

**САМАРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА
С.П. КОРОЛЕВА**

**А.Н. Логвинов
О.К. Колеров
А.И. Быков**

**ХАРАКТЕРИСТИКИ
РАЗМЕРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
КОНСТРУКЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

**САМАРА
1999**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

А.Н. Логвинов
О.К. Колеров
А.П. Быков

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗМЕРНОЙ
СТАБИЛЬНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Учебное пособие

САМАРА 1999

УДК 621.981.21

Характеристики размерной стабильности металлических конструкционных материалов: Учеб. пособие/ А.Н. Логвинов, О.К. Колеров, А.П. Быков; Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 1999. 22 с.
ISBN 5-7883-0084-3

В пособии на основании обработки экспериментальных данных предложены методики определения характеристик размерной стабильности металлических конструкционных материалов (условных пределов упругости и релаксации напряжений). Эти методики утверждены ЦНИИМВ.

Пособие рекомендовано студентам специальностей 11.06.00, 12.04.00 и 13.01.03, изучающим курс «Технология конструкционных материалов». Работа подготовлена на кафедре «Обработка металлов давлением».

Табл. 2. Ил. 2. Библиогр.: 7 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева.

Рецензент И.Д. Ибатуллин

ISBN 5-7883-0084-3

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 1999

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Определение характеристик размерной стабильности металлических конструкционных материалов.....	5
1.1 Методика определения условного предела упругости.....	5
1.2 Методика определения условного предела релаксации напряжений...16	
Список использованных источников.....	20
Приложение.....	21

Введение

Характеристики размерной стабильности металлических конструкторских материалов являются основой расчета на жесткость элементов конструкций прецизионных оптических электронных систем современных космических аппаратов для наблюдения за поверхностью Земли.

Пособие написано в качестве продолжения и развития материалов, изложенных в курсе лекций по дисциплине «Механические свойства металлов и сплавов», и предназначено для самостоятельного более широкого изучения студентами этих вопросов.

При разработке пособия использованы материалы отечественных и зарубежных исследователей, а также собственные разработки авторов.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗМЕРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Методика определения условного предела упругости

Условный предел упругости является одной из основных характеристик, определяющих размерную стабильность конструкционных металлических материалов. Недостаточная надежность его определения может привести к нарушению работоспособности изделия.

В соответствии с существующим в настоящее время ГОСТ 1497-84 "Металлы. Методы испытаний на растяжение" определение условного предела упругости осуществляется путем многократного нагружения одного и того же образца возрастающей нагрузкой. Циклическое нагружение образцов вызывает протекание микропластической деформации. Последняя приводит к изменению структуры сплава и, как следствие, изменению его сопротивления пластической деформации. В связи с этим на основе выполненных экспериментальных исследований была разработана методика определения условного предела упругости, исключая многократное нагружение. Для экспериментального определения условного предела упругости необходимо иметь не менее 25 образцов. При этом каждый образец должен нагружаться только один раз. В процессе испытаний должны быть обеспечены надежное центрирование образца в захватах испытательной машины (несоосность прикладываемой нагрузки к оси образца не должна превышать 0,05 мм), возможность оставовки нагружения с точностью до одного

наименьшего деления шкалы силоизмерителя, плавность нагружения и разгружения образца.

На первых пяти образцах при определении $\sigma_{0,005}$ находят интервал напряжений, в котором относительная остаточная деформация ε принимает значения от $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-4}$, а при определении $\sigma_{0,05}$ находят интервал напряжений, в котором ε принимает значения от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-3}$.

Для этого первый образец после установки его в захваты испытательной машины нагружают до напряжения σ (не менее 120% от ожимаемого условного предела упругости) и после выдержки в течение 5-7 с разгружают, затем оценивают величину остаточной деформации образца.

Уровень нагружения для испытания остальных 4 образцов при определении $\sigma_{0,005}$ выбирают с расчетом, чтобы относительные остаточные деформации имели значения от $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-4}$, а при определении $\sigma_{0,05}$ - от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-3}$.

