

РЕЛАКСАЦИЯ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

В. С. Наместников

(Новосибирск)

1. Релаксация напряжений является одним из случаев ползучести при переменных нагрузках. В условиях сложного напряженного состояния релаксация мало изучена. По-видимому, первой экспериментальной работой, посвященной этому вопросу, была статья Марина и Гриффита [1]. В ней приводятся результаты трех опытов по релаксации, выполненных на алюминиевом сплаве 3S-0 на тонкостенных трубчатых образцах: при простом растяжении, при простом кручении, при совместном кручении и растяжении, в котором удерживались постоянными длина образца и отношение главных напряжений. Опыты имели целью проверку теории ползучести, выдвинутой авторами в этой статье.

Позднее вышла работа Джонсона, Гендерсона и Матхура [2], в которой приводятся результаты девяти опытов на релаксацию при совместном кручении и растяжении и трех — при простом кручении выполненных на тонкостенных трубчатых образцах из алюминиевого сплава RR-59 и магниевого сплава. В опытах удерживалась постоянной одна из деформаций и производился пропорциональный сброс осевого усилия и крутящего момента. Сравнение полученных данных с теорией старения типа течения показало их соответствие один другому в пределах $\pm 18\%$.

2. В работе [3] было показано, что при выполнении гипотезы пропорциональности девиаторов

$$\dot{p}_{ij} - \delta_{ij} \dot{p}_* = \Lambda (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_*) \quad (1)$$

или

$$p_{ij} - \delta_{ij} p_* = \Lambda (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_*) \quad (2)$$

девиатор релаксирующих напряжений пропорционален девиатору начальных напряжений

$$\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_* = \Lambda^\times (\sigma_{ij}^\circ - \delta_{ij} \sigma_*^\circ), \quad \Lambda^\times = \exp \left(-2G \int_0^t \Lambda dt \right) \quad (3)$$

Здесь σ_{ij} — компоненты напряжений, δ_{ij} — символы Кронекера (крюжочек означает начальное состояние), p_{ij} — компоненты деформации ползучести (под деформацией ползучести понимается разность полной и начальной деформаций). p_* и σ_* — средняя деформация ползучести и среднее напряжение соответственно.

Этот вывод справедлив не только тогда, когда начальные деформации упругие, но и когда они пластические, так как при релаксации происходит разгрузка, а она всегда упругая. Предполагается также, что все полные деформации постоянны.

В случае релаксации напряжений закрученной и растянутой тонкостенной трубы при постоянных полных деформациях сдвига и удлинения из (3) в предположении упругой несжимаемости материала следует, что

$$\tau / \sigma = \tau^\circ / \sigma^\circ \quad (4)$$

где σ и τ — нормальное и касательное напряжение соответственно.

3. Выполнение соотношения (4) означает удовлетворение гипотезы пропорциональности девиаторов. Экспериментальная проверка этого соотношения проводилась на тонкостенных трубчатых образцах при совместном кручении и растяжении.

В качестве испытательной установки использовалась применявшаяся ранее в опытах на ползучесть машина [4], к которой было изготовлено два электронных приспособления, позволяющих удерживать постоянными сдвиг и удлинение. В одном из них, выполненном Н. С. Даниловым, в качестве датчиков деформации использовались индуктивные датчики, а в другом, выполненном Ю. Ф. Воробьевым, — пневмодатчики. Оба приспособления показали примерно одинаковые результаты. Большинство опытов проведено со вторым приспособлением.

Опыты производились на образцах из дуралюмина Д16Т и меди при 150° . Материал поставлен в виде прутка и термообработке не подвергался. Всего было проведено восемнадцать экспериментов. Продолжительность опытов колебалась от 1 до 56 час. Методика опытов, форма и размеры образца те же, что и в предыдущих экспериментах [4]. Прогрев образца до заданной температуры и ее стабилизация занимали сутки на дуралюминиевом образце и четыре часа на медном.

