

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СПЛАВА ВТЗ-1 ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ ЗНАКОПОСТОЯННОМ НАГРУЖЕНИИ

Ерёмин Ю. А., Клебанов Я. М., Кокорев И. А.

Институт механической технологии и металловедения  
Будапештского Технического Университета

Поступило 22 января 1980 г.

Представлено: проф. И. Артингер

Для условий эксплуатации деталей из титановых сплавов в ядерной, авиационной и других областях техники характерно малоцикловое нагружение. При циклическом знакопостоянном деформировании этих сплавов с напряжениями превышающими предел упругости материала, при комнатной температуре наблюдается накопление от цикла к циклу остаточной деформации [1]. В то же время эксперименты показывают, что кратковременное нагружение и разгрузка большинства титановых сплавов приводят к анизотропному деформационному упрочнению: предел текучести при повторном нагружении оказывается выше. Это видно, например, из диаграммы повторного нагружения при температуре 20 °С образца из титанового сплава ВТЗ-1 после предварительного растяжения до  $R_{p0.2}$ , приведенной на рис. 1. Следовательно, накапливаемая в процессе малоциклового знакопостоянного нагружения неупругая деформация является деформацией ползучести.

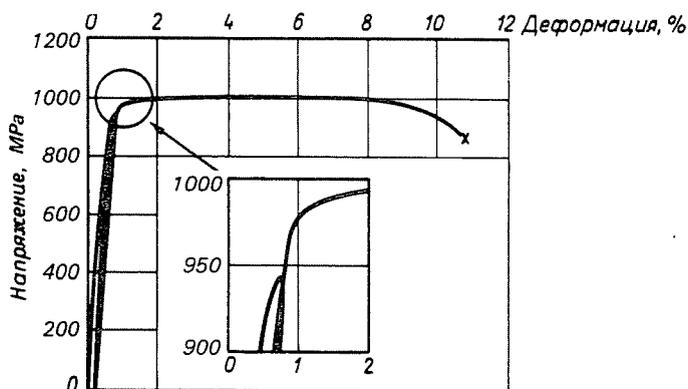


Рис. 1. Диаграмма активного нагружения образца после предварительного растяжения до  $R_{p0.2}$

При наличии выдержек на максимальном напряжении цикла основная часть деформации ползучести накапливается именно во время этих выдержек. Рост реологической деформации происходит и при напряжениях, близких к максимальному. Но во время выдержек при повторных нагружениях вновь наблюдается первая замедленная стадия ползучести [2]. Учитывая также существенную нелинейность зависимости скорости ползучести от напряжения при обычных температурах, ползучестью за время нагружения и разгрузки образца в первом приближении можно пренебречь.

В настоящей работе представлены результаты исследований ползучести сплава ВТ3-1 при малоцикловом нагружении растяжением. Процентный химический состав сплава ВТ3-1 приведен в таблице 1. Образцы изготавливались из пруткового материала диаметром 35 мм. Прутки подвергались ступенчатому отжигу с выдержками при температурах 870 °С и 650 °С по 2 часа с последующим охлаждением на воздухе. Механические характеристики сплава следующие:  $R_{p0,2} = 980$  МПа,  $R_m = 1040$  МПа. За счет дополнительной термомеханической обработки были подготовлены также заготовки для второй партии образцов с более высокими механическими характеристиками:  $R_{p0,2} = 1100$  МПа,  $R_m = 1180$  МПа.

Испытания проводились на сплошных цилиндрических образцах при растяжении на модернизированной машине МП-3Б [3]. Диаметр базовой части образцов — 5,5 мм, базовая длина — 50 мм. Образцы первой партии испытывались при наибольших напряжениях цикла  $\sigma_{\max} = 900$  МПа и  $\sigma_{\max} = 980$  МПа, образцы второй партии — при  $\sigma_{\max} = 1100$  МПа. Установка для испытания позволила реализовать трапециевидный цикл нагружения. (рис. 2) Выдерживались следующие