По результатам предварительных испытаний для $\sigma_{0,005}$ определяют три уровня напряжений $\sigma_{0,001}$, $\sigma_{0,005}$, $\sigma_{0,01}$, при которых относительная остаточная деформация соответственно принимает значения, близкие к $1 \cdot 10^{-5}$, $5 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-4}$. Для $\sigma_{0,05}$ определяют напряжения $\sigma_{0,01}$, $\sigma_{0,05}$, $\sigma_{0,1}$, соответствующие относительным остаточным деформациям $1 \cdot 10^{-4}$, $5 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-3}$. На каждом из найденных уровней напряжений испытывают не менее пяти образцов. Далее считают, что число испытаний в сериях опыта k одинаково.

Полученные экспериментальные данные представляют в виде вариационного ряда значений остаточных деформаций для каждого уровня напряжений и проводят первичную статистическую обработку, порядок которой представлен в таблице 1.

Таблица 1. Статистическая обработка экспериментальных данных

Номер по порядку серий опыта	$1, 2, \dots, i, \dots, N$
Уровни напряжений в сериях опыта	$\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i, \sigma_N$
Остаточная деформация в сериях опыта	$\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \dots, \sigma_{1k}, \sigma_{21}, \sigma_{22}, \dots, \sigma_{2k}, \dots, \sigma_{i1}, \sigma_{i2}, \dots, \sigma_{ik}, \sigma_{N1}, \sigma_{N2}, \dots, \sigma_{Nk}, \dots, \sigma_{Nk}$
Сумма остаточных деформаций в сериях опыта	$\sum_{j=1}^k \varepsilon_{ij}$
Среднее значение остаточной деформации в сериях опыта	$\bar{\varepsilon}_i = \frac{\sum_{j=1}^k \varepsilon_{ij}}{k}$
Разность текущего и среднего значений остаточной деформации в сериях опыта	$\varepsilon_{ij} - \bar{\varepsilon}_i$
Квадрат разности текущего и среднего значений остаточной деформации в сериях опыта	$(\varepsilon_{ij} - \bar{\varepsilon}_i)^2$
Сумма квадратов разности текущего и среднего значений остаточной деформации в сериях опыта	$\sum_{j=1}^k (\varepsilon_{ij} - \bar{\varepsilon}_i)^2$
Дисперсия в сериях опыта	$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^k (\varepsilon_{ij} - \bar{\varepsilon}_i)^2}{(k-1)}$

Продолжение таблицы 1

Среднее квадратическое отклонение в сериях опыта	$\overline{S}_i = \sqrt{S_i^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^k (\varepsilon_{ij} - \overline{\varepsilon}_i)^2 / (k-1)}$
Веса измерений в сериях опыта	$W(\overline{\varepsilon}_i) = \frac{1}{S_i^2} = \frac{1}{\sum_{j=1}^k (\varepsilon_{ij} - \overline{\varepsilon}_i)^2 / (k-1)}$

В случае, когда в вариационном ряду относительных остаточных деформаций один или несколько результатов вызывают сомнения в принадлежности к рассматриваемой выборке, используют $3\overline{S}_i$ - критерий для исключения резко выделяющихся результатов. Если значения результатов выходят за пределы интервала $\overline{\varepsilon}_i \pm 3\overline{S}_i$, то с доверительной вероятностью $\beta=0,997$ можно утверждать, что эти значения не принадлежат к рассматриваемой выборке [1].

Функциональную зависимость между напряжением и вызываемой им остаточной деформацией определяют в виде многочлена [2 - 3]

$$\sigma_p(\varepsilon) = b_0\varphi_0(\varepsilon) + b_1\varphi_1(\varepsilon) + b_2\varphi_2(\varepsilon) + \dots + b_n\varphi_n(\varepsilon), \quad (1)$$

где $\varphi_0(\varepsilon), \varphi_1(\varepsilon), \varphi_2(\varepsilon), \dots, \varphi_n(\varepsilon)$ - ортогональные многочлены Чебышева на множестве точек $\overline{\varepsilon}_1, \overline{\varepsilon}_2, \dots, \overline{\varepsilon}_N$ с весом измерений $W(\overline{\varepsilon}_i) = \frac{1}{S_i^2}$; $\overline{\varepsilon}_i$ - среднее арифметическое значение эмпирических дисперсий в серии опыта; N - общее число серий опыта.

