

УДК 539.3

В. В. ГАРАНИКОВ

*Тверской государственный технический университет, Россия*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ СПЛАВА АК-8**

В статье представлены результаты экспериментального исследования ползучести сплава АК-8 на круговых траекториях нагружения в пространстве напряжений. Программа испытаний предусматривала приостановки нагружения через каждую четверть окружности с целью изучения ползучести в данных состояниях. Обнаружена ползучесть в тех точках, где реализуется активный процесс нагружения.

**Введение.** Алюминиевый сплав АК-8 находит применение в ответственных машиностроительных конструкциях. Однако некоторые его свойства, определяющие прочность и долговечность, такие, например, как ползучесть, изучены недостаточно. Поэтому целью представленной работы является экспериментальное определение характеристик ползучести сплава АК-8 при разных режимах нагружения.

**Методика проведения экспериментальных исследований пластичности и ползучести при сложном нагружении.** Экспериментальные исследования пластичности и ползучести при сложном нагружении проводились на автоматизированном расчетно-экспериментальном комплексе СН-ЭВМ (рисунки 1). Он разработан в лаборатории механических испытаний кафедры сопротивления материалов, теории упругости и пластичности Тверского государственного технического университета под руководством заслуженного деятеля науки и техники РФ, д. т. н., проф. В. Г. Зубчанинова [7]. Названный комплекс уникален по своим возможностям и позволяет получать новые фундаментальные научные результаты мирового уровня.

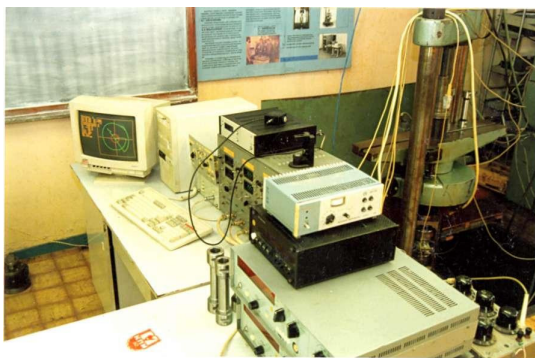


Рисунок 1 – Испытательный комплекс СН-ЭВМ

Комплекс состоит из нагружающей установки, реализующей трехпараметрическое воздействие на образец (осевая сила, кручение и внутреннее давление), датчиков сил и деформаций, управляющей ЭВМ типа IBM PC и устройства связи с объектом (УСО).

Измерение нагрузок, действующих на образец, осуществляется двухкомпонентным силоизмерителем [2], который рассчитан на осевую силу 60 кН и крутящий момент 0,5 кН·м. Погрешность в определении компонент нагрузки не превышает  $\pm 0,12$  кН,  $\pm 3$  Нм соответственно. Градуировка прибора производилась образцовыми динамометрами типа ДОР-40 и ДОСМ-10 на осевую силу и специальным приспособлением рычажного типа на действие крутящего момента.

Для измерения осевых, окружных и сдвиговых деформаций оболочки применялся экстензометр [3], при помощи которого осевое перемещение образца на базе прибора  $50 \pm 0,1$  мм измеряется с погрешностью не более  $\pm 6 \cdot 10^{-3}$  мм, угол поворота  $\pm 7 \cdot 10^{-4}$  рад, изменение величины радиуса оболочки  $\pm 3 \cdot 10^{-3}$  мм. Диапазон перемещений – осевое 2 мм, угловое 0,25 рад, радиальное  $\pm 0,6$  мм. Единица цифровой регистрации деформации  $4 \cdot 10^{-5}$  на всей шкале и  $4 \cdot 10^{-6}$  на начальном участке, составляющем 10 % от диапазона. Перед установкой на образец тензометр градуируется на специальном устройстве, изготовленном на базе теодолита Т-30. Устройство позволяет независимо регулировать процесс растяжения (сжатия) и закручивания тензометра с точностью по осевым перемещениям  $1 \cdot 10^{-3}$  мм и углу поворота  $1 \cdot 10^{-4}$  рад.

Захваты для образца [1], используемые в испытаниях, состоят из двух колец и корпусной вилки, которые соединены во взаимно перпендикулярных направлениях в горизонтальной плоскости и образуют крестообразный шарнир Гука (рисунок 2). Корпусная вилка верхнего захвата крепится на верхнюю траверсу, а вилка нижнего захвата – непосредственно к двухкомпонентному силоизмерителю. Единый блок «нижний захват-силоизмеритель» устанавливается на нижней подвижной траверсе. При установке образца ролики входят после поворота в соответствующие пазы лысок, что позволяет достичь надежной передачи на образец осевых сил и крутящего момента. Благодаря наличию крестовин захваты могут самоустанавливаться под действием приложенных усилий, что исключает влияние эксцентриситета осевой силы. На рисунке 2 показан образец с установленным тензометром.