Программа экспериментов заключалась в следующем. К образцу прикладывались крутящий момент и осевая сила путем плавного пропорционального нагружения. При достижении заданной нагрузки включалось приспособление, автоматически поддерживающее постоянными удлинение и сдвиг. С момента конца загрузки и до включения приспособления проходило не более 30—45 сек. Деформация удлинения удерживалась постоянной с точностью $\pm 5-10 \cdot 10^{-6}$, а сдвига $\pm 8-17 \cdot 10^{-6}$. В процессе опыта на релаксацию производилась непрерывная догрузка, компенсирующая температурные изменения деформации.

В шести случаях по истечении некоторого времени релаксации производилось мгновенное увеличение нагрузки таким же способом, как и приложение основной нагрузки, и опыт продолжался еще некоторое время. При приложении нагрузки и ее увеличении на каждом образце выполнялось соотношение

$$\tau/\sigma = \lambda = \text{const} \quad (5)$$

Данные об экспериментах приведены в следующей таблице.

Таблица

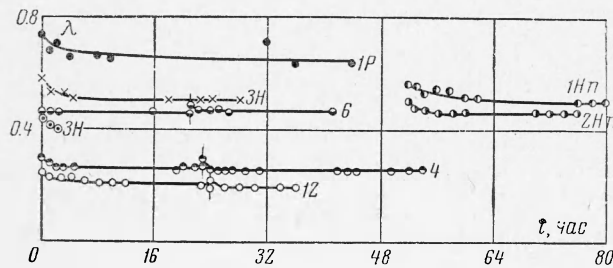
Материал	№ образца	Первая ступень						Вторая ступень					
		σ	τ	σ_i	λ	$\Delta\lambda/\lambda\%$	t час	σ	τ	σ_i	λ	$\Delta\lambda/\lambda\%$	t час
Д16Т	4	20.15	5.85	22.56	0.29	-14	23	23.00	6.41	25.53	0.28	-12.5	33
	6	19.90	8.98	25.26	0.452	+4	21	21.80	10.37	28.25	0.477	-5.0	20
	10	9.66	2.49	10.58	0.258	-25	19	—	—	—	—	—	—
	12	25.90	6.34	28.14	0.242	-16.7	24	30.16	6.47	32.17	0.214	-14	14
	14	6.23	10.05	18.73	1.45	-4.1	28	7.6	10.9	20.37	1.44	-3.5	23
	244	21.15	11.57	29.14	0.55	-9	24	—	—	—	—	—	—
	1Н	15.06	8.42	20.98	0.56	-10.7	4.5	—	—	—	—	—	—
	2Н	22.6	12.53	31.34	0.555	-4	8.5	—	—	—	—	—	—
	2Нн	27.56	13.65	36.31	0.496	-7	24	—	—	—	—	—	—
	1Нн	19.87	11.00	27.52	0.558	-10	32	—	—	—	—	—	—
	3Н	23.26	13.50	32.99	0.58	-14	28	—	—	—	—	—	—
	16	6.56	6.90	13.8	1.05	-0.2	1	—	—	—	—	—	—
	18	10.10	7.28	16.2	0.72	-1.0	1	—	—	—	—	—	—
	20	10.40	8.00	17.3	0.77	-9.7	21	10.85	8.18	17.83	0.75	-5	28
	22	5.10	4.23	8.93	0.83	-15.7	23	7.50	5.80	12.54	0.77	-6.5	13
Медь	1Р	7.77	582	12.73	0.74	-12	22	—	—	—	—	—	—
	2Р	4.48	2.63	6.39	0.587	-24	17	—	—	—	—	—	—
	3Р	9.00	3.93	11.28	0.437	-9.1	0.75	—	—	—	—	—	—

Здесь $\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$ — интенсивность напряжений, t — длительность данной ступени нагрузки, размерность напряжений кг/мм^2 .

