

УДК 536.71

ДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг-6 ПРИ НОРМАЛЬНОЙ И ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРАХ

Б. Л. Глушак, О. Н. Игнатова, В. А. Пушков, С. А. Новиков,
А. С. Гирин, В. А. Сеницын

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607190 Саров

Представлены результаты экспериментальных исследований динамического деформирования в условиях одноосного сжатия и растяжения сплава АМг-6 при скорости деформации $\dot{\epsilon} = 190 \div 1450 \text{ с}^{-1}$ и температуре испытаний $25 \div 250 \text{ }^\circ\text{C}$. В рамках упругопластической модели деформируемого твердого тела построено феноменологическое определяющее уравнение, согласующееся с экспериментальными данными.

Алюминиевый сплав АМг-6 находит широкое применение в различных областях современной техники. Однако его механические свойства исследованы, главным образом, при статическом нагружении [1–3]. Экспериментальные данные о поведении этого сплава при динамических нагрузках неполные и получены лишь при нормальной температуре [4, 5].

1. Методика и результаты испытаний. С целью получения динамических диаграмм одноосного сжатия и растяжения использован известный метод составного стержня Гопкинсона (ССГ) [6]. Динамическое нагружение образцов осуществлялось с помощью горизонтального копра. Ударник массой около 4 кг разгонялся копром и при торможении о специальный демпфер создавал в нагружающем стержне импульсную нагрузку, проходящую далее в образец. В опытах при повышенной температуре образцы нагревались в рабочем положении между торцами двух стержней с одновременным нагревом последних. Для нагрева использовался специальный портативный электронагреватель мощностью около 1 кВт. В этом случае нагрев торцов стержней до $300\text{--}400 \text{ }^\circ\text{C}$ не вносит значительных изменений в упругие свойства материала стержней (сталь) и соответственно практически не уменьшает точности метода ССГ [7]. Для создания однородного температурного поля по объему образцов последние выдерживались при заданной температуре, измеряемой хромель-копелевыми термопарами, в течение 4–6 мин.

В опытах на динамическое сжатие использовались нагружающий стержень (диаметр 12 мм, длина 1500 мм) и опорный стержень (диаметр 12 мм, длина 600 мм) из закаленной стали 30ХГСА. Образцы выполнялись в виде сплошных цилиндров (диаметр 8 мм, высота 8 мм).

В опытах на динамическое растяжение нагружающий стержень не менялся, а опорный представлял собой полый цилиндр (наружный диаметр 20 мм, внутренний — 16 мм, высота 500 мм) из той же стали. Исследуемые образцы имели вид наперстка [4] со следующими габаритными размерами: диаметр 20 мм, высота 24 мм (толщина рабочей части 2 мм). Образцы на сжатие и растяжение изготавливались из прутков АМг-6 в состоянии поставки.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 001-01-0052).

Полученные в каждом опыте первичные диаграммы деформирования пересчитывались далее по известной процедуре в координаты интенсивность напряжений — интенсивность деформаций $(\sigma_i - \varepsilon_i)$ [8].

Эксперименты на динамическое сжатие проводились при $T = 25, 150, 250$ °С и скорости деформации $\dot{\varepsilon} = 190 \div 1400$ с⁻¹.

Эксперименты на динамическое растяжение проводились при $T = 25$ °С и скорости деформации $\dot{\varepsilon} = 640 \div 1450$ с⁻¹. Опыты на динамическое растяжение при повышенной температуре из-за сложности контроля температуры рабочей части образца, зажатой коаксиально между нагружающим и опорным стержнями, не проводились.

Эксперименты по динамическому сжатию АМг-6 показали, что при температуре 25, 150, 250 °С увеличение скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ от 190 ÷ 620 до 1020 ÷ 1400 с⁻¹ приводит к увеличению предела текучести $\sigma_{-0,2}$ на 10–12 % (см. таблицу) ($\hat{\sigma}_{\pm 0,2}$ — среднее значение предела текучести). Кроме того, для отмеченных диапазонов $\dot{\varepsilon}$ с ростом температуры от 25 до 250 °С величина $\sigma_{-0,2}$ уменьшается на 18–20 %.