В этом случае для всех $k \neq j$ выполняется соотношение

$$\sum_{i=1}^N \varphi_k(\bar{\varepsilon}_i) p_j(\bar{\varepsilon}_i) W(\bar{\varepsilon}_i) = 0 \quad (2)$$

Функциональная зависимость (1) описывает множество экспериментальных точек: $\sigma_i(\bar{\varepsilon}_i)$ и удовлетворяет условию

$$\sum_{i=1}^N [\sigma_i(\bar{\varepsilon}_i) - \sigma_j(\bar{\varepsilon}_i)]^2 = \min \quad (3)$$

Параметры в (1) вычисляются по формулам

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N c(\bar{\varepsilon}_i) \varphi_j(\bar{\varepsilon}_i) W(\bar{\varepsilon}_i)}{\sum_{i=1}^N \varphi_j^2(\bar{\varepsilon}_i) W(\bar{\varepsilon}_i)} \quad (j = 0, 1, 2, \dots, n), \quad (4)$$

которые не зависят от степени n искомого многочлена и позволяют повышать степень многочлена без пересчета всех ранее найденных параметров.

Ортонормальные многочлены Чебышева младших степеней со старшим коэффициентом, равным единице, имеют вид

$$\varphi_0(\varepsilon) = 1, \quad \varphi_1(\varepsilon) = \varepsilon - \bar{\varepsilon}, \quad \varphi_2(\varepsilon) = \varepsilon^2 - \frac{\bar{\varepsilon}^3 - \bar{\varepsilon}^2 \bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}^2 - (\bar{\varepsilon})^2} \varepsilon + \frac{\bar{\varepsilon}^3 \bar{\varepsilon} - (\bar{\varepsilon}^2)^2}{\bar{\varepsilon}^2 - (\bar{\varepsilon})^2}, \quad (5)$$

где средние значения определяются следующим образом:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{\varepsilon}_i W(\bar{\varepsilon}_i)}{\sum_{i=1}^N W(\bar{\varepsilon}_i)} \quad (6)$$

$$\bar{\varepsilon}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{\varepsilon}_i)^2 W(\bar{\varepsilon}_i)}{\sum_{i=1}^N W(\bar{\varepsilon}_i)} \quad (7)$$

$$\bar{\varepsilon}^3 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{\varepsilon}_i)^3 W(\bar{\varepsilon}_i)}{\sum_{i=1}^N W(\bar{\varepsilon}_i)} \quad (8)$$

Ортогональные многочлены высших степеней со старшим коэффициентом, равным единице, определяются по рекуррентным соотношениям [4]

$$\varphi_{j+1}(\varepsilon) = (\varepsilon + \beta_{j+1})\varphi_j(\varepsilon) - \frac{H_j}{H_{j-1}}\varphi_{j-1}(\varepsilon), \quad (9)$$

$$\text{где } H_j = \sum_{i=1}^N \varphi_j^2(\varepsilon_i) W(\varepsilon_i), \quad (10)$$

$$\beta_{j+1} = -\frac{1}{H_j} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \varphi_j^2(\varepsilon_i) W(\varepsilon_i), \quad (11)$$

($j = 0, 1, 2, \dots, n$).

Для равносточных весовых измерений в сериях опыта $W(\varepsilon_i) = 1$ и параметры в формуле (1) вычисляются по формулам:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma(\varepsilon_i) \varphi_j(\varepsilon_i)}{\sum_{i=1}^N \varphi_j(\varepsilon_i)}; \quad \bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i}{N}; \quad \bar{\varepsilon}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2}{N}; \quad \bar{\varepsilon}^3 = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^3}{N}; \quad H_j = \sum_{i=1}^N \varphi_j^2(\varepsilon_i);$$

$$\beta_{j+1} = -\frac{1}{H_j} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \varphi_j^2(\varepsilon_i),$$

Первоначально функциональную зависимость $\sigma_p = f(\varepsilon)$ определяют в линейном виде. Для этого находят первые два члена многочлена Чебышева

$$\sigma_p(\varepsilon) = b_0 \varphi_0(\varepsilon) + b_1 \varphi_1(\varepsilon) \quad (12)$$

и проводят проверку полученной функциональной зависимости на адекватность. Если это условие не выполняется, то функциональную зависимость $\sigma_p = f(\varepsilon)$ определяют в виде трех членов и т.д., пока полученное уравнение не будет удовлетворять условию адекватности.