4. Как выше отмечено, при выполнении гипотезы пропорциональности девиаторов должно выполняться соотношение

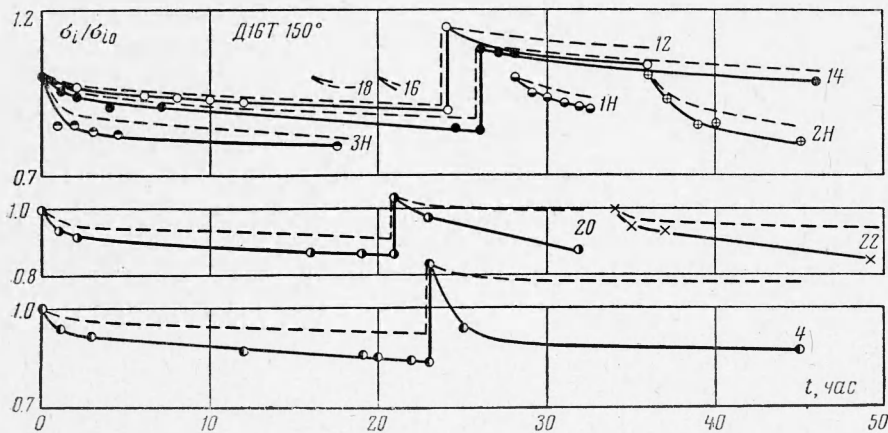
$$\lambda = \lambda^0 = \text{const} \quad (6)$$

На фиг. 1 представлены типичные графики λ . Как видно, λ в первое время уменьшается и принимает по истечении некоторого времени постоянное значение. То же самое происходит и после увеличения нагрузки.



Фиг. 1

Значения максимальных отклонений λ от λ^0 представлены в вышеприведенной таблице, из которой видно, что лишь в четырех случаях из восемнадцати максимальные отклонения превышают 14%. Сравнивая полученные результаты с работой [5], можно сделать вывод, что гипотеза пропорциональности девиаторов при релаксации выполняется с той же точностью,



Фиг. 2

что и при ползучести при переменных нагрузках в условиях пропорционального нагружения. Из таблицы также следует, что после увеличения нагрузки отклонения λ от λ^0 уменьшаются.

5. Ранее было показано, что ползучесть дуралюмина при пропорциональном нагружении хорошо следует зависимости [6]

$$\dot{p}_i p_i^z = \kappa \exp \left(\frac{\sigma_i}{A} + \frac{|\tau_{\max}|}{A_0} \right) \quad \left(p_i^2 = \frac{2}{3} p_{kl} p_{kl} \right) \quad (\text{по } i \text{ не суммируется}) \quad (7)$$

Здесь $\kappa = 1.893 \cdot 10^{-14} \text{ 1/час}$, $A = -1.45 \text{ кг/мм}^2$, $A_0 = 0.521 \text{ кг/мм}^2$, $\alpha = 1.564$ при 150° .

Рассматривая релаксацию как частный случай ползучести при переменных нагрузках и используя зависимость (7), можно подсчитать теоретические кривые релаксации; они представлены на фиг. 2 штриховыми линиями при предположении упругой несжимаемости материала. На той же фигуре экспериментальные кривые представлены сплошными линиями. Числа на фиг. 2 соответствуют номерам образцов вышеприведенной таблицы.

Как следует из фиг. 2, соответствие теории и эксперимента удовлетворительное за исключением образцов № 20 и 4 на участках после увеличения нагрузки. Нетрудно усмотреть также, что после увеличения нагрузки несколько ухудшается соответствие теории и эксперимента.

Поступила 7 VII 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Griffith J. E., Marin J. Creep Relaxation for Combined Stress. J. of Mech. and Phys. of Solids, 1956, vol. 4.
2. Johnson A. E., Henderson J. and Mathur V. D. Complex Stress Creep Relaxation of Metallic Alloy at Elevated Temperatures. Aircraft Engng., 1959, vol. 31, No 361, 362.
3. Наместников В. С. Об одной гипотезе в теории трехосной ползучести. Изв. СО АН СССР, 1960, № 2.
4. Наместников В. С. О ползучести при постоянных нагрузках в условиях сложного напряженного состояния. Изв. АН СССР, ОН, 1957, № 4.
5. Наместников В. С. О гипотезе пропорциональности девиаторов в условиях ползучести при переменных нагрузках и неизменных главных осях. ПМТФ, 1960, № 3.
6. Наместников В. С. О ползучести при сложном напряженном состоянии. Тр. Всесоюз. совещ. по ползучести, Новосибирск, 1962.