

05

Особенности механического поведения алюминиевого сплава 01570С с бимодальной структурой в условиях динамического нагружения

© Т.Г. Карнавская, Е.В. Автокротова, А.М. Брагов, М.В. Маркушев,
О.Ш. Ситдиков, В.Н. Перевезенцев, М.Ю Щербань

Нижегородский филиал Института машиноведения
им. А.А. Благонравова РАН

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа
E-mail: pevnp@uic.nnov.ru, karnavskayat@gmail.com, mvmark@imsp.ru

Поступило в Редакцию 26 января 2012 г.

Изучены особенности высокоскоростной деформации алюминиевого сплава 01570С с бимодальной структурой, полученной методом равноканального углового прессования. Показано, что при определенных параметрах структуры и температурно-скоростных режимах динамического нагружения сплав может демонстрировать высокий коэффициент скоростной чувствительности $m \sim 0.4$, характерный для структурной сверхпластичности при квазистатическом нагружении. Предложено объяснение такого эффекта с позиций теории неравновесных границ зерен.

Как показано в ряде работ [1–3], одним из перспективных подходов к достижению высокой прочности без существенного снижения ресурса пластичности конструкционных и функциональных материалов является придание им бимодальной структуры, состоящей из ультрамелких зерен, окружающих более крупные зерна. Однако к настоящему времени анализ механического поведения таких материалов проведен лишь в достаточно узком интервале скоростей деформации и температур и преимущественно в условиях квазистатического растяжения. Следует отметить, что систематические исследования особенностей высокоскоростной деформации ультрамелкозернистых (УМЗ) материалов, полученных с использованием интенсивной пластической деформации (ИПД), в целом также находятся на начальной стадии [4–6].

В данной работе проведено исследование особенностей пластического течения при динамическом нагружении алюминиевого сплава с бимодальной структурой, полученной ИПД.

В качестве материала исследования был выбран алюминиевый сплав 01570С (Al–5.0Mg–0.18Mn–0.2Sc–0.8Zr (wt.%)). Исследовали три состояния сплава:

1) в состоянии поставки (гомогенизированный слиток с равноосными зернами размером $\sim 24 \mu\text{m}$);

2) после ИПД слитка, реализованной равноканальным угловым прессованием (РКУП) при температуре 325°C с эффективной сдвиговой деформацией $e \sim 3$, придавшей сплаву бимодальную структуру, состоящую преимущественно из крупных вытянутых зерен размером $\sim 40 \times 14 \mu\text{m}$, разделенных прослойками мелких зерен размером $\sim 2 \mu\text{m}$ (соотношение удельных долей крупных и мелких зерен $\sim 0.8/0.2$);

3) после РКУП с $e \sim 8$, проведенного при той же температуре и сформировавшего бимодальную структуру, состоящую из крупных до $\sim 20 \mu\text{m}$ зерен практически равноосной формы, вкрапленных в УМЗ-матрицу с размером зерен $\sim 1 \mu\text{m}$ (соотношение долей крупных и ультрамелких зерен $\sim 0.3/0.7$).

Динамические испытания на сжатие образцов с размерами $4.8 \times 2.6 \text{ mm}$ проводились при температурах 20 и 300°C на установке РГС-20, реализующей традиционный метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона диаметром 20 mm. Скорость ударника определялась давлением воздуха в баллоне, и при его изменении от 0.5 до 6 atm соответствовала диапазону от 5 до 50 m/s, обеспечивая скорость деформации образцов в интервале от 10^3 до $4 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$. Механические характеристики (напряжение (σ), степень (ε) и скорость деформации ($\dot{\varepsilon}$)) определяли на основе анализа отраженного и прошедшего импульсов с учетом конечной величины деформации образца [7]. В качестве примера на рис. 1 приведены зависимости напряжения — деформация ($\sigma - \varepsilon$) для сплава 01570С в состоянии 2.