Эксперименты по динамическому растяжению АМг-6 показали, что при нормальной температуре увеличение скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ от 640 ÷ 800 до 1200 ÷ 1450 с⁻¹ также приводит к увеличению предела текучести $\sigma_{+0,2}$ примерно на 11 % (см. таблицу). При этом в диапазоне $\dot{\varepsilon} = 640 \div 800$ с⁻¹ лишь один образец разрушился, а в диапазоне 1200 ÷ 1450 с⁻¹ разрушению подверглись все образцы. Для первого диапазона $\dot{\varepsilon}$ предел прочности $\sigma_{+B} = 310$ МПа, остаточное удлинение при разрыве $\delta = 14$ %, а для второго диапазона $\dot{\varepsilon}$ предел прочности $\sigma_{+B} = (338,3 \pm 16,4)$ МПа, $\delta = (22,0 \pm 1,8)$ % ($p = 0,95$). Из приведенных данных следует, что для $T = 25$ °С и одних и тех же $\dot{\varepsilon}$ предел текучести при сжатии выше, чем при растяжении: $\sigma_{-0,2} > \sigma_{+0,2}$. Такое различие в пределах текучести при сжатии и растяжении характерно для многих материалов. Результаты настоящей работы и работ [4, 5] удовлетворительно согласуются.

2. Определяющее уравнение АМг-6. Будем считать алюминиевый сплав АМг-6 упругопластической средой, для которой интенсивность напряжений σ_i (предел текучести при одноосном напряженном состоянии) зависит от четырех основных переменных, характеризующих ее напряженно-деформированное состояние: интенсивности пластических деформаций ε_i^p , интенсивности скорости пластических деформаций $\dot{\varepsilon}_i^p$, давления P и текущей температуры T [9, 10]: $\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i^p, \dot{\varepsilon}_i^p, P, T)$.

В простейшем случае σ_i представляется в виде произведения четырех простых функций, каждая из которых зависит только от одного параметра [10]:

$$\sigma_i = A f_1(\varepsilon_i^p) f_2(\dot{\varepsilon}_i^p) f_3(P) f_4(T). \quad (1)$$

Здесь функция f_1 описывает деформационное упрочнение, f_2 и f_3 — влияние интенсивности скорости пластической деформации и давления соответственно, f_4 — термическое разупрочнение. Аналитический вид функций f_i и численные значения входящих в них параметров определяются из экспериментальных данных.

Выражение (1) запишем в виде

$$\sigma_i = A [1 + a(\varepsilon_i^p)^n] \left[1 + b \left(\ln \frac{\dot{\varepsilon}_i^p}{\dot{\varepsilon}_{i0}^p} \right)^m \right] \left[1 + c \left(\frac{T}{T_{\text{пл}}} \right)^k \right] (1 + \alpha P), \quad (2)$$

где $A, a, b, c, n, m, k, \alpha$ — постоянные коэффициенты; $\dot{\varepsilon}_{i0}^p = 1$ с⁻¹ — нормировочная величина; T [К] — текущая температура; $T_{\text{пл}} = 933$ К — температура плавления. Константы, определенные из экспериментальных данных при сжатии образцов, имеют следующие значения: $A = 200$ МПа; $a = 22,85$; $n = 1,2$; $b = 5 \cdot 10^{-4}$; $m = 2,9$; $c = -0,8$; $k = 2$; $\alpha = 3,5 \cdot 10^{-5}$ МПа⁻¹. Для растяжения $A = 145$ МПа.

