

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВНОГО ПРЕДЕЛА РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

© 2007 В. Д. Юшин, Г. З. Бунова, С. В. Воронин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Предложена методика определения условного предела релаксации напряжений на кольцевых образцах Одингга. Определен условный предел релаксации напряжений при комнатной температуре для перспективного сплава 01570.

Размерная стабильность материалов имеет большое значение в прецизионном машиностроении и приборостроении. Она чаще всего оценивается пределом ползучести или условным пределом релаксации напряжений. Обе эти величины имеют одинаковую физическую природу. Однако использование критерия релаксации напряжений предпочтительнее, т. к. испытания при уменьшающихся во времени напряжениях в большей степени соответствуют поведению материала в реальных условиях эксплуатации. Для проведения релаксационных испытаний при изгибе часто пользуются методом кольцевых образцов И. А. Одингга [1].

Однако этот метод не позволяет определить точное численное значение условного предела релаксации. В настоящей работе предлагается усовершенствованная методика И. А. Одингга, позволяющая устранить данный недостаток, которая была использована для определения условного предела релаксации сплава 01570 при комнатной температуре.

**1. Методика подготовки образцов к испытаниям.** Изготавливались кольцевые образцы равного сопротивления изгибу из прутка в соответствии с требованиями ОСТа 24.901.01-73. Для снятия остаточных напряжений образцы после изготовления отжигались по режимам, приведенным в ГОСТ 17535-77, то есть при температуре 350°С в течение трех часов.

Для устранения коробления образцы отжигались в заневоленном состоянии. Кроме того, с этой же целью при изготовлении образцов в прорези для установки клиньев

оставляли перемычку толщиной 1 мм. После отжига перемычка устранялась. Для контроля зазора в процессе испытания на нерабочей части образца с обеих сторон зазора с помощью твердомера ПМТ-3 наносили риски в форме перекрестий. Чтобы исключить разворот перекрестий и наносить их в строго определенном месте, разметку выполняли с помощью приспособления. В центре полученных перекрестий с помощью твердомера ПМТ-3 наносились отпечатки с целью повышения точности замеров. Расстояние между полученными отпечатками измерялось с помощью усовершенствованного компаратора ИЗА-2. Усовершенствование компаратора заключалось в установке системы освещения измеряемого объекта. В нее входит (рис. 1) осветитель 7 с источником питания 8, полупрозрачная пластина 5 и объектив 2. Усовершенствование позволило повысить общее увеличение микроскопа в пять раз за счет замены объектива на более короткофокусный и окуляра 6 с большим увеличением. Окуляр 6 был установлен в тубус микроскопа 4 с помощью переходника 5.

Проведенная доработка компаратора ИЗА-2 позволила измерять линейные размеры на базе 90 мм с точностью 1 мкм. При замере размеров на компараторе вносилась поправка, учитывающая температуру помещения.

**2. Выбор размеров клиньев.** При определении условного предела релаксации напряжений, согласно литературным данным, геометрические размеры клиньев для образцов Одингга выбираются исходя из условия:  $\sigma_0$  должно быть меньше 0,75 – 0,8 от