Для исследованных состояний материала наиболее интересными являются зависимости напряжения пластического течения от скорости деформации. Как и ожидалось, коэффициент скоростной чувствительности напряжения пластического течения $m = \Delta \ln \sigma / \Delta \ln \dot{\varepsilon}$ литого крупнозернистого сплава (состояние 1) как при комнатной, так и повышенной температурах слабо зависит от скорости деформации (рис. 2, а), а

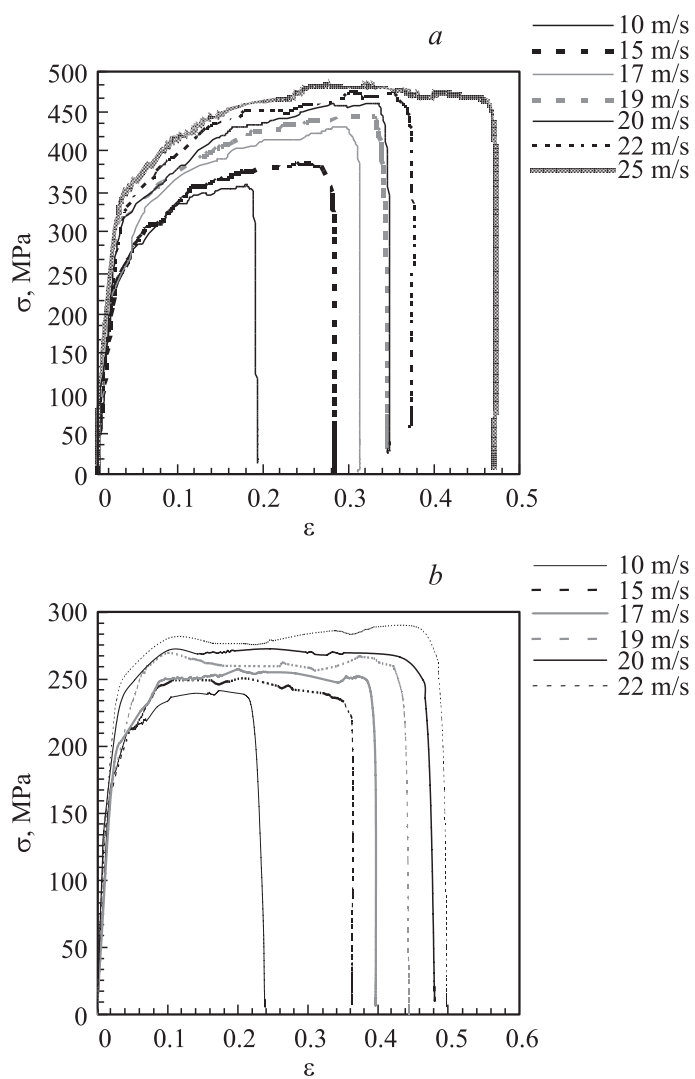


Рис. 1. Зависимости напряжения течения от степени деформации для сплава 01570С с бимодальной структурой в состоянии 2 (РКУП до $e \sim 3$): *a* — 20 и *b* — 300°С.

