

## Деформационное поведение алюминиево-магниевого сплава в условиях термомеханического нагружения\*

*С.В. Макаров<sup>1</sup>, В.А. Плотников<sup>1,2</sup>, Е.А. Колубаев<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup> Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

<sup>2</sup> Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия)

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск, Россия)

## Aluminum-Magnesium Alloy Strain Behavior under Thermomechanical Loading

*S.V. Makarov<sup>1</sup>, V.A. Plotnikov<sup>1,2</sup>, E.A. Kolubaev<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup> Altai State University (Barnaul, Russia)

<sup>2</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia)

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia)

Приведены данные по накоплению деформации в сплаве АМг6 при изотермическом нагружении образцов. В эксперименте регистрировались параметры в реальном режиме времени: нагрузка, деформация. Образец нагружали сдвиговым напряжением и измеряли сдвиговую деформацию. Нагружение осуществляли изотермически в температурном интервале от 25 до 500 °С.

Показано, что при низких температурах основной вклад в накопление деформации вносят макроскопические деформационные скачки. Наряду с монотонным накоплением деформации наблюдаются макроскопические деформационные скачки, дающие существенный вклад в общую деформацию образца. После 300 °С характер накопления меняется: наблюдается экспоненциальный прирост деформации, явно выраженных скачков деформации нет. Однако эффект роста позволяет считать эту стадию накопления деформации как квазискачкообразную, так как монотонные участки накопления при увеличении температуры изотермической выдержки сокращаются и в конечном варианте сливаются в одну быструю квазискачкообразную стадию накопления.

**Ключевые слова:** монотонная деформация, скачкообразная деформация, изотермическое нагружение.

Strain accumulation data for the AlMg6 alloy under isothermal loading are presented. The recorded real-time parameters of the experiment are the load and the strain. A sample has been loaded by a shear stress, and the shearing strain has been measured. Loading is performed isothermally within the temperature range from 25 °C to 500 °C.

It is shown that macroscopic strain jumps provide the main contribution to strain accumulation at low temperatures. Along the monotone strain accumulation, the macroscopic strain jumps with their significant contribution to the overall deformation of the sample are observed. When the temperatures are 300 °C and higher, the strain accumulation behavior undergoes the following changes: the strain increments exponentially without clearly visible strain jumps. However, the strain increment allows this stage of strain accumulation to be treated as a quasi step-like stage. It is explained by the fact that due to increasing of the temperature of isothermal time monotone accumulation areas become smaller until they merge completely into single fast quasi step-like stage of accumulation.

**Keywords:** monotonic deformation, jump deformation, isothermal loading.

DOI 10.14258/izvasu(2015)1.2-05

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0063) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации проекта № 288 «Новые электромагнитные и акустические методы исследования деформационного поведения металлов и сплавов».

**Введение.** Эксперименты по деформированию моно- и поликристаллов алюминия и других металлов и сплавов в широком интервале температур свидетельствуют, что в ходе нагружения накопление деформации осуществляется двояким образом: монотонным путем, когда на зависимости деформации от времени (температуры) процесса отсутствуют события, нарушающие монотонность; немонотонным путем, когда на этой зависимости наблюдаются макроскопические деформационные скачки [1, 2], сопровождаемые акустической эмиссией [3, 4]. Известно, что эффект прерывистой текучести в алюминиево-магнелиевых сплавах при механическом нагружении представляет собой процесс формирования полос деформации, являющихся областями локализации пластической деформации [5]. Прерывистая текучесть на зависимости напряжение — деформация проявляется в скачках (зубцах) напряжения, причем полоса деформации, ответственная за акты прерывистой текучести, является макроскопическим объектом и развивается из критического зародыша полосы. Наблюдаются два типа полос деформации: пространственно неорганизованные полосы и пространственно организованные. Каждый акт прерывистой текучести связан с появлением одной полосы деформации [6].

Проявление закономерностей прерывистой текучести и акустической эмиссии есть следствие волновой природы деформации в алюминиево-магнелиевых сплавах, волна деформации, распространяясь от концентратора напряжений, стимулирует образование полос деформации [7].

Целью данной работы является проведение исследования деформации в алюминиево-магнелиевом сплаве АМг6 при изотермическом нагружении образцов в широком интервале температур.

**Методика экспериментов.** Из пластины алюминиево-магнелиевого сплава АМг6 вырезали образцы в виде стержней длиной 300 мм, в которых были сформированы области локализации деформации диаметром 4 мм и длиной 30 мм. Образец предварительно отжигали при температуре 500 °С в течение 1 часа и охлаждали с печью.

Механическое нагружение, измерение деформации, температуры проводили с помощью установки, схематичное описание которой приведено в публикации [4]. Образец нагружали сдвиговым напряжением и измеряли сдвиговую деформацию. Нагружение осуществляли изотермически в температурном интервале от 25 до 500 °С.