Эксперименты выполнены на тонкостенных круговых цилиндрических оболочках (рисунок 3). Образцы изготавливались точением из прутка по следующей технологии: черновая обработка наружной поверхности с припуском на сторону 2 мм, сверление и растачивание внутренней поверхности с припуском 0,1 мм на сторону, чистовая обработка внутренней поверхности при помощи развертки, установка заготовки на оправку и последующая чистовая обработка наружной поверхности образца чистовым точением. Наружная и внутренняя поверхности образцов обработаны по седьмому классу

точности. Тонкостенные трубчатые образцы имели толщину стенки  $h = 1$  мм, радиус срединной поверхности  $R = 15$  мм, длину рабочей части  $L = 6R$ . Перед испытаниями проводился контроль геометрических размеров оболочек в соответствии с ГОСТ 12501–67 и ГОСТ 10006–80 в восьми точках в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Оболочки с разностенностью более 0,03 мм отбраковывались.

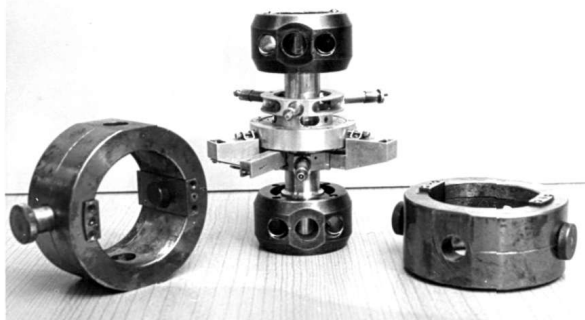


Рисунок 2 – Образец с установленным экстензометром и захваты образцов

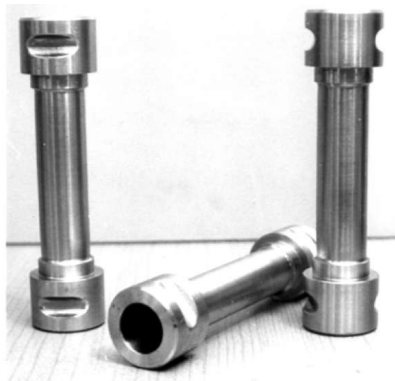


Рисунок 3 – Экспериментальные образцы

При проведении испытаний в пространстве напряжений диапазон изменения скоростей нагружения составлял  $\sigma = 0,02 \dots 0,1$  МПа/с.

Для определения напряжений и деформаций использовались формулы [5]:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= P/F = P/(2\pi Rh); \quad \sigma_{22} = qR/h; \quad \sigma_{12} = M/(2\pi R \cdot 2h); \\ \sigma_{33} &= 0; \quad \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0; \quad \sigma_0 = (\sigma_{11} + \sigma_{22})/3; \\ \varepsilon_{11} &= \Delta l/l; \quad \varepsilon_{22} = \Delta R/R; \quad 2\varepsilon_{12} = \gamma = \varphi R/l, \end{aligned}$$

где  $P$  – осевая сила;  $F = 2\pi Rh$  – площадь сечения тонкостенного трубчатого образца;  $R$  – радиус срединной поверхности;  $h$  – толщина стенки;  $q$  – интен-

сивность внутреннего давления;  $M$  – крутящий момент;  $\varphi$  – угол закручивания;  $\Delta l$ ,  $l$  – продольная деформация и длина рабочей части соответственно;  $\gamma$  – угол сдвига.

Опыты на простое нагружение образцов показали, что при значениях модуля вектора деформаций, больших 0,005, фиксируемый коэффициент Пуассона стремится к значению  $\mu = 0,5$ , что позволило при обработке экспериментальных данных считать материалы условно несжимаемыми и использовать в расчетах для компонент векторов деформаций и напряжений выражения:

$$\mathcal{E}_1 = \sqrt{3/2} \varepsilon_{11}; \mathcal{E}_2 = \sqrt{2} (\varepsilon_{22} + \varepsilon_{11} / 2); \mathcal{E}_3 = \sqrt{2} \varepsilon_{12}; \mathcal{E}_4 = \mathcal{E}_5 = 0;$$

$$S_1 = \sqrt{3/2} (\sigma_{11} - \sigma_{22} / 2); S_2 = \sigma_{22} / \sqrt{2}; S_3 = \sqrt{2} \sigma_{12}; S_4 = S_5 = 0.$$

**Результаты экспериментального исследования ползучести на круговых траекториях нагружения в пространстве напряжений.** Экспериментальное исследование ползучести проведено на образцах из сплава АК-8. Проведен эксперимент по прямому наблюдению ползучести на круговых траекториях нагружения. Программа испытаний реализует условия  $\sigma = \text{const}$  и  $S_i \neq \text{const}$  (см. рисунок 4, а).

