

Для того, чтобы показать разницу между эффективностью ресурсоемкого и наукоемкого производства, сравним автомобильную, ракетную и современную нано- и микроэлектронную промышленности. Каждый 1 кг современной легковой автомашины среднего класса средней наукоемкости стоит 10–20 долларов. А не самая дорогая средней дальности современная сверхзвуковая крылатая ракета массой 3,0 тонны стоит около 20 млн. долларов, т.е. в каждый ее килограмм «вложено» около 6,6 тысяч долларов.

Известная корпорация «Интел» (107 тысяч сотрудников) в прошлом году произвела продукции на 53 млрд. долларов, т.е. по 495 тыс. долларов на 1 человека, а «Самсунг» (427 тысяч работников) заработал 327 млрд. долларов, т.е. каждый ее сотрудник «произвел» микросхем на 765 тысяч долларов.

В целом, для обеспечения устойчивого роста ВВП и хотя бы сохранения своего положения среди стран с удовлетворительным уровнем жизни в Беларуси необходимы очень активные меры по диверсификации своего экономического базиса путем повышения качественного уровня трудовых ресурсов, и прежде всего, его интеллектуальной составляющей, определяемой уровнем образования, культуры и моральных качеств.

### Список литературы

1. Свириденко А.И. Проблемы и задачи оптимизации ресурсопотребления и ресурсосбережения на современном этапе. Сб. трудов 10-й научно-технической конференции «Энерго- и материалоэкономические экологически чистые технологии», - 2014, с. 3-10.
2. Шимов В.Н. Некоторые аспекты актуализации критериев и показателей экономической безопасности Республики Беларусь / В.Н.Шимов, П.М.Крюков, А.В.Бондарь // Белорусский экономический журнал, 2015, 31, с. 4-14.
3. Innovation Union Competitiveness Report, - 2013, 7210 p.p.

## СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА И ВЛИЯНИЕ НА НЕЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Клубович В.В.<sup>1</sup>, Кулак М.М.<sup>1</sup>, Лю <sup>2</sup> Г., Мышляев М.М.<sup>3,4</sup>, Шпейзман В.В.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> *Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси, Витебск, Беларусь*

<sup>2</sup> *Пекинский институт авиационных материалов, Пекин, Китай*

<sup>3</sup> *Институт металлургии им. А.А.Байкова Российской академии наук, Москва, Россия*

<sup>4</sup> *Институт физики твердого тела Российской академии наук, Черноголовка, Россия*

<sup>5</sup> *Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия*  
[shpeizm.v@mail.ioffe.ru](mailto:shpeizm.v@mail.ioffe.ru)

Известно, что воздействие на материал высокоэнергетического потока колебаний ультразвукового диапазона частот приводит к существенному изменению его механических характеристик [1]. Анализ экспериментальных данных показывает, что наблюдаемое уменьшение сопротивления деформированию при наложении ультразвуковых колебаний есть результат нелинейного поведения дислокаций и точечных дефектов под действием акустических и статических напряжений [2–3]. Формирующаяся при совместном воздействии растягивающей нагрузки и ультразвуковых колебаний структура позволяет реализовать большую величину равномерной деформации.

Несмотря на относительно длительное изучение и успешное применение ультразвука при обработке материалов, механизмы, вызывающие перестройку структуры и изменение макроскопических свойств, до конца не выяснены. В частности, неизвестно действие

ультразвука на деформацию в условиях сверхпластичности. В [4–6] было показано, что алюминий-литиевый сплав 1420 в области температур  $T = 320\text{--}395^\circ\text{C}$  при растяжении с постоянной скоростью и относительной деформации в интервале  $10^{-2} - 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  обладает сверхпластичностью. Кривую деформации, построенную в истинных координатах, можно разделить на протяженные стадии упрочнения и разупрочнения. Было высказано предположение, что деформация на стадии разупрочнения контролируется межзеренным скольжением, а на стадии упрочнения – самодиффузией в объеме зерен. В настоящей работе проведено исследование деформации в условиях сверхпластичности при одновременном действии растягивающей нагрузки и осевых ультразвуковых колебаний. Опыты выполнены на алюминий-литиевом сплаве 1420 (Al–5.5%Mg–2.2%Li–0.12%Zr). Заготовки для РКУ прессования были вырезаны из горячекатанной плиты с рекристаллизованной структурой с зернами размером около  $20 \mu\text{m}$ . Заготовки были закалены с  $470^\circ\text{C}$  в воду и затем подвергнуты многократному равноканальному угловому прессованию (РКУ-прессованию) на воздухе при  $370^\circ\text{C}$ . В результате были получены прутки диаметром 20 и длиной 70–80 mm.