Вид испытания	$T, ^\circ\text{C}$ (T, K)	$\dot{\varepsilon}_i^p, \text{c}^{-1}$	$\sigma_{\pm 0,2}, \text{МПа}$ (эксперимент)	$\hat{\sigma}_{\pm 0,2}, \text{МПа}$ (эксперимент)	$\sigma_{\pm 0,2}, \text{МПа}$ (расчет)
Сжатие	25 (298)	420	190	$188,8 \pm 16,5$	197
		520	175		
		250	200		
		550	190		
Сжатие	25 (298)	1210	210	$210 \pm 7,7$	207
		1100	215		
		1290	200		
		1300	215		
		1130	210		
Сжатие	150 (423)	620	180	$169,6 \pm 8,9$	177
		360	170		
		590	170		
		590	160		
		430	168		
Сжатие	150 (423)	1170	175	190 ± 14	184
		1080	190		
		1300	195		
		1020	185		
		1120	205		
Сжатие	250 (523)	240	153	$159,5 \pm 12,2$	154
		190	155		
		530	170		
		200	160		
Сжатие	250 (523)	1200	170	175	165
		1400	180		
Растяжение	25 (298)	800	142	$141,3 \pm 4,8$	146
		800	138		
		770	145		
		640	140		
Растяжение	25 (298)	1450	160	$156,3 \pm 7,7$	151
		1350	155		
		1200	150		
		1420	160		

Экспериментальные и расчетные по зависимости (2) данные представлены в таблице и на рис. 1. Различие между расчетными и экспериментальными данными составляет не более 10 %, что находится в пределах погрешности эксперимента.

Из (2) можно получить зависимости безразмерной интенсивности напряжений $\bar{\sigma}_{i1} = \sigma_i/\sigma_{i1}$ от интенсивности скорости пластической деформации $\dot{\varepsilon}_i^p$ (рис. 2, а) и $\bar{\sigma}_{i2} = \sigma_i/\sigma_{i2}$ от интенсивности пластической деформации ε_i^p (рис. 2, б) ($\sigma_{i1} = \sigma_i$ при $\dot{\varepsilon}_i^p = \dot{\varepsilon}_{i0}^p$, $T = \text{const}$, $P = \text{const}$, $\varepsilon_i^p = \text{const}$; $\sigma_{i2} = \sigma_i$ при $\dot{\varepsilon}_i^p = 1 \text{ c}^{-1}$, $T = \text{const}$, $P = \text{const}$, $\varepsilon_i^p = \text{const}$).

Из рис. 2 следует, что влияние интенсивности скорости пластического деформирования $\dot{\varepsilon}_i^p$ на упрочнение алюминиевого сплава АМг-6 невелико, а влияние деформационного упрочнения ε_i^p значительно.

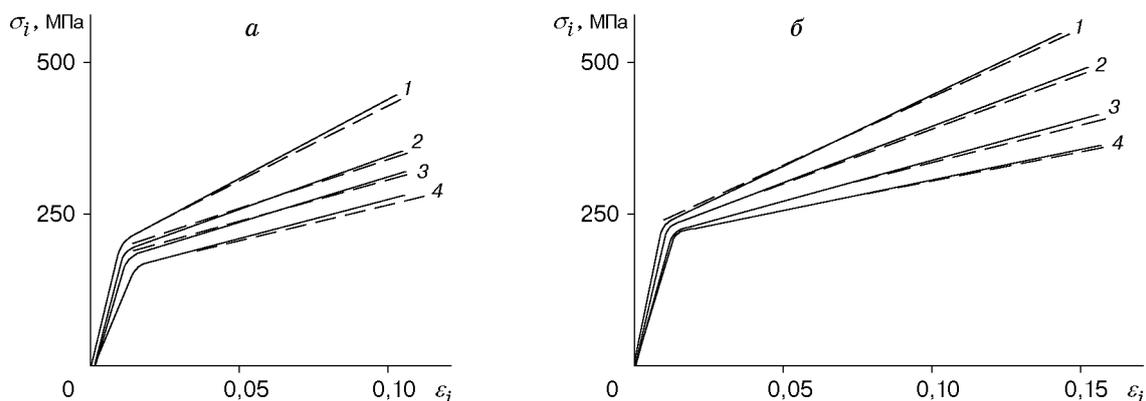


Рис. 1. Типичные диаграммы сжатия и растяжения АМг-6 при $T = 298, 423, 523$ К (кривые 1–3) и растяжения при $T = 298$ К (кривые 4):

