на фиг. 4 результатов следует, что не только подобие между девиаторами тензоров напряжений и скоростей деформаций, но и эквивалентность процессов ползучести для напряженных состояний одной и той же интенсивности на первых двух стадиях не является достаточным признаком изотропности среды.

Изложенные выше результаты наглядно показывают сложность прочностных свойств титановых сплавов и невозможность применения к ним модели изотропного тела. Для описания процессов в таких средах необходимо построение теории, учитывающей ее реальные свойства. Некоторые из возможных подходов в построении таких теорий рассмотрены в работах [3—5].

Поступила 10 XII 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитенко А. Ф., Соснин О. В., Торшенин Н. Г., Шокало И. К. О ползучести упрочняющихся материалов с разными свойствами на растяжение и сжатие.— ПМТФ, 1971, № 2.
2. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М., «Наука», 1966.
3. Никитенко А. Ф. О влиянии третьего инварианта девиатора напряжений на ползучесть неупрочняющихся материалов.— ПМТФ, 1969, № 5.
4. Соснин О. В., Шокало И. К. О применимости теории старения к описанию ползучести анизотропных материалов.— «Проблемы прочности», 1971, № 5.
5. Соснин О. В., Шокало И. К. Энергетический вариант теории ползучести и длительной прочности. Сообщение 2. Ползучесть и разрушение материалов с начальным упрочнением.— «Проблемы прочности», 1974, № 1.

УДК 639.1

О НЕКОТОРОЙ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ И РАЗРУШЕНИЕМ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПОД НАГРУЗКОЙ

М. Г. Петроз

(Новосибирск)

С 1953 г. [1] С. Н. Журковым и его сотрудниками систематически публикуются результаты исследований температурно-временной зависимости прочности твердых тел под нагрузкой. К настоящему времени накоплен огромный экспериментальный материал и получено подтверждение целесообразности кинетического подхода к проблеме прочности и взаимосвязи между деформированием и разрушением [2]. В данной работе устанавливается еще одна связь деформирования с разрушением при одноосном растяжении, находящаяся в согласии с описанным термофлуктуационным механизмом разрыва атомных связей при действии внешних сил.

Если построить зависимости логарифма удельной энергии деформирования от напряжения, то они окажутся линейными в довольно широком диапазоне температур и напряжений, причем каждой температуре соот-