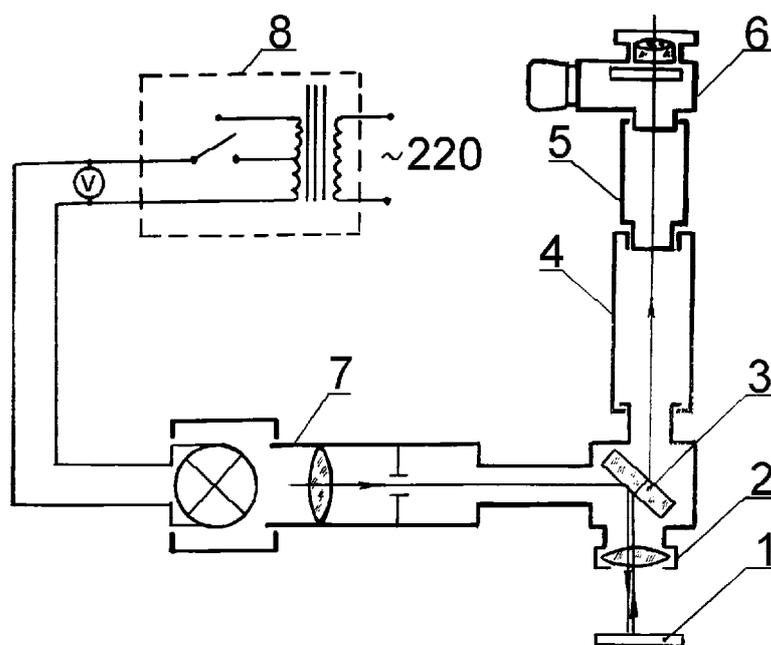


Рис. 1. Схема устройства освещения компаратора ИЗА-2

предела текучести испытываемого материала [2]. По литературным данным, предел текучести материала 01570 составляет 30 кг/мм<sup>2</sup>. Изготовленные образцы Одинга после отжига и удаления перемычки имели прорезь шириной 3,1 ± 0,1 мм. При определении условного предела релаксации напряжений были выбраны четыре уровня начальных напряжений в образцах – 22,5; 19,55; 18 и 15 кг/мм<sup>2</sup>. Учитывая величину прорези, для создания таких напряжений необходимо иметь

$$\sigma = a \cdot E_T \cdot \Delta, \quad (1)$$

где  $a = 0,000583 \text{ мм}^{-1}$ ,  $E_T = 7200 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $\Delta$  – толщина клина, и использовать клинья соответственно толщиной 8,46 мм; 7,746 мм; 7,388 мм и 6,674 мм. Клинья изготавливались из закаленной стали У8. Для каждого размера клина для повышения точности задания начальных напряжений испытания проводились на трех образцах.

### 3. Методика проведения испытаний.

Для определения величины релаксированных напряжений замерялись расстояния между отпечатками до установки клина, после установки клина и его удаления через 1, 3, 6, 10 и 20 суток. По изменению расстояний между отпечатками определяли величину релаксированных напряжений  $\sigma_p$  в кольцевых об-

разцах со вставленными клиньями по формуле

$$\sigma_p = A \cdot E \cdot \Delta_1, \quad (2)$$

где  $A = 0,000583 \text{ мм}^{-1}$ ;  $E = 7200 \text{ кгс/мм}^2$ ;  $\Delta_1$  – изменение расстояния между метками на образце.

По полученным значениям релаксированных напряжений рассчитывали значения остаточных напряжений в образцах со вставленными клиньями  $\sigma$ , которые аппроксимировались уравнением вида

$$\sigma = A \cdot \exp(-b \cdot \tau) + C, \quad (3)$$

где  $A$  – постоянный коэффициент;  $b$  – постоянный коэффициент показателя;  $\tau$  – время, сутки;  $C$  – значение асимптоты функции, имеющей смысл условного предела релаксации. Величина  $C$  рассчитывалась по уравнению

$$C = (\sigma_1 \cdot \sigma_{20} - \sigma_s^2) / (\sigma_1 + \sigma_{20} - 2\sigma_s), \quad (4)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_{20}$  – напряжения, действующие в образцах в начальный момент и через 20 суток при вставленном клине, соответственно;  $\sigma_s$  – напряжения, действующие в образце через 10 суток. Затем по уравнению (3) рассчитывались напряжения, действующие в образцах со вставленными клиньями, через 1, 3, 6, 10 и 20 суток, строился график зависимости

напряжения  $\sigma$  от времени выдержки и сравнивались расчетные значения напряжений с экспериментальными.

**4. Результаты исследований.** В таблице 1 представлены результаты замеров расстояний между метками на образцах Одингга

из сплава 01570 в исходном состоянии и через 1, 3, 6, 10 и 20 суток. Из приведенных данных видно, что с увеличением времени выдержки расстояние между метками увеличивается, что указывает на протекание процессов релаксации напряжений.

