УДК 539.376

О ПОЛЗУЧЕСТИ ПЛАСТИН ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ИЗГИБЕ

И. А. Банщикова, Б. В. Горев, И. Ю. Цвелодуб

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск
E-mail: binna@ngs.ru

Приведены результаты экспериментов по ползучести алюминиевого сплава В95пчТ2. Построены определяющие уравнения установившейся ползучести, с использованием которых решена задача о чистом кручении квадратной пластины. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных значений кривизны пластины.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, ползучесть, разносопротивляемость растяжению и сжатию, кручение квадратной пластины.

Современные конструкционные сплавы обладают рядом деформационно-прочностных особенностей, таких как разносопротивляемость растяжению и сжатию и анизотропия. Наиболее отчетливо эти особенности проявляются при повышенных температурах [1].

1. Экспериментальные данные. Определяющие уравнения. Для определения характеристик ползучести алюминиевого сплава В95пчТ2 при растяжении и сжатии и температуре $T = 180$ °C были изготовлены образцы из плит толщиной 40 и 50 мм, вырезанные в различных направлениях (продольном, поперечном, по нормали к плите). Эксперименты проводились при различных постоянных во времени напряжениях σ в диапазоне 270 МПа $\leqslant |\sigma| \leqslant$ 320 МПа. Эспериментальные данные на установившейся стадии ползучести обрабатывались с использованием степенной зависимости между скоростью деформаций η и напряжением σ:

$$\sigma > 0: \quad \eta = B_1\sigma^{n_1}, \qquad \sigma < 0: \quad \eta = B_2|\sigma|^{n_2-1}\sigma. \tag{1}$$

Получены следующие значения констант:

— для плиты толщиной 50 мм $B_1 = 7{,}2 \cdot 10^{-31}$ МПа$^{-n_1} \cdot$ с$^{-1}$, $B_2 = 2 \cdot 10^{-31}$ МПа$^{-n_2} \cdot$ с$^{-1}$, $n_1 = n_2 = 10$;

— для плиты толщиной 40 мм $B_1 = 6 \cdot 10^{-55}$ МПа$^{-n_1} \cdot$ с$^{-1}$, $n_1 = 20$, $B_2 = 2{,}43 \times 10^{-43}$ МПа$^{-n_2} \cdot$ с$^{-1}$, $n_2 = 15$.

Следовательно, свойства ползучести одного и того же сплава существенно зависят от толщины плиты. Результаты экспериментов позволяют считать (по крайней мере, в первом приближении) материал В95пчТ2 при $T = 180$ °C изотропным, но с различными свойствами при растяжении и сжатии. Тогда аналогично [2] зависимость (1) можно обобщить на сложное напряженное состояние:

$$\eta_{kl} = \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{kl}}, \qquad 2\Phi(\sigma_i, \xi) = \Phi_1 + \Phi_2 + (\Phi_2 - \Phi_1)\sin 3\xi,$$
$$\Phi_1 = B_1\sigma_i^{n_1+1}/(n_1+1), \qquad \Phi_2 = B_2\sigma_i^{n_2+1}/(n_2+1). \tag{2}$$

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 05-01-00673, 05-01-08025).

Здесь η_{kl}, σ_{kl} $(k,l=1,2,3)$ — компоненты тензоров скоростей деформаций ползучести и напряжений в выбранной системе координат $Ox_1x_2x_3$; Φ — потенциал ползучести; σ_i — интенсивность напряжений; ξ — угол вида напряженного состояния.

Величины σ_i и ξ определены в [2]. При плоском напряженном состоянии, как в рассматриваемом ниже случае изгиба пластин, имеем

$$\sigma_i^2=\sigma_{11}^2+\sigma_{22}^2-\sigma_{11}\sigma_{22}+3\sigma_{12}^2, \qquad \sin 3\xi=(1/2)(I/\sigma_i)^3-(3/2)(I/\sigma_i), \tag{3}$$

где $I=\sigma_{11}+\sigma_{22}$.

Из (2), (3) получим

$$\begin{gathered}
2\Phi(\sigma_{11},\sigma_{22},\sigma_{12})=\Phi_1(\sigma_i)+\Phi_2(\sigma_i)+[\Phi_2(\sigma_i)-\Phi_1(\sigma_i)](\zeta^3-3\zeta)/2, \qquad \zeta=I/\sigma_i,\\
\eta_{11}=\Phi_3(2\sigma_{11}-\sigma_{22})+\Phi_4(\sigma_{22}^2-\sigma_{11}\sigma_{22}+2\sigma_{12}^2),\\
\eta_{22}=\Phi_3(2\sigma_{22}-\sigma_{11})+\Phi_4(\sigma_{11}^2-\sigma_{11}\sigma_{22}+2\sigma_{12}^2),\\
\eta_{12}=3\Phi_3\sigma_{12}-\Phi_4(\sigma_{11}+\sigma_{22})\sigma_{12},\\
\Phi_3=(B_1\sigma_i^{n_1-1}+B_2\sigma_i^{n_2-1})/4+(B_2\sigma_i^{n_2-1}-B_1\sigma_i^{n_1-1})(\zeta^3-3\zeta)/8,\\
\Phi_4=\frac{9}{8}\Big(\frac{B_2}{n_2+1}\,\sigma_i^{n_2-2}-\frac{B_1}{n_1+1}\,\sigma_i^{n_1-2}\Big)(\zeta^2-1).
\end{gathered} \tag{4}$$

Отметим, что при $n_1\ne n_2$ потенциал Φ из (2), в отличие от общепринятых потенциалов, не является однородной функцией и зависит от второго и третьего инвариантов девиатора напряжений.

