

## Обмен опытом

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЗУЧЕСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ1-0 ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И КРУЧЕНИИ ТРУБЧАТЫХ ОБРАЗЦОВ<sup>1</sup>

Статья поступила 14 сентября 2015 г.

Исследуем кратковременную ползучесть титанового сплава ВТ1-0, который характеризуется развитыми пластическими и вязкими свойствами [1].

Механические характеристики при сложном напряженном состоянии определяли на трубчатых образцах, подвергнутых стационарному воздействию растягивающей силы  $F$  и крутящего момента  $M$  (рис. 1).

При относительно тонкой толщине стенки образца напряженное состояние считают однородным. Под воздействием заданных усилий в стенке трубчатого образца создаются нормальное  $\sigma$  и касательное  $\tau$  напряжения. Опытные данные получают при разных  $\sigma/\tau$ . Например, в работах [2, 3] результаты экспериментальных исследований получены при равной интенсивности напряжений, в публикации [4] — при  $\sigma = 2\tau$ , где напряжения  $\sigma$  и  $\tau$  оказывали равный вклад в максимальное касательное напряжение. Таким образом, при определении механических характеристик при сложном напряженном состоянии рекомендуется проводить испытания при заданном инвариантном тензоре напряжений (рассматривают интенсивность напряжений либо одно из максимальных напряжений). Подобные данные получены для ограниченного числа металлических материалов [2–4], при этом экспериментальное исследование ползучести титановых сплавов при сложном напряженном состоянии проведено впервые (опытные данные кратковременной ползучести двух других титановых сплавов при одноосном растяжении приведены в статье [5]). При описании процесса установившейся ползучести (процесс

деформирования протекает при постоянных скоростях  $\dot{\epsilon}_0$  продольного удлинения  $u$  и  $\dot{\phi}_0$  — изменения угла поворота  $\phi$ ) рассмотрим степенную зависимость [6]

$$\dot{\epsilon}_{\text{inv}} = A^{-1} \sigma_{\text{inv}}^n, \quad A, n > 1, \quad (1)$$

где  $A, n$  — материалы параметры при изотермической ползучести;  $\dot{\epsilon}_{\text{inv}}, \sigma_{\text{inv}}$  — инварианты тензоров скоростей деформаций и напряжений. В качестве инвариантных рассмотрим следующие характеристики:  $\epsilon_{\text{max}}$  и  $\sigma_{\text{max}}$  — максимальные нормальные деформация и напряжение;  $\gamma_{\text{max}}$  — деформация максимального сдвига;  $\tau_{\text{max}}$  — максимальное касательное напряжение. Выражения скоростей деформаций на стадии установившейся ползучести при растяжении и кручении трубчатого образца приведены в статье [4]:

$$\dot{\epsilon}_0 = \frac{\dot{u}_0}{l}, \quad \dot{\gamma}_0 = \dot{\phi}_0 \frac{D}{2l}, \quad (2)$$

где  $D$  — внешний диаметр;  $l$  — длина рабочей части.

Расчетные соотношения скоростей максимальных деформаций при совместном растяжении и кручении трубчатого образца представлены в статье [6] (справедливы только в рамках установившейся ползучести для не зависящих от времени процесса деформирования компонент  $\dot{\epsilon}_0$  и  $\dot{\gamma}_0$ ):

$$\dot{\epsilon}_{\text{max}} = \frac{\dot{\epsilon}_0}{4} + \sqrt{\left(\frac{3\dot{\epsilon}_0}{4}\right)^2 + \left(\frac{\dot{\gamma}_0}{2}\right)^2}, \quad \dot{\gamma}_{\text{max}} = \sqrt{\left(\frac{3\dot{\epsilon}_0}{2}\right)^2 + \dot{\gamma}_0^2}. \quad (3)$$