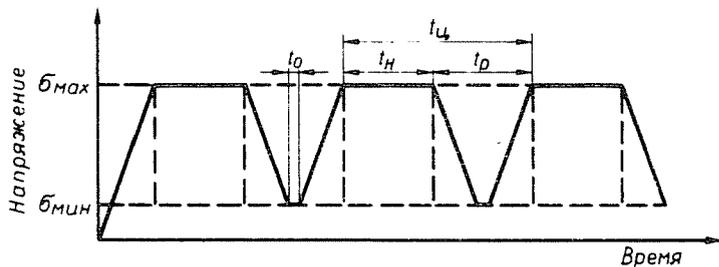


Рис. 2. Схема нагружения образца

временные параметры цикла: период  $t_{\text{ц}} = 0,0119$  час; выдержка при максимальном напряжении  $t_h = 0,0036$  час; выдержка при минимальном напряжении  $t_0 = 0,0005$  час.

Кривые накопления деформации представлены для каждого из испытанных образцов сплошными линиями на рис. 3, 4 и 5. Часть образцов доводилась до разрушения, отмеченного на рисунках крестиками. На рисунках для сравнения показаны также осредненные стационарные кривые, полученные при постоянном нагружении напряжением

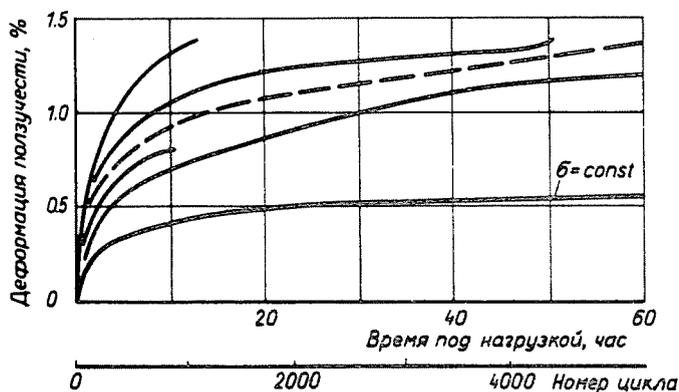


Рис. 3. Деформация ползучести титанового сплава ВТ3-1 при  $\sigma_{\max} = 900$  МПа

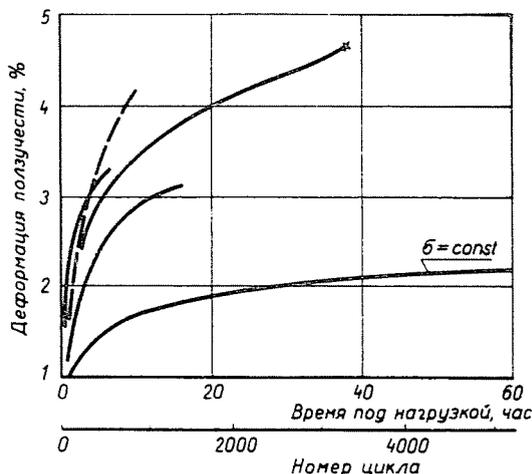


Рис. 4. Деформация ползучести титанового сплава ВТ3-1 при  $\sigma_{\max} = 980$  МПа

равным  $\sigma_{\max}$ . Сопоставление малоцикловых и стационарных результатов показывает, что циклическое нагружение приводит к существенному ускорению накопления деформации ползучести.

Осредненные стационарные кривые ползучести аппроксимированы методом последовательного выделения экспоненциальных слагаемых Ю. П. Самарина [5] и представлены в виде

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^n a^i \lambda_i^{-1} \varphi_T(\sigma) (1 - e^{-\lambda_i t}) + \varphi_s(\sigma) t. \quad (1)$$

Число выделенных экспоненциальных слагаемых  $n=4$ . Каждое из слагаемых соответствует примерно одному порядку длительности.