сплошные кривые — расчет, штриховые — эксперимент; а — 1 — $\dot{\epsilon} = 250 \div 550 \text{ c}^{-1}$, 2 — $\dot{\epsilon} = 360 \div 620 \text{ c}^{-1}$, 3 — $\dot{\epsilon} = 190 \div 530 \text{ c}^{-1}$, 4 — $\dot{\epsilon} = 640 \div 800 \text{ c}^{-1}$; б — 1 — $\dot{\epsilon} = 1100 \div 1300 \text{ c}^{-1}$, 2 — $\dot{\epsilon} = 1020 \div 1300 \text{ c}^{-1}$, 3 — $\dot{\epsilon} = 1200 \div 1450 \text{ c}^{-1}$, 4 — $\dot{\epsilon} = 1200 \div 1450 \text{ c}^{-1}$

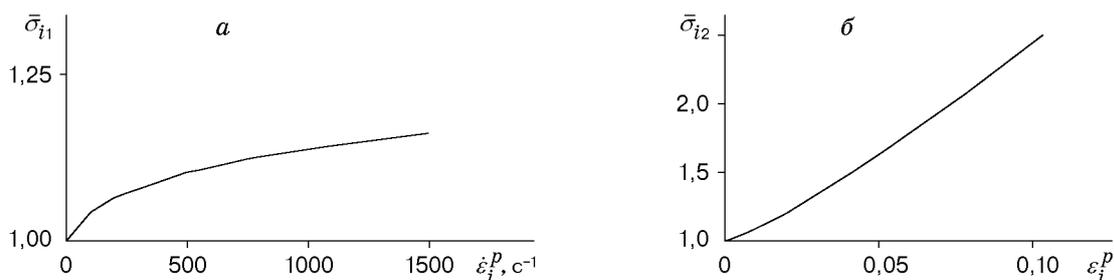


Рис. 2. Зависимости интенсивности напряжений $\bar{\sigma}_{i1}$ от интенсивности скорости пластической деформации $\dot{\epsilon}_i^p$ (а) и $\bar{\sigma}_{i2}$ от интенсивности пластической деформации ϵ_i^p (б)

Известно, что при статическом нагружении повышение температуры алюминиевых сплавов приводит к уменьшению сопротивления твердого тела пластическому деформированию [11]. Эта тенденция сохраняется и при динамических нагрузках (см. таблицу).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Авиационные материалы:** Справ. / Под ред. Р. Е. Шалина. М.: ОНТИ-ВИАМ, 1982. Т. 4, ч. 1.
2. **Арзамасов Б. Н., Сидорин И. И., Косолапов Г. Ф. и др.** Материаловедение. М.: Машиностроение, 1986.
3. **Золоторевский А. П.** Структура и прочность литых алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1981.
4. **Большаков А. П., Новиков С. А., Сеницын В. А.** Исследование динамических диаграмм одноосного растяжения и сжатия меди и сплава АМг-6 // Пробл. прочности. 1979. № 10. С. 87, 88.
5. **Gloushenkov V., Novobratsky R., Bourmistrov A.** Influence of the spread in values of aluminium alloy dynamic properties upon the results of magnetic-pulse strain // Proc. of the conf. DУМАТ-91, Strasbourg, France, Oct. 14–18, 1991. P. с3/331–с3/334.
6. **Музыченко В. П., Кащенко С. И., Гуськов В. А.** Применение составного стержня Гопкинсона при исследовании динамических свойств материалов: Обзор // Завод. лаб. 1986. № 1. С. 58–66.

7. **Лошманов Л. П., Нечаева О. А., Руднев В. Д.** Высокоскоростные испытания при повышенных температурах // Завод. лаб. 1996. № 5. С. 40–42.
8. **Малинин Н. Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975.
9. **Глушак Б. Л., Игнатова О. Н.** Упругопластическая модель динамического деформирования U-238 и его сплава с Мо // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов. 1998. Вып. 2. С. 45–49.
10. **Meyer L. M.** Constitutive equation at high strain rates // Shock-wave and high-strain-rate phenomena in materials / Ed. by M. Meyers, L. Murr, K. Standhammer. N.Y.; Basel; Hong Kong: Marcel Dekker, Inc., 1992. P. 49–68.
11. **Физические** величины: Справ. / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.

*Поступила в редакцию 20/I 1999 г.,
в окончательном варианте — 20/XII 1999 г.*