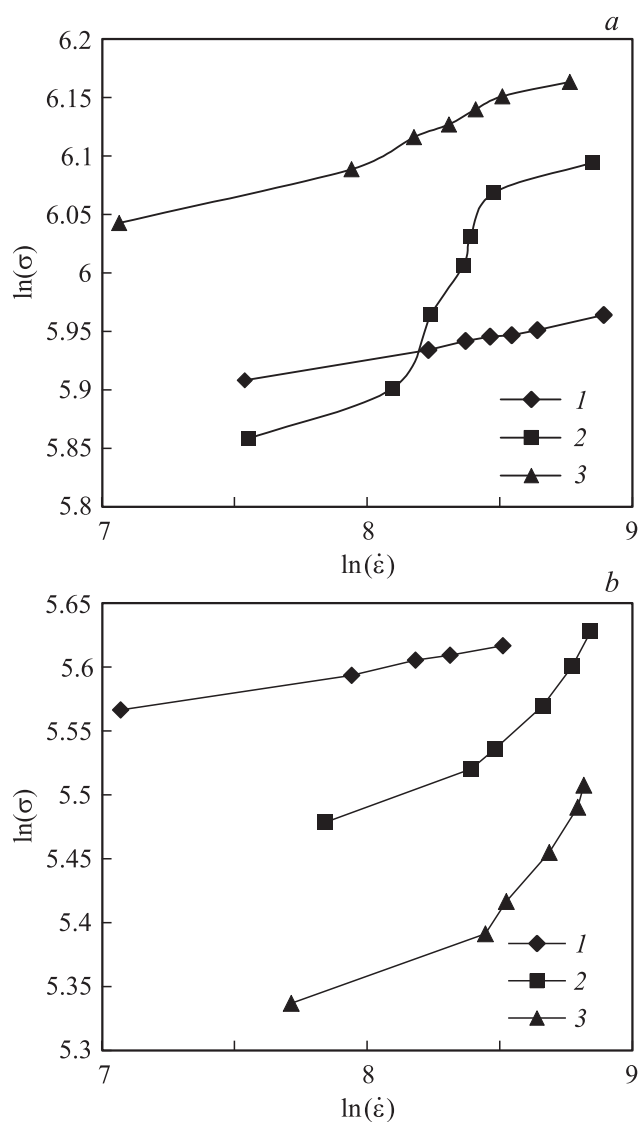


Рис. 2. Зависимости напряжения течения от скорости деформации сплава 01570С в состояниях 1 (литое), 2 (РКУП до $e \sim 3$) и 3 (РКУП до $e \sim 8$): a — 20 и b — 300°C.

его средняя величина близка к 0.03. В то же время зависимость напряжения течения от скорости деформации ($\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$) сплава после ИПД (состояния 2 и 3) с бимодальной структурой заметно отличается и может иметь немонотонный характер в достаточно широком интервале скоростей деформации, демонстрируя высокие значения коэффициента m . Так, при температуре испытаний 300°C сплав после РКУП в обоих структурных состояниях демонстрируют четко выраженную двухстадийную зависимость $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$ со средним коэффициентом m на второй стадии ~ 0.4 (рис. 2, *b*). Весьма интересным оказалось также обнаружение трехстадийной зависимости $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$ для состояния 2 сплава, испытанного при комнатной температуре (рис. 2, *a*). Полученный сигмоидальный вид зависимости типичен для материалов, проявляющих эффект структурной сверхпластичности. Кроме того, вторая стадия этой кривой характеризуется коэффициентом $m = 0.4$, как и в случае испытаний при 300°C. Отметим, что значения $m \sim 0.4$ являются характерными и для второй стадии кривой сверхпластичности УМЗ алюминиевых сплавов в условиях квазистатического растяжения, при которой основной вклад в деформацию образцов вносит зернограничное проскальзывание (ЗПП) [8,9]. Таким образом, логично предположить, что и в случае динамического нагружения сплава с бимодальной структурой локализации пластического течения по границам зерен (ГЗ) должна обеспечивать существенный вклад в общую деформацию. В пользу такого предположения свидетельствует и вид деформационного рельефа, возникающего на предварительно полированной боковой поверхности образца (рис. 3, *b*). А именно, на рис. 3 (*b*) мы отчетливо видим характерный рельеф, сформированный путем кооперативного ЗПП, осуществляющегося в мелкозернистых прослойках, разделяющих крупные зерна.

Рассмотрим возможные причины наблюдавшихся особенностей механического поведения сплава с бимодальной структурой. Вероятно, что в процессе динамического нагружения первоначально деформируются крупные зерна, при этом формируются интенсивные потоки решеточных дислокаций, которые, попадая на ГЗ в мелкозернистой структуре, переводят их в сильно неравновесное состояние. Как показано в ряде экспериментальных и теоретических работ [10–13], энергия активации зернограничной диффузии не является константой материала, а существенно зависит от состояния ГЗ и скорости деформации. Под действием потоков дислокаций происходит увеличение избыточного