Для проверки соответствия полученной функциональной зависимости $\sigma_p = f(\epsilon)$ условию адекватности определяют дисперсию опыта $S_{\text{оп}}^2$ и дисперсию адекватности $S_{\text{ад}}^2$:

$$S_{\text{оп}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{S}_i^2}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k (\bar{\epsilon}_{ij} - \bar{\epsilon}_i)^2}{N(k-1)} \quad (13)$$

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [\bar{\epsilon}_i - (\bar{\epsilon}_i)_p]^2}{N-n} \quad (14)$$

где $(\bar{\epsilon}_i)_p$ - расчетная остаточная деформация модели для соответствующего уровня напряжений; n - число параметров модели.

Если $S_{\text{ад}}^2 > S_{\text{оп}}^2$, то полученная модель адекватна при условии [3]

$$\frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{оп}}^2} \leq F(P, \chi_1, \chi_2), \quad (15)$$

где $F(P, \chi_1, \chi_2)$ - критерий Фишера; P - вероятность; $\chi_1 = k - 1$ - число степеней свободы в сериях опыта; $\chi_2 = N - n$ - число степеней свободы модели.

После получения уравнения, удовлетворяющего условию адекватности, из него расчетным путем определяют напряжение, вызывающее остаточную деформацию

$$\epsilon = 5 \cdot 10^{-3} - \frac{S_{\text{ад}}}{\sqrt{N}} t_{\beta} \quad (16)$$

где t_{β} - критерий Стьюдента для доверительной вероятности β .

Это напряжение и принимают за условный предел упругости.

Графическая иллюстрация нахождения условного предела упругости показана на рисунке 1.



Рис. 1. Зависимость микродеформации от напряжения:

- 1— Функциональная зависимость $\sigma=f(\epsilon)$ по формуле (12);
- 2— Нижняя граница доверительного интервала ϵ ;
- ϵ^* - допустимая остаточная деформация;
- σ_y - условный предел упругости для допустимой остаточной деформации ϵ^* ;
- x - экспериментальные точки.

В заключение выполняют проверку найденного предела упругости. Для этого при напряжении, соответствующем условному пределу упругости, испытывают не менее пяти образцов.

Условный предел упругости $\sigma_{0,005}$ считается найденным правильно, если относительная остаточная деформация каждого из пяти образцов будет меньше или равна $5 \cdot 10^{-5}$, а при определении $\sigma_{0,05}$ - меньше или равна $5 \cdot 10^{-4}$.

Пример расчета

Пусть при четырех значениях уровня напряжений измерены с пятикратным повторением одинаковой точности остаточные деформации образцов (см. таблицу 2). Результаты предварительной обработки измерений в соответствии с таблицей 1 также приводятся в таблице 2.

Требуется найти функциональную зависимость $\sigma_p = f(\varepsilon)$ линейного вида $\sigma_p(\varepsilon) = b_0 \cdot \varphi_0(\varepsilon) + b_1 \cdot \varphi_1(\varepsilon)$ и оценить адекватность модели. Здесь φ_0 и φ_1 - первые члены полиномов Чебышева.

В рассматриваемом примере число опытов $N=4$, число серий в опыте $k=5$, число параметров линейной модели $p=2$.

По формуле (4) последовательно находят параметры b_0 и b_1 с учетом выражения (5):

$$b_0 = \frac{195 \cdot 3,33 \cdot 10^{10} + 210 \cdot 0,77 \cdot 10^{10} + 240 \cdot 0,05 \cdot 10^{10} + 280 \cdot 0,03 \cdot 10^{10}}{3,33 \cdot 10^{10} + 0,77 \cdot 10^{10} + 0,05 \cdot 10^{10} + 0,03 \cdot 10^{10}} = 197$$

$$b_1 = \frac{195(1,6 - 3,08) \cdot 10^5 \cdot 3,33 \cdot 10^{10} + 210(5,6 - 3,08) \cdot 10^5 \cdot 0,77 \cdot 10^{10} + 240(32 - 3,08) \cdot 10^5 \cdot 0,05 \cdot 10^{10} + 280(55 - 3,08) \cdot 10^5 \cdot 0,03 \cdot 10^{10}}{[(1,6 - 3,08) \cdot 10^{-5}]^2 \cdot 3,33 \cdot 10^{10} + [(5,6 - 3,08) \cdot 10^{-5}]^2 \cdot 0,77 \cdot 10^{10} + [(32 - 3,08) \cdot 10^{-5}]^2 \cdot 0,05 \cdot 10^{10} + [(55 - 3,08) \cdot 10^{-5}]^2 \cdot 0,03 \cdot 10^{10}} = 1,69 \cdot 10^5.$$