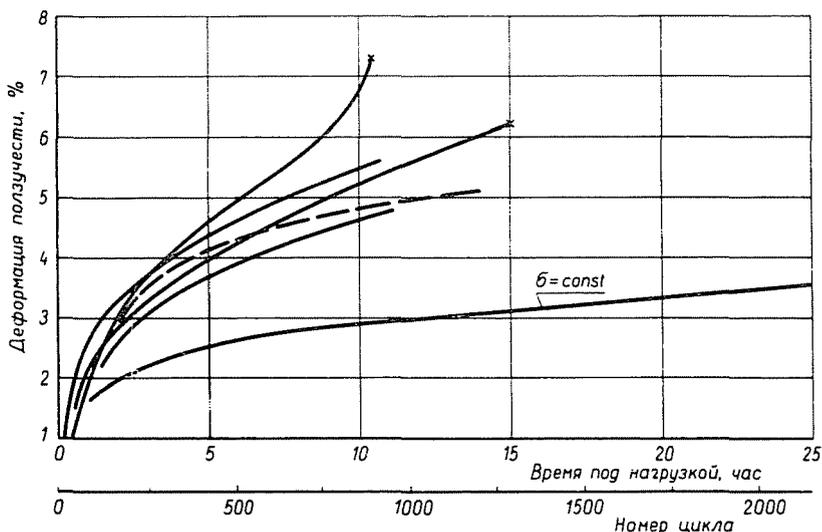


Рис. 5. Деформация ползучести титанового сплава ВТ3-1 при  $\sigma_{\max} = 1100$  МПа

Для описания циклической ползучести использовалась нелинейная наследственная модель [5]. Уравнение модели в связи с отсутствием явления возврата для исследуемого сплава имеет вид

$$\dot{\eta}(t) = \int_0^t S(\tau) d_c K [t - \tau, \sigma(\tau)], \quad (2)$$

где интегрирование (в смысле Стильтьеса) ведется по переменной  $\tau$ , а дифференциал берется по аргументу  $\sigma$  от функции  $K(t, \sigma)$ . При этом не требуется подобия кривых ползучести при  $\sigma = \text{const}$ .

Структурный параметр  $S$  — степень разупрочнения материала, характеризующий состояние материала в момент изменения напря-

жения. Его величина определяется по следующей зависимости:

$$S = 1 - \exp \left[ -b \frac{\dot{\eta}_h(\sigma)}{\dot{\eta}_s(\sigma)} \right], \quad (3)$$

где  $\dot{\eta}_h$  — скорость деформации, найденная в соответствии с гипотезой упрочнения по накопленной деформации и стационарной кривой ползучести для текущего напряжения  $\sigma(t)$ ;

$\dot{\eta}_s$  — минимальная (установившаяся) скорость при этом напряжении;

$b$  — константа, количественно характеризующая поведение материала при нестационарном нагружении.

При определении величины « $b$ » для титанового сплава ВТЗ-1 использованы результаты испытания на ползучесть с промежуточной разгрузкой при  $175^\circ\text{C}$ . Программа этих испытаний включала нагрузку до  $\sigma = 910$  МПа, выдержку при этом напряжении 4 часа, разгрузку и выдержку без напряжения 4 часа и новую нагрузку и выдержку 4 часа при напряжении 910 МПа. По этой программе испытано 2 образца. Результаты испытаний и стационарная кривая ползучести при напряжении 910 МПа. представлены на рис. 6. Обработка этих данных в соответствии с зависимостью (3) позволила определить  $b = 0,0408$ .

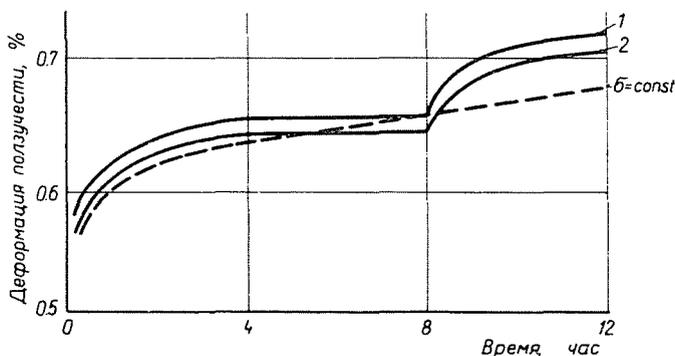


Рис. 6. Стационарная ползучесть и ползучесть с промежуточной разгрузкой титанового сплава ВТЗ-1 при температуре  $175^\circ\text{C}$