Рассмотрим различные зависимости, описывающие процесс ползучести при сложном напряженном состоянии:  $\dot{\epsilon}_{\text{max}}(\sigma_{\text{max}})$  и  $\dot{\gamma}_{\text{max}}(\tau_{\text{max}})$ . Искомую зависимость  $\dot{\epsilon}_{\text{inv}}(\sigma_{\text{inv}})$  установим из анализа минимальных суммарных расхождений теоретических и опытных значений:

$$\Delta = \min \left( \sum_{k=1}^N \left| \frac{\lg \dot{\epsilon}_{\text{inv}}^{\text{approx}}}{\lg \dot{\epsilon}_{\text{inv}}^{\text{exper}}} \right| \right), \quad (4)$$

где  $k$  — порядковый номер,  $N$  — количество опытов.

Результаты экспериментальных исследований получены на силовой установке ИМех-5 [7]. Трубчатые образцы ( $d = 14,0$ ,  $D = 16,1$  и  $l = 130,0$  мм) подвергали совместному растяжению и кручению под действием двух стационарных усилий  $F$  и  $M$ . Растягивающее

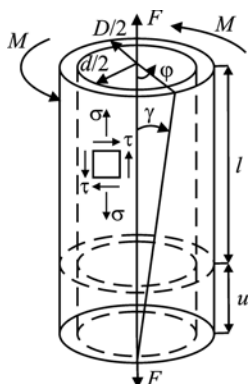


Рис. 1. Схема нагружения трубчатого образца

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 16-08-00014, № 17-08-00211.



Рис. 2. Испытанные образцы (по номерам опытов слева направо)

усилие  $F$  создавалось силой тяжести гирь массой 10 кг и наращивалось по кусочно-постоянной программе 20 кг/с. При достижении заданной величины  $F$  прикладывали крутящий момент  $M$ . Верхний захват на протяжении эксперимента оставался неподвижным, при этом угол закручивания  $\varphi(t)$  измеряли по изменению положения нижнего подвижного захвата ( $t$  — время с момента приложения внешних усилий). При этом на стадии установившейся ползучести скорость удлинения  $\dot{u}_0 = \dot{\varphi}_0 [u_{\max} / \varphi_{\max}]$  ( $u_{\max}$  и  $\varphi_{\max}$  — максимальные удлинение и угол закручивания). Образец нагревали в печи при температуре 550 °С (процесс деформирования протекал в реальном времени). Температуру образца контролировали в трех точках термопарами типа ХА(К) (рабочий диапазон 40 – 1000 °С). Разница температур в концевых точках оказалась равной 1 °С. Испытания проводили при разных максимальных напряжениях  $\sigma_{\max} = 100$  МПа (табл. 1) и  $\tau_{\max} = 50$  МПа (табл. 2). При различных от-

Таблица 1. Характеристики установившейся ползучести при растяжении и кручении трубчатых образцов при  $\sigma_{\max} = 100$  МПа

Характеристики	Номер опыта		
	1	2	3
$\sigma/\tau$	1,0	2,0	3,0
$\sigma$ , МПа	61,8	82,8	90,8
$\tau$ , МПа	61,8	41,4	30,2
$F$ , Н	3066	4110	4508
$M$ , Н · м	21,6	14,6	10,6
$\dot{u}_0$ , мм/ч	6,1	9,9	11,0
$\dot{\varphi}_0$ , град/ч	111	78	50