По формуле (6) определяют среднее значение остаточной деформации опыта $\bar{\varepsilon}$:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1,6 \cdot 10^{-5} \cdot 3,33 \cdot 10^{10} + 5,6 \cdot 10^{-5} \cdot 0,77 \cdot 10^{10} + 32 \cdot 10^{-5} \cdot 0,05 \cdot 10^{10} + 55 \cdot 10^{-5} \cdot 0,01 \cdot 10^{10}}{3,33 \cdot 10^{10} + 0,77 \cdot 10^{10} + 0,05 \cdot 10^{10} + 0,03 \cdot 10^{10}} = 3,08 \cdot 10^{-5}$$

Требуемая функциональная зависимость $\sigma_p = f(\varepsilon)$ в явной форме имеет вид

$$\sigma_p(\varepsilon) = 197 + 1,69 \cdot 10^5 (\varepsilon - 3,08 \cdot 10^{-5}) = 191,80 + 1,69 \cdot 10^5 \varepsilon.$$

Для проверки соответствия полученной функциональной зависимости на адекватность по (13) и (14) вычисляют дисперсию опыта (дисперсию воспроизводимости эксперимента) и дисперсию адекватности при $k=5$, $N=4$, $n=2$, что соответствует $\chi_1=4$ и $\chi_2=2$:

$$S_{\text{оп}}^2 = \frac{0,3 + 1,3 + 19,5 + 41}{4} = 15,52,$$

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{(1,6 - 1,89)^2 + (5,6 - 10,79)^2 + (32 - 28,52)^2 + (55 - 52,25)^2}{2} = 23,34.$$

По формуле (15) находят отношение дисперсий адекватности и опыта. Оно равно 1,54. По таблице (см приложение) находят критерий Фишера $F=19,3$ (для вероятности $P=0,95\%$, $\chi_1=4$, $\chi_2=2$).

Поскольку выполняется условие (15) ($\frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{оп}}^2} = 1,54 \leq F(p, \chi_1, \chi_2) = 19,3$),

линейная модель является адекватной.

Таблица 2. Результаты эксперимента и их первичная статистическая обработка

№ серии опыта	Уровень напряжений в сериях опыта, МПа	Остаточная деформация в сериях опыта, $\epsilon \cdot 10^3$					Среднее значение остаточной деформации в сериях опыта, $\bar{\epsilon} \cdot 10^3$	Дисперсия в сериях опыта, $S^2 \cdot 10^{10}$	Весы измерения в сериях опыта, $W(\epsilon_i) \cdot 10^{-10}$	Среднее квадратичное отклонение в сериях опыта, $\overline{S}, \cdot 10^{10}$	Среднее значение остаточной деформации опыта, $\bar{\epsilon} \cdot 10^3$	Расчетная остаточная деформация модели для соответствующего уровня напряжений, $(\epsilon_r)_{p} \cdot 10^3$
		1	2	3	4	5						
1	195	2	2	2	1	1	1,6	0,3	3,33	0,55	1,89	
2	210	6	7	6	5	4	5,6	1,3	0,77	0,88	10,79	
3	240	33	38	26	30	33	32	19,5	0,05	0,22	28,52	
4	280	58	64	54	52	47	55	41	0,03	0,17	52,25	

1.2. Методика определения условного предела релаксации напряжений

Одной из важнейших характеристик размерной стабильности металлических конструкционных материалов является условный предел релаксации напряжений. Действующий ГОСТ 26007-83 "Методы испытания на релаксацию напряжений" не предусматривает определение условного предела релаксации напряжений. Поэтому была разработана методика экспериментального определения условного предела релаксации напряжений при испытании в различных средах [5].

Под условным пределом релаксации напряжений понимают начальный уровень напряжения в образце, вызывающий остаточную деформацию $1 \cdot 10^{-5}$ за интервал времени 500-3000 часов, что соответствует падению напряжения на величину $1 \cdot 10^{-5} E_T$ (E_T – модуль упругости материала образца при температуре испытания) [6].