С учетом (1) функция скорости деформации ползучести  $K$  принимает вид

$$K(t, \sigma) = \sum_{i=1}^n a_i (1 - e^{-\lambda_i t}) \cdot \varphi_T(\sigma).$$

Принимая, что ползучесть имеет место только при максимальных напряжениях во время выдержек, вместо (2) получаем

$$\dot{\eta}(t) = \sum_{i=1}^n \dot{\eta}_i(t)$$

$$\vartheta_i(t) = \sum_{j=1}^m S(t_j) [a_i \exp -\lambda^i(t-t_j) \varphi_T(\sigma_{\max}) +$$

$$+ \varphi_s(\sigma_{\max})]; \quad t \in (t_{m-1}, t_m);$$

где  $t_j$  — моменты скачкообразного изменения функций  $\varphi_T$  и  $\varphi_s$ .

Приращение деформации ползучести за цикл для  $N \geq 2$  может быть записано в виде

$$\Delta \eta_N = \sum_{i=1}^n a_i \lambda_i^{-1} \varphi_T(\sigma_{\max}) < \exp[-\lambda_i(N-1)t_u] -$$

$$- \exp[-\lambda_i(Nt_u - t_p)] + \sum_{j=2}^N S(t_j) \{ \exp[-\lambda_i(N-j)t_u] -$$

$$- \exp[-\lambda_i[(N-j+1)t_u - t_p]] + \exp[-\lambda_i(N-j+1)t_u] - \exp \lambda_i[(N-$$

$$-j)t_u + t_p] \} > + \varphi_s(\sigma_{\max})(t_u - t_p), \quad (4)$$

в первом цикле

$$\Delta \eta_1 = \sum_{i=1}^n a_i \lambda_i^{-1} \varphi_T(\sigma_{\max}) \{ 1 - \exp[-\lambda_i(t_u - t_p)] \} + \varphi_s(\sigma_{\max})(t_u - t_p).$$

$$\eta_i(N) = a_i \lambda_i^{-1} \varphi_T(\sigma_{\max}) \{ \exp[-\lambda_i(N-1)t_u] - \exp[-\lambda_i(Nt_u - t_p)] \},$$

$$\eta(N) = \sum_{i=1}^n \eta_i(N).$$

$$\eta_i(2) = S_2 a_i \lambda_i^{-1} \varphi_T(\sigma_{\max}) \{ 1 - \exp[-\lambda_i(t_u - t_p)] + \exp(-\lambda_i t_u) - \exp(-\lambda_i t_p) \}.$$

Можно показать, что

$$\eta_i(N+1) = \eta_i(N) \exp(-\lambda_i t_u),$$

$$\eta_i(N+1) = \eta_i(N) \exp(-\lambda_i t_u) + S_N \eta_i(2) S_2$$

Обозначим также

$$e(N+1) = e(N) + \sum_{i=1}^n \eta_i(N), \quad e(2) = 0,$$

тогда вместо (4) можно записать

$$\Delta\eta_N = \eta(N) + e(N) + \varphi_s(\sigma_{\max})(t_y - t_p) \quad (5)$$

Выражение (5) позволяет выполнять расчет циклически с применением ЭЦВМ, используя для определения  $\Delta\eta_N$  данные только предыдущего  $(N-1)$  цикла и текущего цикла  $N$ .