Структурное состояние можно охарактеризовать зернами со средним размером порядка  $3 \mu\text{m}$  (изредка встречались более крупные зерна – до  $10 - 15 \mu\text{m}$ ) и развитой субструктурой: субзернами, дислокационными ячейками и сплетениями, отдельными дислокациями, а также выделениями фазы  $\text{Al}_2\text{LiMg}$  и частицами фазы  $\delta'$  ( $\text{Al}_3\text{Li}$ ). Из РКУ-прессованных прутков изготавливали плоские образцы в виде двойной лопатки для механических испытаний.

Образцы имели толщину  $0.85 \text{ mm}$  и длину рабочей части  $5 \text{ mm}$ . Деформирование образцов осуществляли на испытательной машине Instron в условиях одноосного растяжения с постоянной скоростью вдоль их оси при заданной температуре. Ошибка измерений прикладываемой к образцу нагрузки и удлинения образца были не хуже  $0.25\%$  и  $1\%$ , соответственно. В ходе испытания температура поддерживалась постоянной с погрешностью  $\pm 2.5^\circ\text{C}$ .

Исходя из планируемых исследований, была изготовлена замкнутая ультразвуковая волноводная система для проведения пластического деформирования в условиях одноосного растяжения материалов в режиме сверхпластичности. Для создания ультразвуковых колебаний использовали пьезокерамический преобразователь с собственной частотой  $20 \text{ kHz}$  (рис. 1). Амплитуда ультразвуковых колебаний составляла  $5 \mu\text{m}$ .

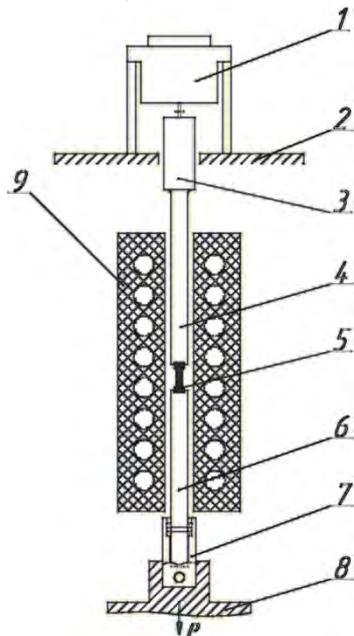
Основными характеристиками, использованными при анализе деформации, были истинное напряжение  $\sigma_t$ , истинная деформация  $\varepsilon_t$  и скорость истинной деформации  $\dot{\varepsilon}_t$ . Их определяли по формулам:

$$\sigma_t = P(l_0 + \Delta l) / S_0 l_0,$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \Delta l / l_0),$$

$$\dot{\varepsilon}_t = V / (l_0 + \Delta l).$$

Здесь  $P$  – нагрузка,  $S_0$  и  $l_0$  начальные площадь поперечного сечения и длина рабочей части образца,  $\Delta l$  – его удлинение,  $V$  – скорость растяжения образца (перемещения подвижного захвата испытательной машины).



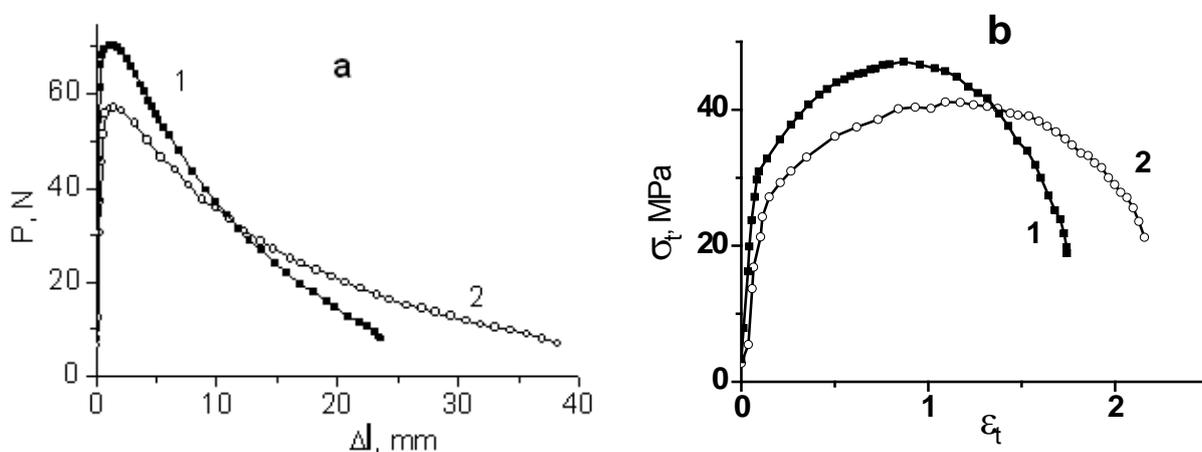
**Рис. 1.** Схема подведения ультразвуковых колебаний к образцу. Обозначения: 1 – датчик усилия, 2 – верхняя траверса испытательной машины, 3 – ультразвуковой преобразователь, 4 – верхний волновод, 5 – образец, 6 – нижний волновод-отражатель, 7 – нижний разгрузочный стакан, 8 – нижняя траверса, 9 – печь.