**Экспериментальные результаты.** Экспериментальные данные по накоплению деформации в алюминиево-магнелиевых образцах, полученные в условиях изотермических циклов, представлены на рисунках 1, 2. Из приведенных данных следует, что накопление деформации существенно зависит от температуры изотермического цикла нагружения образца.

При низких температурах (25 °С) характер накопления монотонно-скачкообразный. Наряду с монотонным накоплением деформации наблюдаются макроскопические деформационные скачки, дающие существенный вклад в общую деформацию образца. В то же время накопление деформации при 500 °С не содержит явно выраженных деформационных скачков, хотя величина 21% достигается примерно за время, примерно в два раза меньшее. Обобщенные данные по накоплению деформации в зависимости от температуры приведены в таблице, где показано, что отношение квазискачкообразной деформации к общей представляет собой функцию

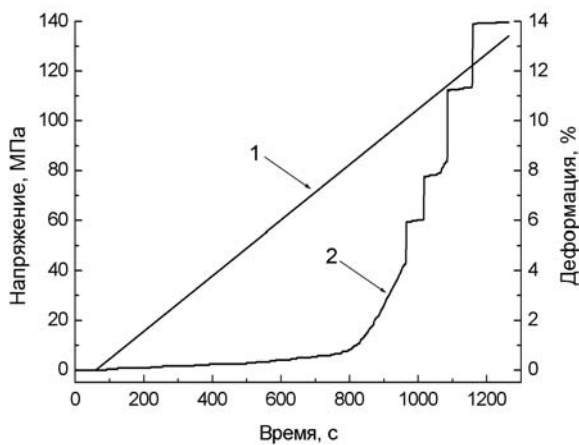


Рис. 1. Накопление деформации в алюминиево-магнелиевом сплаве при температуре T = 25 °С: 1 — изменение напряжения; 2 — изменение деформации

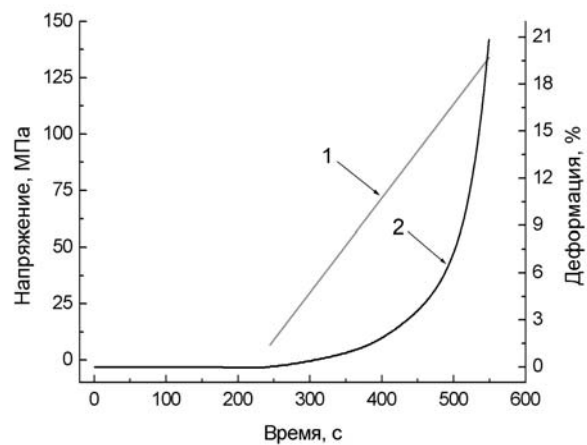


Рис. 2. Накопление деформации в алюминиево-магнелиевом сплаве при температуре T = 500 °С: 1 — изменение напряжения; 2 — изменение деформации

Накопление деформации в изотермических циклах нагружения в интервале температур 25–500 °С

№ цикла	Температура, °С	$\sigma_{\max}$ , МПа	Деформация, %			$\frac{\Delta\varepsilon_{\text{кв.ск.}}}{\Delta\varepsilon_{\text{общ.}}}$
			$D$	$D$	$D$	
1	25	134	13,9	8,7	4,5	0,32
2	100	179	14,9	10,6	5,0	0,33
3	200	202	19,8	13,9	5,2	0,26
4	300	205	20,7	3,8	15,2	0,73
5	400	161	20,1	0	20,1	1
6	500	134	20,9	0	20,9	1

Примечание. В таблице  $\Delta\varepsilon_{\text{общ.}}$  — величина полной деформации образца,  $\Delta\varepsilon_{\text{ск.}}$  — вклад в деформацию за счет макроскопических скачков,  $\Delta\varepsilon_{\text{кв.ск.}}$  — вклад в деформацию за счет квазискачкообразной деформационной составляющей.

с насыщением, характерный вид которой показан на рисунках 3 и 4.

Зависимость вклада макроскопически скачкообразной и квазискачкообразной деформации от температуры свидетельствует, что до 300 °С основной вклад в общую деформацию образца вносят макроскопические деформационные скачки, нагружение после 300 °С сопровождается существенным изменением характера накопления: основной вклад в общую деформацию образца вносит квазискачкообразная деформация. Здесь она представляет собой процесс быстрого накопления без явно выраженных макроскопических деформационных скачков.

Следует отметить, что накопление деформации примерно до 20% при температурах 400 и 500 °С осуществляется при значительном снижении механического напряжения.