Результаты приведенных расчетов накопленной деформации представлены на рисунках 3, 4 и 5 пунктирными линиями. Сравнение

Таблица 1

Ti	Mo	Cr	Fe	Si	Al	C	N	H
Основа	2,20%	1,40%	0,41%	0,27	5,9%	0,02%	0,01%	0,002%

Таблица 2

Номер режима № п/п	Время под нагрузкой $t_n$ (час)	Время паузы $t_p$ (час)	Время цикла $t_y$ (час)	Частота нагружения $t_y^{-1}$ (гц)
1.	0,0036	0,00083	0,00443	$6,27 \cdot 10^{-2}$
2.	0,00036	0,00083	0,00119	$2,33 \cdot 10^{-2}$
3.	0,0018	0,00415	0,00595	$4,71 \cdot 10^{-2}$
4.	0,36	0,0083	0,3683	$7,54 \cdot 10^{-4}$
5.	0,036	0,0083	0,0443	$6,27 \cdot 10^{-3}$
6.	0,0144	0,0083	0,0227	$1,22 \cdot 10^{-2}$
7.	0,0072	0,0083	0,0155	$1,79 \cdot 10^{-2}$
8.	0,0036	0,0083	0,0119	$2,33 \cdot 10^{-2}$
9.	0,0018	0,0083	0,0101	$2,75 \cdot 10^{-2}$
10.	0,00036	0,0083	0,00866	$3,2 \cdot 10^{-2}$
11.	0,0072	0,0166	0,0238	$1,17 \cdot 10^{-4}$
12.	0,0036	0,0166	0,0202	$1,37 \cdot 10^{-2}$
13.	0,0144	0,0332	0,0476	$5,84 \cdot 10^{-3}$
14.	0,0036	0,0332	0,0368	$7,54 \cdot 10^{-3}$
15.	0,036	0,083	0,119	$2,33 \cdot 10^{-3}$
16.	0,0036	0,083	0,0866	$3,20 \cdot 10^{-3}$
17.	0,36	0,83	1,19	$2,33 \cdot 10^{-4}$
18.	0,0036	0,83	0,8336	$3,33 \cdot 10^{-4}$

расчетных и экспериментальных результатов позволяет заключить, что рассмотренное уравнение (2) удовлетворительно описывает поведение реологической деформации сплава ВТЗ-1 при малоцикловом нагружении с выдержками. С целью анализа влияния временных параметров цикла и частоты нагружения при  $\sigma_{\max} = 980$  МПа были проведены расчеты для 18 режимов нагружения. Эти режимы сведены в таблицу 2.

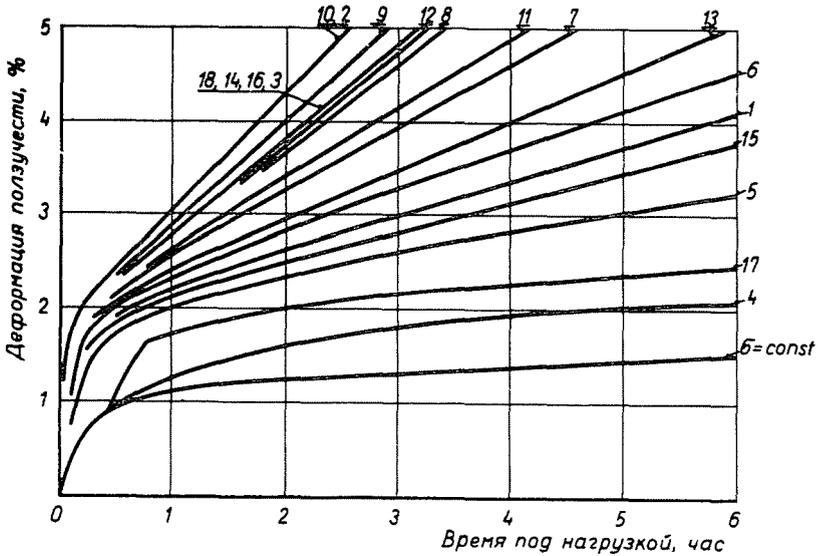


Рис. 7. Расчетные кривые циклической ползучести сплава ВТЗ-1 при  $\sigma_{\max} = 980$  МПа

Результаты расчетов представлены на рис. 7 в виде кривых накопленной деформации  $\eta$  в зависимости от времени под нагрузкой. Анализ этих графиков позволяет заключить следующее. Уменьшение времени под нагрузкой при постоянной длительности паузы повышает интенсивность накопления деформации (режимы 1, 2; 4—10; 11, 12; 13, 14; 15, 16; 17, 18). Увеличение же времени разгрузки при неизменной выдержке на максимальном напряжении способствует ускорению ползучести во время выдержек (режимы 3, 9; 4, 17; 5, 15; 6, 13; 7, 11; 1, 8, 12, 14, 16, 18). Однако, начиная с некоторой величины времени разгрузки, зависящей от времени под нагрузкой, такое влияние пропадает (режимы 2, 10; 14, 16, 18).