Таблица 1. Расстояние между метками на образцах Одингга

№ образца	Величина клина, мм	Начальное расстояние, мм	Время выдержки, сутки				
			1	3	6	10	20
1	6,70	13,3471	13,3481	13,3489	13,3505	13,3651	13,3822
5		13,4077	13,4134	13,4170	13,4219	13,4385	13,4576
12		13,3298	13,3428	13,3458	13,3554	13,3527	13,4361
2	7,40	13,4027	13,4120	13,4244	13,4235	13,4540	13,4605
4		13,4001	13,4043	13,4158	13,4476	13,4538	13,5370
10		13,3350	13,3568	13,3629	13,3650	13,3741	13,4002
7	7,80	13,3024	13,3337	13,3619	13,3957	13,4086	13,4168
8		13,4239	13,4411	13,5114	13,5537	13,5548	13,5576
11		13,4481	13,4609	13,5114	13,5276	13,5296	13,5333
3	8,45	13,5227	13,5775	13,6320	13,6857	13,6952	13,7036
6		13,3969	13,4836	13,5373	13,5636	13,6205	13,6359
9		13,4280	13,5765	13,6248	13,6995	13,7027	13,7125

В таблице 2 представлены напряжения в образцах Одингга с клиньями через 1, 3, 6, 10 и 20 суток, рассчитанные по уравнению

$$\sigma = \sigma_n - \sigma_p, \quad (5)$$

где  $\sigma_n$  – напряжение, создаваемое в начальный момент клином. В таблице приведены средние значения напряжений для каждого клина. Для нахождения условного предела релаксации по уравнению (3) использовались

данные таблицы 2 для клина толщиной 6,7 мм. Это объясняется тем, что уровень напряжений в этом случае наиболее низкий и, по нашему мнению, ближе всего к условному пределу релаксации. Задавать более низкий уровень напряжений не представлялось возможным, так как получаемые в этом случае деформации не могли быть измерены с требуемой точностью на имеющемся оборудовании.

Таблица 2. Напряжение в образцах после различного времени выдержки

Толщина клина, мм	Начальное напряжение, кгс/мм <sup>2</sup>	Напряжение в образцах после выдержки, кгс/мм <sup>2</sup>				
		Время выдержки, сутки				
		1	3	6	10	20
6,70	15,0	14,9723	14,9618	14,9393	14,8997	14,8003
7,40	18,0	17,9500	17,9089	17,8627	17,7985	17,6365
7,80	19,5	19,4102	19,2060	19,0769	19,0542	19,0340
8,45	22,5	22,0941	21,8754	21,6588	21,5614	21,5144

Рассчитаем численное значение величины  $C$  по уравнению (4):

$$C = (15 \cdot 14,8003 - 14,8997^2) / (15 + 14,8003 - 2 \cdot 14,8997) = 3,82.$$

Приравняв время выдержки равным нулю, находим значение коэффициента  $A$  в уравнении (3):

$$15 = A \cdot \exp(-b \cdot 0) + 3,82,$$

$$A = 11,18.$$

Значение  $b$  находим, используя экспериментальные данные для 20 суток выдержки:

$$14,8003 = 11,18 \cdot \exp(-b \cdot 20) + 3,82,$$

$$b = 0,0009.$$

Тогда уравнение изменения напряжения от времени будет иметь вид

$$\sigma = 11,18 \cdot \exp(-0,0009\tau) + 3,82. \quad (6)$$

Сравнение значений напряжений, действующих в образцах после различного времени выдержки, определенных экспериментально и по уравнению (6) дало удовлетворительное совпадение.

Таким образом, условный предел релаксации напряжений при принятом допущении,

что он равен значению асимптоты, для сплава 01570 равен 3,82 кг/мм<sup>2</sup>.

Проведем уточнение значения условного предела релаксации (рис. 2).

Из рисунка видно, что

$$\sigma_{\text{у.п.р.}} = A \cdot e^{-b\tau} + C; \quad \sigma_3 = A \cdot e^{-b\tau} + C,$$

где  $\sigma_{\text{у.п.р.}}$  – условный предел релаксации напряжений,  $\sigma_3$  – остаточное напряжение в образце через 3000 часов после приложения к нему напряжения, равного условному пределу релаксации. Тогда, так как по определению ГОСТа за время 500 – 3000 часов деформация при начальном напряжении, равном условному пределу релаксации, должна быть не более  $10^{-5}$ , можно записать:

$$(\sigma_{\text{у.п.р.}} - C) / (\sigma_3 - C) = e^{-b(\tau - \tau_1)} = e^{3000b}$$

$$\sigma_{\text{у.п.р.}} - \sigma_3 = E \cdot \varepsilon = 7200 \text{ кгс/мм}^2 \cdot 10^{-5} = 0,072,$$

где  $E$  – модуль упругости,  $\varepsilon$  – степень деформации, равная  $10^{-5}$ .