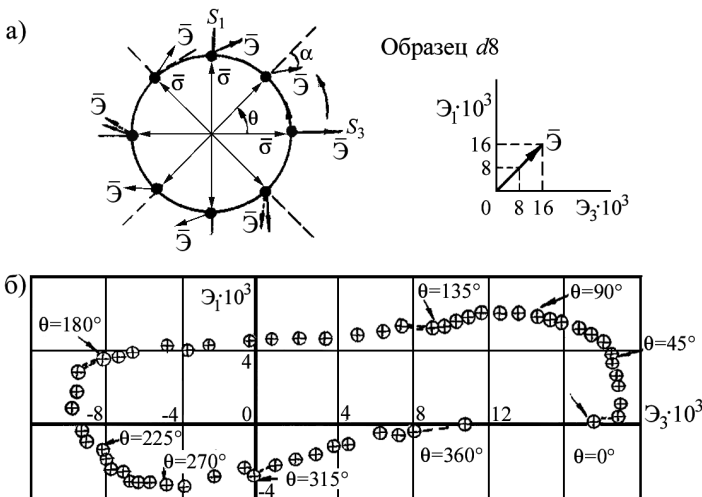


Рисунок 4 – Программа испытаний на ползучесть (а) и траектория деформаций (б)

Предварительно осуществлялось кручение до появления напряжения  $S_3 = 230$  МПа, а затем реализовывалась программа сложного нагружения по траектории, имеющей постоянную кривизну в пространстве напряжений. Данная программа предусматривала приостановки нагружения через каждую четверть окружности с целью изучения ползучести в этих состояниях. При этом комплекс СМ-ЭВМ в автоматизированном режиме

поддерживал режим  $\sigma = \text{const}$ . Угол  $\theta$  (см. рисунок 4, а) отсчитывался от направления оси  $S_3$  против часовой стрелки.

Отклик на реализованную программу представлен в виде траектории деформации (см. рисунок 4, б), где стрелками с значением угла  $\theta$  отмечены моменты начала остановки нагружения и начала режима поддержания постоянного напряжения. Ползучесть обнаруживается в точках  $\theta = 0^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 315^\circ, 360^\circ$ . На траектории деформации (см. рисунок 4, б) процесс ползучести отмечен пунктирными линиями. На траектории нагружения в точках остановки (см. рисунок 4, а) на концах вектора напряжений  $\sigma$  отложен вектор деформаций  $\epsilon$ . В точках  $\theta = 135^\circ, 180^\circ, 315^\circ$  на рисунке показаны по два вектора деформаций, в начале (пунктиром) и в конце испытания на ползучесть (сплошной). Ползучесть приводит к некоторому уменьшению угла между векторами напряжений и деформаций ( $\alpha$ ).

На рисунке 5 представлены кривые ползучести для точек траектории нагружения, в которых обнаружена ползучесть. Ползучесть носит ограниченный характер, причем деформация ползучести в окружном направлении  $\epsilon_{12}^r$  превышает деформацию ползучести в осевом направлении  $\epsilon_{11}^r$ . Данное обстоятельство можно объяснить начальной анизотропией сплава АК-8, жесткость которого при растяжении выше, чем при кручении.

Интерес, на наш взгляд, представляет рассмотрение вопроса о проявлении ползучести с энергетической точки зрения. При угле сближения  $\nu_1 < 90^\circ$  элементарная работа положительна, что отвечает активному процессу деформирования. На рисунке 6 представлена зависимость изменения угла сближения  $\nu_1$  от приращения длины траектории деформаций. Из рисунка видно, что в точках, где не обнаружена ползучесть на круговой траектории нагружения