Для оценки влияния параметров среды на релаксацию напряжений наиболее удобным является метод испытания кольцевых образцов равного сопротивления изгибу, поскольку напряжения в расчетной части образца создаются без внешних нагружающих устройств. Это позволяет одновременно проводить испытания достаточно большого количества образцов.

Методика испытаний и обработка экспериментальных результатов при оценке релаксации напряжений на кольцевых образцах равного сопротивления изгибу подробно приведены в ГОСТ 26007-83 «Методы испытания на релаксацию напряжений» и в работе [7].

Проведение испытаний для определения условного предела релаксации напряжений при заданной температуре осуществляется не менее чем при трех

уровнях начального напряжения. Эти уровни должны быть как выше, так и ниже ожидаемого условного предела релаксации напряжений. На каждом уровне напряжений испытывают не менее пяти образцов.

Полученные экспериментальные данные представляют в виде вариационного ряда напряжений, релаксировавших за время 500-3000 часов для каждого уровня начального напряжения. Затем выполняют первичную статистическую обработку результатов, основанную на нормальном законе распределения, аналогичную обработке, которая проводится при определении условного предела упругости (см. таблицу 1).

Для нахождения функциональной зависимости между уровнем начального напряжения и релаксировавшим за интервал времени 500-3000 часов используют метод регрессионного анализа. Функциональную зависимость записывают в виде многочлена Чебышева, аналогично формуле (1):

$$\Delta\sigma_{(500-3000)} = c_0\varphi_0(\sigma) + c_1\varphi_1(\sigma) + c_2\varphi_2(\sigma) + c_m\varphi_m(\sigma), \quad (17)$$

где σ - уровень напряжений.

Порядок нахождения функциональной зависимости аналогичен используемому при определении условного предела упругости.

После получения уравнения, удовлетворяющего условию адекватности, из него расчетным путем определяют начальное напряжение в образце, при котором за интервал времени 500-3000 часов оно релаксирует на величину

$$\Delta\sigma_{(500-3000)} = 1 \cdot 10^{-1} E_T - \frac{S}{\sqrt{N}} t_{\alpha} \quad (18)$$

Это напряжение и принимается за условный предел релаксации.

Графическая иллюстрация нахождения условного предела релаксации показана на рисунке 2.

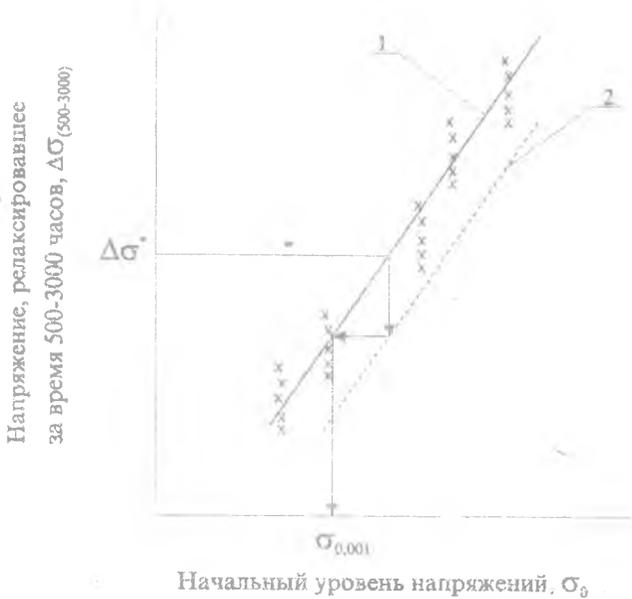


Рис. 2. Зависимость релаксирующих напряжений за интервал 500-3000 часов от уровня начальных напряжений:

- 1- Функциональная зависимость $\Delta\sigma_{(500-3000)} = f(\sigma_0)$ по формуле (17);
 - 2- Нижняя граница доверительного интервала зависимости $\Delta\sigma_{(500-3000)} = f(\sigma_0)$;
 $\Delta\sigma = 1 \cdot 10^{-3} E_T$ - напряжение, релаксировавшее в интервале времени 500-3000 часов;
- $\sigma_{0,001}$ - условный предел релаксации;
 x - экспериментальные точки.