Увеличение частоты нагружения повышает устанавливающуюся среднюю скорость циклической ползучести. На рис. 8 точками представлены средние скорости для режимов, в которых соотношение  $t_p/t_n$  выдерживалось постоянным ( $\approx 0,434$ ), но варьировался период нагружения. Изменение частоты нагружения в 1000 раз приводит к десятикрат-

ному ускорению ползучести. Для частот, близких к 0,1 гц можно отметить некоторое затухание роста скорости ползучести с увеличением частоты. Влияние частоты нагружения и времени выдержки аналогично обычно наблюдаемому в экспериментах [2, 6, 7].

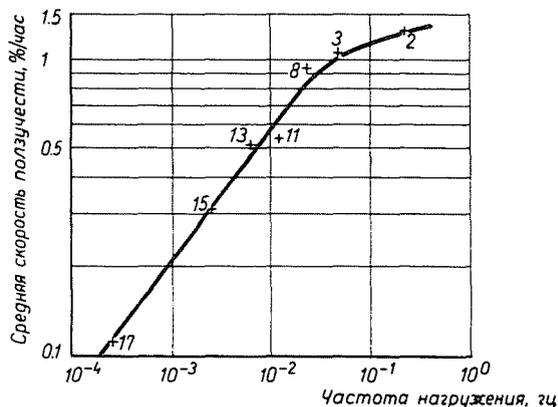


Рис. 8. Зависимость средней установившейся скорости ползучести от частоты малоциклового нагружения

Полученные результаты свидетельствуют о том, что эффекты неустановившейся ползучести, вызываемые сменами величин напряжений, реверсированием нагружения, оказывают существенное влияние на работу конструкции и в том случае, когда склерономная деформация отсутствует.

### Резюме

Приведены результаты испытаний титанового сплава ВТЗ-1 в условиях малоциклового нагружения пульсирующим растяжением при различных параметрах цикла в диапазоне температур 25–175 °С.

В этих условиях испытаний деформацию ползучести удовлетворительно описывает нелинейная наследственная модель.

### Литература

1. Трошенко В. Т.—Стрижало В. А. и др. Исследование малоциклового усталости сплавов на основе титана при пульсирующем растяжении. Космические исследования на Украине, 1975, вып. 6, с. 39—45.
2. Работков Ю. Н.: Ползучесть элементов конструкций. М., «Наука», 1970.
3. Клебанов Я. М.: Установка для испытаний на ползучесть при программном ступенчатом изменении нагрузки. Заводская лаборатория, 1975, № 12, с. 1514—1516.
4. Самарин Ю. П.: Построение экспоненциальных аппроксимаций для кривых ползучести методом последовательного выделения экспоненциальных слагаемых. Проблемы прочности, 1974, № 9, с. 24—27.

5. КЛЕБАНОВ Я. М.: Нелинейная наследственная модель ползучести. Известия ВУЗов. Машиностроение, 1975, № 1, с. 9—10.
6. МЕЛЕКА А. Н.: Combined creep and fatigue properties. Metallurgical reviews, 1962, Vol. 7, № 25, p. 43—93.
7. СЕРЕНСЕН С. В.—КОГАЕВ В. П.—ШНЕЙДЕРОВИЧ Р. М.: Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. М., «Машиностроение», 1975.

Ю. А., ЕРЕМИН }  
Я. М., КЛЕБАНОВ } Куйбышевский политехнический институт,  
И. А., КОКОРЕВ } Куйбышев