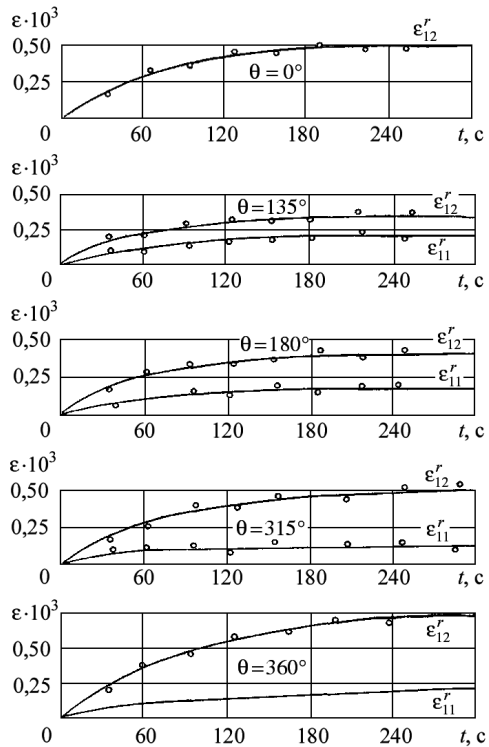


Рисунок 5 – Кривые ползучести для программы по рисунку 4, а

(точки  $\theta = 45^\circ, 90^\circ, 225^\circ, 270^\circ$ ) угол сближения  $v_1 \approx 90^\circ$ , т.е. процесс близок к разгрузке.

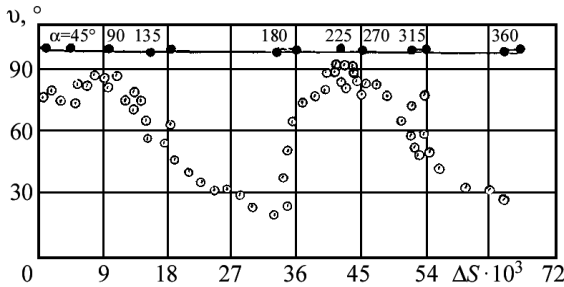


Рисунок 6 – Изменение угла сближения в зависимости от приращения длины траектории деформаций

**Исследование влияния разгрузки на ползучесть при сложном нагружении.** Программы испытаний представлены на рисунке 7.

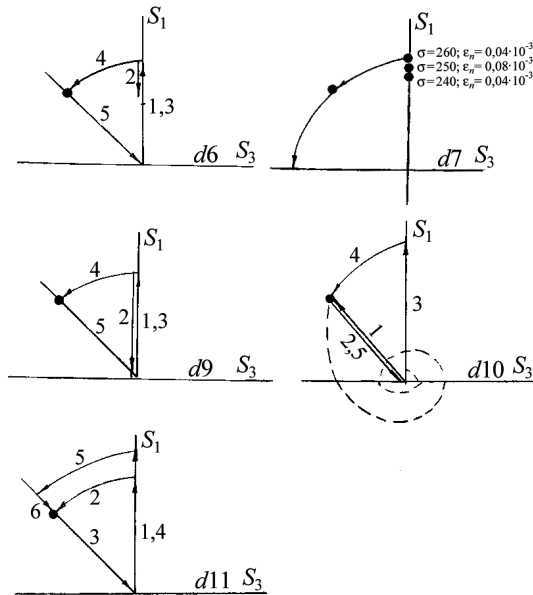


Рисунок 7 – Программы испытаний для различных образцов

Влияние частичной и полной разгрузки изучалось по результатам испытаний образцов  $d6, d7, d9$ . Образец  $d7$  предварительно нагружался до  $S_1 = 250$  МПа, затем реализовано сложное нагружение по кривой постоянной кривизны до точки соответствующей четверти окружности, в которой на-

гружение прекращалось и поддерживалось постоянное напряжение  $\sigma = \text{const}$ . Влияние частичной и полной предварительной разгрузки изучалось на образцах  $d6$ ,  $d9$ . После предварительного простого нагружения до  $S_1 = 230$  МПа и разгрузки в обратном направлении (частичной ( $d6$ ) и полной ( $d9$ )) производилось сложное нагружение по окружности до точки, где исследовалась ползучесть. Результаты испытаний представлены на рисунке 8,  $a$ , из которого видно, что наименьший уровень ползучести отвечает испытаниям с частичной разгрузкой. Данный вывод качественно совпадает с результатами, полученными ранее в работах по исследованию микроползучести [6].

Несколько меньший уровень деформации ползучести при испытании без разгрузки, в сравнении с результатами испытаний с полной разгрузкой, можно объяснить разбросом экспериментальных данных, что характерно для испытаний на ползучесть. Кроме того, при испытании образца  $d7$  при предварительном нагружении на разных уровнях напряжения производилась выборка ползучести, что не могло не отразиться на результатах эксперимента.

Влияние сложного нагружения на ползучесть изучалось по результатам испытаний образцов  $d10$ ,  $d11$  (см. рисунок 7). Образец  $d10$  испытывался по программе простого нагружения (участок 1). В ту же точку, где исследовалась ползучесть, выходили по программе сложного нагружения (образец  $d11$  – участок 1, 2). Сравнение кривых ползучести (рисунок 8,  $b$ ) показывает, что ползучесть при сложном нагружении меньше, чем при простом.