**Обсуждение результатов.** В высокотемпературной области накопление деформации представляет собой быстрый монотонный процесс. Проявление высокоскоростных эффектов и тем более деформационных скачков может свидетельствовать о повышении корреляции в системе элементарных деформационных актов. При этом с ростом температуры повышение корреляции в системе элементарных деформационных актов может привести к формированию глобального макроскачка и разрушению материала. Формирование глобального макроскачка свидетельствует о макроскопическом масштабе корреляции деформационных актов в образце.

Элементарным деформационным актом при нагружении образцов является формирование деформационной полосы [5–7]. Очевидно, монотонное накопление деформации обусловлено слабой корреляцией

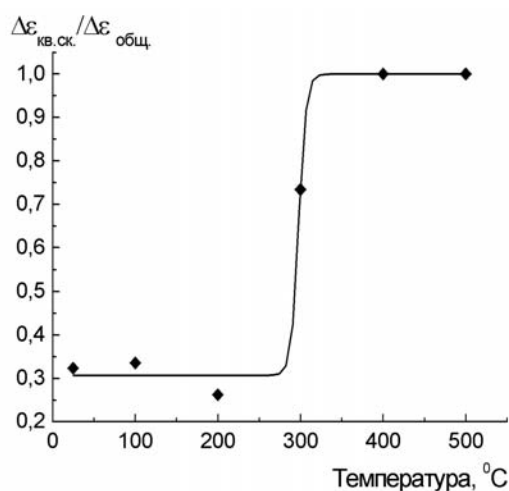


Рис. 3. Вклады монотонной и квазискачкообразной деформации в общую деформацию образца в зависимости от температуры изотермического цикла

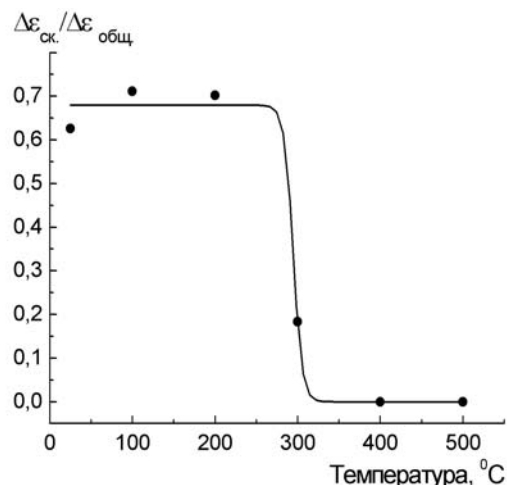


Рис. 4. Вклады монотонной и скачкообразной деформации в общую деформацию образца в зависимости от температуры изотермического цикла

в формирующейся системе деформационных полос. В то же время деформационные скачки свидетельствуют о высокой корреляции и локализации деформационных полос в макроскопическом масштабе.

**Заключение.** Особенности деформационного поведения алюминиево-магниевого сплава при изотермическом деформировании, проявляющиеся в макро-

скопически скачкообразном и квазискачкообразном накоплении деформации, обусловлены существенным повышением корреляции элементарных деформационных актов в макроскопическом масштабе.

В высокотемпературной области быстрое накопление деформации соответствует формированию глобального макроскачка.

### Библиографический список

1. Плотников В.А., Макаров С.В. Деформационные эффекты и акустическая эмиссия при высокотемпературной деформации алюминия // Письма в ЖТФ. — 2008. — Т. 34, № 6.
2. Плотников В.А., Макаров С.В., Потекаев А.И. Высокотемпературная пластическая деформация и акустическая эмиссия алюминия в слабоустойчивом состоянии // Известия вузов. Физика. — 2013. — Т. 56, № 6.
3. Макаров С.В., Плотников В.А., Колубаев Е.А. Закономерности акустической эмиссии в условиях пластической деформации алюминиево-магниевого сплава при неизотермическом нагружении // Известия Алт. гос. ун-та. — 2014. — № 1/1. DOI:10.14258/izvasu(2014)1.1-56
4. Макаров С.В., Плотников В.А., Колубаев Е.А. Скачкообразная деформация и импульсная акустическая эмиссия при нагружении алюминиево-магневых сплавов // Известия Алт. гос. ун-та. — 2014. — № 1/2. DOI:10.14258/izvasu(2014)1.2-36
5. Криштал М.М. Особенности образования полос деформации при прерывистой текучести // Физика металлов и металловедение. — 1993. — Т. 75, № 5.
6. Криштал М.М., Мерсон Д.Л. Взаимосвязь макролокализации деформации, прерывистой текучести и особенностей акустической эмиссии при деформировании алюминиево-магневых сплавов // ФММ. — 1996. — Т. 81, № 1.
7. Криштал М.М., Мерсон Д.Л. Влияние геометрических параметров образца на механические свойства и акустическую эмиссию при прерывистой текучести в Al-Mg сплавах // ФММ. — 1991. — № 10.