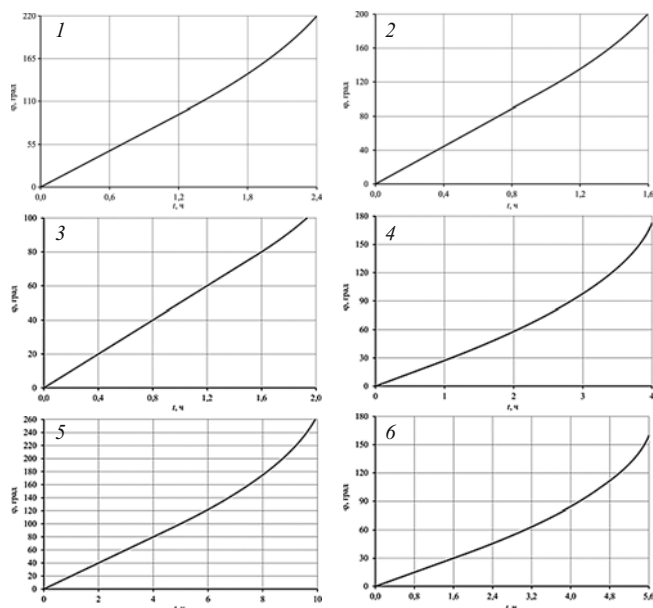


Рис. 3. Зависимости угла поворота от времени, полученные в опытах 1 – 6

ношениях  $\sigma/\tau$  касательное напряжение вычислялось по формулам

$$\tau = \frac{\sigma_{\max}}{2} \left[ \sqrt{4 + \left(\frac{\sigma}{\tau}\right)^2} - \frac{\sigma}{\tau} \right], \quad (5)$$

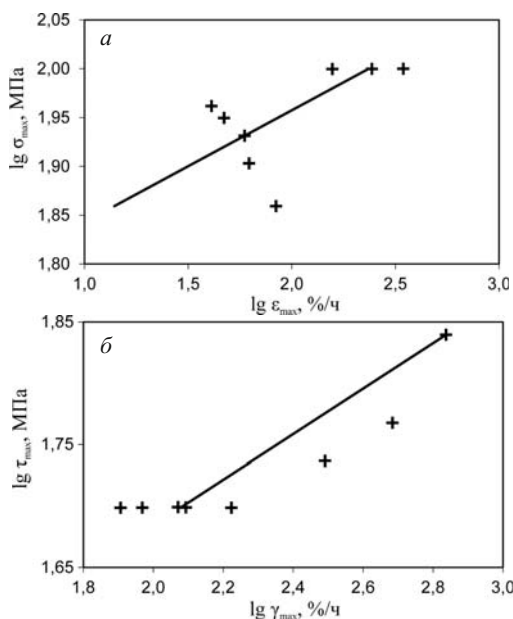
$$\tau = \frac{2\tau_{\max}}{\sqrt{4 + (\sigma/\tau)^2}}. \quad (6)$$

Визуальный осмотр испытанных образцов (рис. 2) показал однородность процесса деформирования (первая особенность процесса ползучести). При анализе кривых ползучести (рис. 3) установлены два последовательных участка зависимости  $\varphi(t)$ :  $\dot{\varphi}(t) = \dot{\varphi}_0$  (установившаяся ползучесть);  $\dot{\varphi}(t) > \dot{\varphi}_0$  (ползучесть при разупрочнении).

Ввиду особенности конструкции силовой установки при достижении величин  $\varphi_{\max}$  (вторая особенность процесса ползучести) образцы не удалось довести до момента разрушения (средний угол поворота составил 178°). В координатных осях  $\lg(\dot{\varepsilon}_{\text{inv}}) - \lg(\sigma_{\text{inv}})$

Таблица 2. Характеристики установившейся ползучести при растяжении и кручении трубчатых образцов при  $\tau_{\max} = 50$  МПа

Характеристики	Номер опыта				
	4	5	6	7	8
$\sigma/\tau$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$\sigma$ , МПа	44,7	60,0	70,7	78,1	83,2
$\tau$ , МПа	44,7	40,0	35,4	31,2	27,7
$F$ , Н	2219	2977	3509	3875	4129
$M$ , Н · м	15,7	14,0	12,4	10,9	9,7
$\dot{u}_0$ , мм/ч	1,5	1,5	2,1	3,3	3,6
$\dot{\varphi}_0$ , град/ч	27	20	19	15	13