Тогда

$$\sigma_3 = \sigma_{\text{у.п.р.}} - 0,072;$$

$$a \quad \sigma_{\text{у.п.р.}} = (\sigma_{\text{у.п.р.}} - 0,072 - C) \cdot e^{3000b} + C.$$

Поэтому

$$\sigma_{\text{у.п.р.}} = [C - e^{3000b}(0,072 + C)] / (1 - e^{3000b}). \quad (7)$$

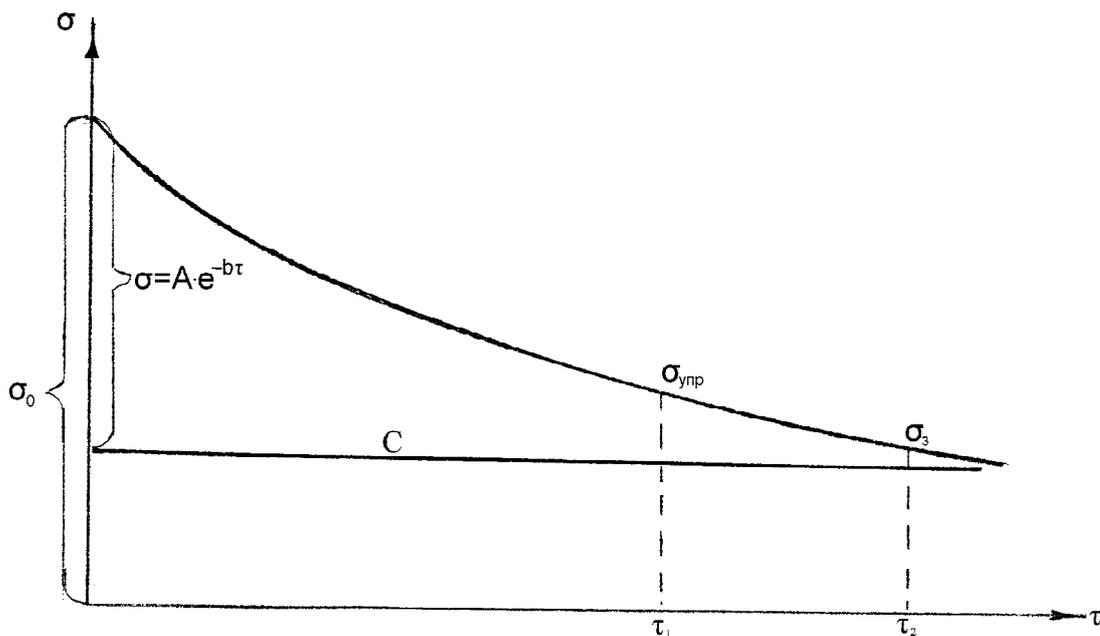


Рис. 2. График изменения остаточных напряжений

Уточнение условного предела релаксации проводилось по (7). Величина условного предела релаксации сплава 01570 оказалась равной 3,897 кгс/мм<sup>2</sup>.

Различие в значениях условного предела релаксации, определенных по уравнениям (6) и (7), составило 2 %.

### Список литературы

1. М. Л. Хенкин, И. Х. Локшин. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. - М.: Машиностроение, 1974.
2. А. М. Борздыка, Л. Б. Гецов. Релаксация напряжений в металлах и сплавах. - М.: Metallurgy, 1978.

## PROCEDURE FOR DEFINING CONDITIONAL LIMIT OF METAL AND ALLOY STRESS RELIEF

© 2007 V. D. Yushin, G. Z. Bunova, S. V. Voronin

Samara State Aerospace University

A procedure is proposed for defining stress relief conditional limit using Oding circular specimens. Stress relief conditional limit at room temperature for a prospective alloy 01570 has been defined.