Затем выполняют проверку найденного значения условного предела релаксации напряжений. Для этого при напряжении, соответствующем условному пределу релаксации, испытывают не менее пяти образцов. Условный предел релаксации считается найденным правильно, если напряжение релаксировавшее за время 500-3000 часов, в каждом из пяти образцов меньше или равно $1 \cdot 10^{-5} E_1$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. Справочник. -М.: Машиностроение, 1985 - 232 с.
2. Дрейнер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. -М.: Статистика, 1973. - 387 с.
3. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. -М.: Наука, 1976. - 279 с.
4. Румишинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. - М.: Наука, 1971. - 192 с.
5. Логвинюв А.Н. Взаимосвязь структурных изменений с характеристиками размерной стабильности материалов при эксплуатации в условиях вакуума: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. - М., 1998. - 244 с.
6. Хенкин М.Л., Локшин И.Х. Размерная стабильность металлов и сплавов. - М.: Машиностроение, 1974. - 255 с.
7. Борздыка А.М., Гецов Л.Б. Релаксация напряжений в металлах и сплавах. - М.: Металлургия, 1978. - 256 с.

Приложение

Значения F – критерия Фишера при 5%-ном уровне значимости [4]

χ_2	χ_1								
	1	2	3	4	5	6	7	24	
1	164,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	244,9	249,0	254,3
2	18,5	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3	19,4	19,4	19,5
3	10,1	9,6	9,3	9,1	9,0	8,9	8,7	8,6	8,5
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3	6,2	5,9	5,8	5,6
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1	5,0	4,7	4,5	4,4
6	6,0	5,1	4,8	4,5	4,4	4,3	4,0	3,8	3,7
7	5,5	4,7	4,4	4,1	4,0	3,9	3,6	3,4	3,2
8	5,3	4,5	4,1	3,8	3,7	3,6	3,3	3,1	2,9
9	5,1	4,3	3,9	3,6	3,5	3,4	3,1	2,9	2,7
10	5,0	4,1	3,7	3,5	3,3	3,2	2,9	2,7	2,5
11	4,8	4,0	3,6	3,4	3,2	3,1	2,8	2,6	2,4
12	4,8	3,9	3,5	3,3	3,1	3,0	2,7	2,5	2,3
13	4,7	3,8	3,4	3,2	3,0	2,9	2,6	2,4	2,2
14	4,6	3,7	3,3	3,1	3,0	2,9	2,5	2,3	2,1
15	4,5	3,7	3,3	3,1	2,9	2,8	2,5	2,3	2,1
16	4,5	3,6	3,2	3,0	2,9	2,7	2,4	2,2	2,0
17	4,5	3,6	3,2	3,0	2,8	2,7	2,4	2,2	2,0
18	4,4	3,6	3,2	2,9	2,8	2,7	2,3	2,1	1,9
19	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,9
20	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,9
22	4,3	3,4	3,1	2,8	2,7	2,6	2,2	2,0	1,8
24	4,3	3,4	3,0	2,8	2,6	2,5	2,2	2,0	1,7
26	4,2	3,4	3,0	2,7	2,6	2,5	2,2	2,0	1,7
28	4,2	3,3	3,0	2,7	2,6	2,4	2,1	1,9	1,7
30	4,2	3,3	2,9	2,7	2,5	2,4	2,1	1,9	1,6
40	4,1	3,2	2,9	2,6	2,5	2,3	2,0	1,8	1,5
60	4,0	3,2	2,8	2,5	2,4	2,3	1,9	1,7	1,4
120	3,9	3,1	2,7	2,5	2,3	2,2	1,8	1,6	1,3

Учебное издание

Логвинов Анатолий Николаевич
Колеров Олег Константинович
Быков Александр Петрович

**ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗМЕРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Учебное пособие

Редактор Л. Я. Чегодаева
Техн. редактор Г. А. Усачева
Корректор Т. И. Щелоква

Лицензия ЛР № 020301 от 30.12.96 г.

Подписано в печать 25.10.99 г. Формат 60x84 1/16.

Бумага газетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Усл. кр.-отт. 1,4. Уч.-изд.л. 1,5.

Тираж 100 экз. Заказ 143.

Самарский государственный аэрокосмический
университет им. академика С. П. Королева.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

ИПО Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443001 Самара, ул. Молодогвардейская, 151.