При определении мгновенных упругих характеристик исследуемого материала установлено, что при $T=180$ °C сплав В95пчТ2 является изотропным с одинаковыми свойствами при растяжении и сжатии: модуль Юнга $E=57$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu=0{,}4$.

2. Кручение квадратной пластины. Рассмотрим изготовленную из сплава В95пчТ2 (плита толщиной 40 мм) квадратную пластину с размерами 12 × 180 × 180 мм, которая находится в условиях чистого кручения при $T=180$ °C под действием единичного крутящего момента M, эквивалентного изгибающим моментам разных знаков $M_1=-M_2=M$, равномерно распределенным вдоль краев пластины (рис. 1). В эксперименте такую схему нагружения можно реализовать путем приложения в углах пластины сосредоточенных сил $P=2M$, как это показано на рис. 2 [3]. Темными и светлыми точками на рис. 2 показаны экспериментальные зависимости кривизны $\varkappa$ от времени без учета начальной упругой составляющей $\varkappa_0=\varkappa(0)$ при действии единичного крутящего момента $M=4{,}843$ кН·м/м (данные двух экспериментов при одном и том же значении M). На рис. 3 показана пластина, отформованная в течение двух часов.

Для решения задачи о кручении пластины использовалась разработанная авторами данной работы программа “CreePL”, предназначенная для расчета процесса формообразования панелей двойной кривизны в кинематической постановке в условиях, близких к условиям чистого изгиба. При этом полные деформации ε_{kl} представляют собой сумму упругих деформаций ε_{kl}^e и деформаций ползучести ε_{kl}^c:

$$\varepsilon_{kl}^e+\varepsilon_{kl}^c=-zw_{,kl}. \tag{5}$$

Здесь

$$\varepsilon_{kl}^e=\frac{1-\nu}{E}\,\sigma_{nn}\delta_{kl}+\frac{1+\nu}{E}\,\sigma_{kl}^0, \qquad \sigma_{kl}^0=\sigma_{kl}-\frac{1}{2}\,\sigma_{nn}\delta_{kl}, \qquad \dot\varepsilon_{kl}^c=\eta_{kl} \qquad (k,l=1,2),$$

w — прогиб; σ_{kl}^0 и δ_{kl} — компоненты плоских девиатора напряжений и единичного тензора; индекс k после запятой означает производную по координате x_k; по повторяющимся

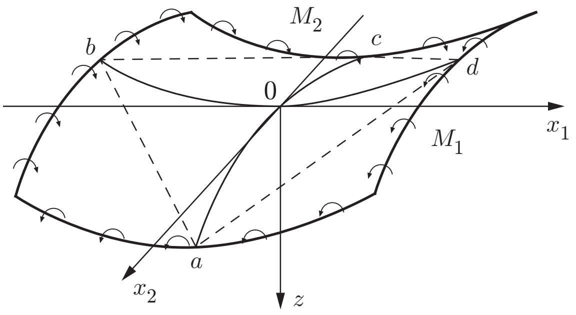

Рис. 1

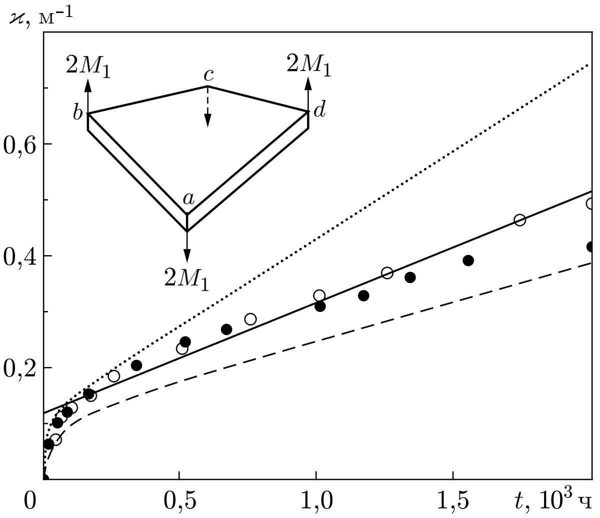

Рис. 2

Рис. 1. Схема нагружения пластины крутящим моментом M

Рис. 2. Экспериментальные (точки) и теоретические (линии) зависимости кривизны пластины от времени:

сплошная линия — расчет для кинематического режима формообразования ($A_1 = 0{,}95$ м$^{-1}$, $A_2 = 0{,}5$ м$^{-1}$); пунктирная — расчет, выполненный по характеристикам материала на растяжение ($n_1 = n_2 = 20$, $B_1 = B_2 = 6 \cdot 10^{-55}$ МПа$^{-20} \cdot$ с$^{-1}$); штриховая линия — расчет, выполненный по характеристикам материала на сжатие ($n_1 = n_2 = 15$, $B_1 = B_2 = 2{,}43 \cdot 10^{-43}$ МПа$^{-15} \cdot$ с$^{-1}$)

индексам проводится суммирование от 1 до 2. Скорости деформаций ползучести η_{kl} определяются согласно (4). Ось Oz перпендикулярна плоскости Ox_1x_2, $|z| \leqslant h/2$ (h — толщина пластины).