Влияние сложной разгрузки было изучено при повторных испытаниях образцов  $d10$ ,  $d11$  (см. рисунок 7). В этом случае уровень предварительного нагружения был выше, чем при первичных испытаниях и составлял  $S_1 = 280$  МПа. Сложная разгрузка реализована на образце  $d10$  (участок 4), по траектории в виде архимедовой спирали. В точке, соответствующей четверти окружности  $R = 230$  МПа, разгрузка прекращалась и поддерживалось постоянное напряжение  $\sigma = \text{const}$ . Пропорциональная

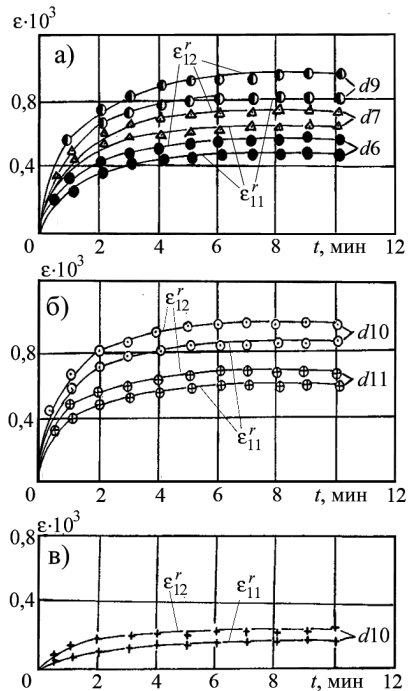


Рисунок 8 – Кривые ползучести при различных условиях нагружения и разгрузки

разгрузка реализована на образце  $d11$ , который также испытывался повторно. После предварительного нагружения  $S_1 = 280$  МПа и нагружения по дуге окружности (участок 5) производилась простая разгрузка (участок 6) в исходную точку, где исследовалась ползучесть. Оказалось, что при сложной разгрузке наблюдается ползучесть, в отличие от простой, где она не обнаруживалась (рисунок 8, в).

Таким образом, в результате проведенных экспериментов установлены особенности процесса ползучести при разных режимах нагружения образцов из алюминиевого сплава АК-8.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Устройство для крепления трубчатых образцов с головками:** а. с. № 1298585 СССР, МКИ: G 01 N 3/04 / А. П. Андреев, В. Г. Зубчанинов, Д. И. Иванов. – № 3973601/25-28; заявл. 10.11.85, опубл. 23.03.87, Бюл. № 11. – 3 с.

2 **Синомоментный датчик:** а. с. № 1624284 СССР, МКИ: G 01 N 3/10 / А. П. Андреев, В. Г. Зубчанинов, Д. И. Иванов. – № 4272335/10; заявл. 30.06.87, опубл. 30.01.91, Бюл. № 4. – 4 с.

3 **Устройство для измерения деформаций при сложном нагружении:** свидетельство на полезную модель № 13092 Россия / МПК<sup>7</sup>: G 01 B716 / В. В. Гараников, В. Г. Зубчанинов, Н. Л. Охлопков. – № 99120485/20; заявл. 27.09.99, опубл. 20.03.00, Бюл. № 8. – С. 309.

4 **Гараников, В. В.** Экспериментальная пластичность. Кн. 1: Процессы сложного деформирования / В. В. Гараников, В. С. Зубчанинов, Н. Л. Охлопков. – Тверь: ТГТУ, 2003. – 172 с.

5 **Гараников, В. В.** Экспериментальная пластичность. Кн. 2: Процессы сложного нагружения / В. В. Гараников, В. С. Зубчанинов, Н. Л. Охлопков. – Тверь: ТГТУ, 2004. – 184 с.

6 **Гараников, В. В.** Микроползучесть конструкционных материалов в условиях различных температур: монография / В. В. Гараников. – Тверь: ТГТУ, 2011. – 76 с.

7 **Автоматизированный комплекс для исследования упруговязкопластических свойств материалов при сложном нагружении:** свидетельство на полезную модель № 7202 Россия / МПК<sup>6</sup>: G 01 N 3/28 / В. Г. Зубчанинов, А. В. Акимов, Н. Л. Охлопков. – № 97108023/20, заявл. 20.05.97, опубл. 16.07.98, Бюл. № 4. – 4 с.

*V. V. GARANIKOV*

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE AK-8 ALLOY CREEPING

The article presents the experimental results for the AK-8 alloy creeping on a circular path of loading in a stress space. The test program included the delays of loading through each circle quarter to study the creep in these points. The creep is found at points with active loading process.

Получено 10.04.2014