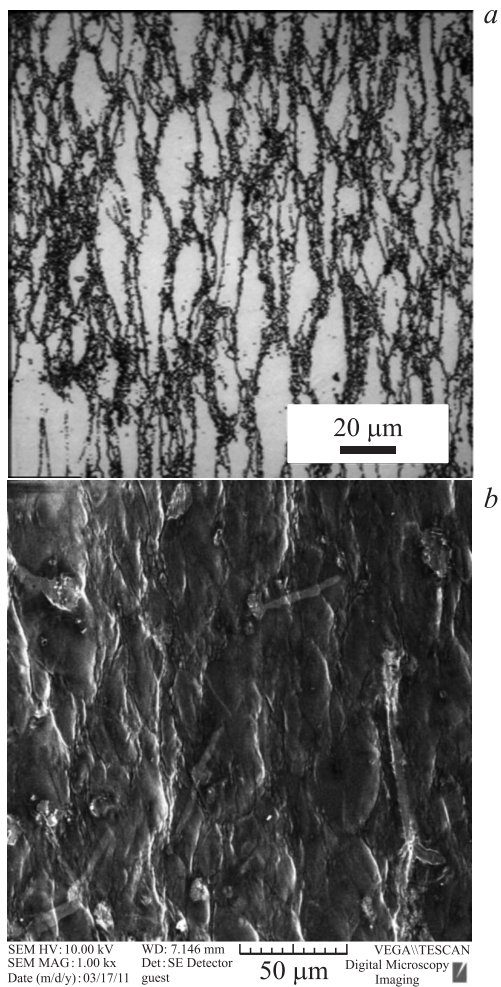


Рис. 3. Микрофотографии сплава 01570С в состоянии 2 (РКУП до $e \sim 3$): *a* — микроструктура до испытаний (оптическая микроскопия) и *b* — деформационный рельеф после динамического сжатия ($T = 300^\circ\text{C}$, $\dot{\epsilon} = 15 \text{ m/s}$) (растровая электронная микроскопия).

неравновесного объема ГЗ, и, как следствие, диффузионные процессы в таких границах существенно активизируются, что приводит к ускорению ЗГП.

Обнаруженная разница в значениях коэффициента m для состояний 2 и 3 сплава при комнатной температуре испытаний, по-видимому, вызвана тем обстоятельством, что в случае малой доли крупных зерен ~ 0.3 (состояние 3) их пластическая деформация и осуществляющие ее потоки решеточных дислокаций могут перевести в неравновесное состояние границы ультрамелких зерен лишь вдоль узкой области, прилегающей к периметру крупных зерен. Вследствие этого активизация деформационно-стимулированного ЗГП не может приводить в данных условиях к возникновению пластических сдвигов в масштабе, значительно большем, чем размер крупных зерен и, следовательно, доля материала, деформируемого за счет ЗГП, оказывается невелика. Основной вклад в деформацию образца дает внутризеренная деформация. В сплаве с малой долей мелких зерен (состояние 2) потоки решеточных дислокаций из объема крупных зерен активизируют подавляющее число ГЗ и обеспечивают возможность развитого ЗГП в мелкозернистой составляющей структуры сплава. Повышение температуры испытаний до 300°C приводит к ускорению зернограницной диффузии и дополнительно стимулирует развитие ЗГП в УМЗ-матрице. Поэтому не удивительно, что поведение сплава в состояниях 2 и 3, несмотря на различное соотношение мелких и крупных зерен, оказывается схожим. Отметим также, что в процессе динамического нагружения происходит дополнительный саморазогрев материала (в наших условиях примерно на 150°C), способствующий ускорению диффузии по ГЗ.

Список литературы

- [1] *Ma E.* // JOM. April, 2006. P. 49–53.
- [2] *Wang Y., Chen M., Zhou F., Ma E.* // Nature. 2002. V. 419. P. 912–915.
- [3] *Wang J.T.* // Int. Symposium. Bulk Nanostructured Materials. Ufa, Russia, 2007. P. 29.
- [4] *Kapoor R., Singh J.B., Chakravatty J.K.* // Mater. Sci. Eng. A. 2008. V. 496. P. 308–315.
- [5] *Перевезенцев В.Н., Щербань М.Ю., Брагов А.М., Карнавская Т.Г.* // Перспективные материалы. 2011. № 12. С. 196–200.

- [6] *Перевезенцев В.Н., Щербань М.Ю., Брагов А.М., Карнавская Т.Г.* // Вестник ННГУ. 2010. Ч. 2. № 5. С. 70–73.
- [7] *Брагов А.М., Родионов С.Н., Русин Е.Е.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 21. С. 10–14.
- [8] *Перевезенцев В.Н., Щербань М.Ю., Мурашкин М.Ю., Валиев Р.З.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. С. 40–46.
- [9] *Islamgaliev R.K., Yunusova N.F., Valiev R.Z., Perevezentsev V.N., Tsenev N.K., Langdon T.G.* // Scripta Mater. 2003. V. 49. P. 467–472.
- [10] *Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов / Колобов Ю.Р., Валиев Р.З., Грабовская Г.П. и др.* Новосибирск: Наука, 2001. 232 с.
- [11] *Валиев Р.З., Александров И.В.* Объемные наноструктурные металлические материалы. М.: Академкнига, 2007. 398 с.
- [12] *Перевезенцев В.Н.* // ФММ. 2002. Т. 93. № 3. С. 15–19.
- [13] *Перевезенцев В.Н., Путьнин А.С., Свирина Ю.В.* // ФММ. 2005. Т. 100. № 1. С. 17–23.