При известной функции $w = w(x_1, x_2, t)$ продифференцированные по t соотношения (5) совместно с (4) в каждой точке пластины представляют собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений по времени для нахождения компонент напряжений $\sigma_{kl} = \sigma_{kl}(x_1, x_2, z, t)$. Начальные условия $\sigma_{kl}\big|_{t=0}$ находятся из (5) при $\varepsilon^c_{kl} = 0$ $(k, l = 1, 2)$. Указанная система решается методом Рунге — Кутты — Мерсона четвертого порядка с автоматическим выбором шага по времени.

В рассматриваемом случае кручения пластины для решения задачи в кинематической постановке прогиб задавался в виде $w = (A_1 + A_2 t/t_*) x_1 x_2$, $-0{,}09$ м $\leqslant x_k \leqslant 0{,}09$ м $(k = 1, 2)$, $t_* = 2$ ч.

На рис. 2 сплошная линия — кривизна, соответствующая режиму при $A_1 = 0{,}95$ м$^{-1}$, $A_2 = 0{,}5$ м$^{-1}$. Эта зависимость показана без учета начальной упругой составляющей $\varkappa_0 = 0{,}8333$ м$^{-1}$, соответствующей экспериментальному моменту $M = 4{,}843$ кН $\cdot$ м/м. Значения A_1, A_2 выбраны таким образом, чтобы при $0 < t \leqslant t_*$ соответствующий крутящий момент (сплошная линия на рис. 4) был наиболее близок к значению $M = 4{,}843$ кН $\cdot$ м/м (штриховая линия на рис. 4).

Пунктирная и штриховая линии на рис. 2 соответствуют аналогичным расчетам с использованием программы “ANSYS” в предположении, что материал является изотропным с одинаковыми свойствами на растяжение и сжатие; пунктирная линия соответствует расчету, выполненному только по характеристикам на растяжение; штриховая линия — расчету, выполненному только по характеристикам на сжатие. Эти зависимости дают

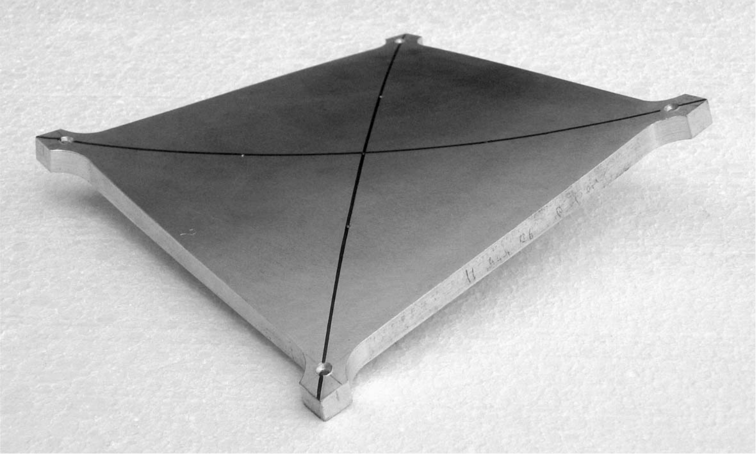

Рис. 3. Пластина, отформованная в течение двух часов

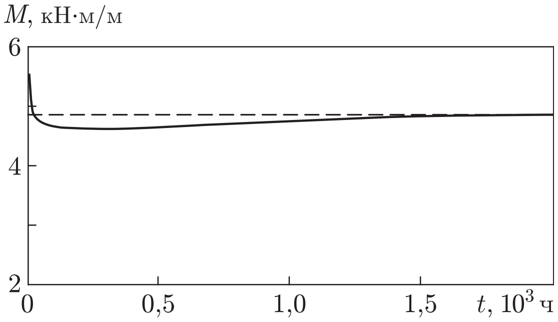

Рис. 4. Зависимость крутящего момента от времени:
штриховая линия — постоянный момент M; сплошная — расчет для заданного кинематического режима, которому соответствует сплошная линия на рис. 2

верхнюю и нижнюю оценки для эксперимента и расчета, выполненного с использованием зависимостей (4), (5).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Никитенко А. Ф.** Ползучесть и длительная прочность металлических материалов. Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. архит.-строит. ун-та, 1997.
2. **Цвелодуб И. Ю.** Постулат устойчивости и его приложения в теории ползучести металлических материалов. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1991.
3. **Тимошенко С. П.** Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. М.: Физматгиз, 1963.

Поступила в редакцию 26/X 2006 г.