**Рис. 4.** Опытные (значки) и расчетные (прямые) зависимости  $\lg \dot{\epsilon}_{\max} = 8,7 \lg \sigma_{\max} - 15,1$  при  $\Delta = 2,1$  (а) и  $\lg \dot{\gamma}_{\max} = 5,4 \lg \tau_{\max} - 7,1$  при  $\Delta = 0,9$  (б)

зависимости (1) представлены отрезками прямых (рис. 4). Значения расчетных параметров зависимостей  $\dot{\epsilon}_{\max}(\sigma_{\max})$  и  $\dot{\gamma}_{\max}(\tau_{\max})$  составили:  $\lg A = 15,07$ ,  $n = 8,7$  и  $\lg A = 7,09$ ,  $n = 5,4$ , при этом отношение величин  $\Delta$  равно 2,3.

Таким образом, при описании процесса установившейся ползучести при растяжении и кручении трубчатых образцов следует использовать инвариантную зависимость  $\dot{\gamma}_{\max}(\tau_{\max})$ , что подтверждается результатами анализа опытных данных [4, 6].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колачев Б. А., Елагин В. И., Ливанов В. А. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов*. — М.: МИСИС, 2001. — 416 с.

2. Можаровская Т. Н. Критерий длительной прочности и ползучести металлических материалов при сложном напряженном состоянии / Проблемы прочности. 1988. № 2. С. 57 – 60.
3. Kowalewski Z. L. Biaxial creep study of cooper on the basis of isochronous creep surfaces / Arch. Mech. 1996. Vol. 48. N 1. P. 89 – 109.
4. Nazarov V. V. Determination of creep properties under tension and torsion of copper tubular specimens / Inorganic Materials. 2014. Vol. 50. N 15. P. 1514 – 1515.
5. Назаров В. В. Кратковременная ползучесть титановых сплавов VT5 и VT6 при высокой температуре / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 6. С. 57 – 60.
6. Назаров В. В. Описание установившейся ползучести при растяжении и кручении трубчатых образцов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 7. С. 60 – 61.
7. Ковальков В. К., Назаров В. В., Новотный С. В. Методика проведения высокотемпературных испытаний при сложном напряженном состоянии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2006. Т. 72. № 4. С. 42 – 44.

## REFERENCES

1. Kolachev B. A., Elagin V. I., Livanov V. A. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka tsvetnykh metallov i spлавov* [Metal science and thermal processing of non-ferrous metals and alloys]. — Moscow: Izd. MISIS, 2001. — 416 p. [in Russian].
2. Mozharovskaya T. N. Kriterii dlitel'noi prochnosti i polzuchesti metallicheskikh materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii [The criterion of creep rupture and creep metal materials under complex stress] / Probl. Prochn. 1988. N 2. P. 57 – 60 [in Russian].
3. Kowalewski Z. L. Biaxial creep study of cooper on the basis of isochronous creep surfaces / Arch. Mech. 1996. Vol. 48. N 1. P. 89 – 109.
4. Nazarov V. V. Determination of creep properties under tension and torsion of copper tubular specimens / Inorganic Materials. 2014. Vol. 50. N 15. P. 1514 – 1515.
5. Nazarov V. V. Kratkovremennaya polzuchest' titanovykh spлавov VT5 i VT6 pri vysokoi temperature [Short-term creep of titanium alloys VT5 and VT6 at high temperature] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 6. P. 57 – 60 [in Russian].
6. Nazarov V. V. Opisanie ustanovivsheisya polzuchesti pri rastyazhenii i kruchenii trubchatykh obraztsov [Description of steady creep tensile and torsion tubular samples] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 7. P. 60 – 61 [in Russian].
7. Koval'kov V. K., Nazarov V. V., Novotnyi S. V. Metodika provedeniya vysokotemperaturnykh ispytaniy pri slozhnom napryazhennom sostoyanii [Procedure of high-temperature within complex stressed state] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2006. Vol. 72. N 4. P. 42 – 44 [in Russian].

© В. В. Назаров  
НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия;  
e-mail: inmec130@mail.ru