На рис. 2а приведена в качестве примера одна из диаграмм растяжения образца при включенных ультразвуковых колебаниях и без ультразвука, на которых можно заметить уменьшение максимальной нагрузки и более плавный ее спад при дальнейшей деформации для кривой с ультразвуковым воздействием. Построенная в координатах нагрузка – удлинение диаграмма растяжения имеет характерный для проявления сверхпластичности вид: короткая стадия упрочнения, отсутствие области с постоянными напряжениями и длинная стадия разупрочнения.

Вид диаграммы не изменится, если вместо нагрузки рассматривать напряжения  $\sigma = P/S_0$ , а вместо удлинения – деформацию  $\varepsilon = \Delta/l_0$ . Однако если перейти от  $\sigma$  и  $\varepsilon$  к истинным напряжениям и деформациям, то окажется, что стадия упрочнения занимает значительно большую часть диаграммы растяжения (рис. 2б). Действие ультразвука проявляется в уменьшении сопротивления деформированию и росту общей деформации, а также к увеличению на 10–30% области упрочнения, что приводит к смещению диаграммы растяжения в сторону больших деформаций.

Анализ активационных характеристик деформации проводился с использованием формулы  $\dot{\varepsilon}_t = A (\sigma_t/\sigma_0)^n T^{-1} \times \exp(-U/kT)$ , где  $\dot{\varepsilon}_t$  – скорость истинных деформации,  $\sigma_t$  – истинные напряжения,  $U$  – энергия активации  $k$  – постоянная Больцмана,  $A$ ,  $n$  – постоянные,  $\sigma_0$  – параметр, введенный из соображений размерности;  $\sigma_0 = 1$  МПа, если  $\sigma$  выражено в МПа. Для расчета параметра  $n$  было проведено 50 экспериментов со скачками скорости деформации при разных температурах и величине деформации, при растяжении с ультразвуком и без него. Результаты показали, что  $n$  слабо зависит от условий эксперимента и равно  $2.21 \pm 0.23$ . Последнее значение  $n$  было использовано нами при оценке энергии активации процесса сверхпластической деформации.

Для энергии активации на участке упрочнения было получено при растяжении без ультразвука ( $1.41 \pm 0.14$ ) eV и при растяжении с ультразвуком ( $1.23 \pm 0.10$ ) eV. Энергии активации процесса деформации на участке упрочнения близки к энергии самодиффузии в алюминии, что отмечалось в [4–6] для простого растяжения.



**Рис. 2.** Зависимости нагрузки на образце алюминиевого сплава от удлинения (а) и истинных напряжений от истинных деформаций (б) при растяжении (1) и то же с наложением ультразвуковых колебаний (2). Температура 370<sup>0</sup>С.

На участке разупрочнения энергия  $U$  отличается от энергии на участке упрочнения и при растяжении оказалась равной ( $0.96 \pm 0.15$ ) eV, а при растяжении с ультразвуком ( $1.02 \pm 0.13$ ) eV. Полученные значения энергии активации деформации при растяжении с ультразвуком и без него на этом участке близки между собой и к энергии самодиффузии по границам зерен, что отмечалось в [4–6] для растяжения этого сплава в условиях сверхпластичности. Следовательно, можно сделать вывод о том, что добавление ультразвуко-

вых колебаний не изменило механизма деформации, как на участке упрочнения, так и на участке разупрочнения. Отсюда следует, что ультразвуковые колебания изменяют характеристики движения дислокаций (возможно, скорость или плотность дислокаций), не затрагивая природу барьеров для их движения. Однако ультразвуковые колебания существенно уменьшают действующие напряжения и смещают область перехода от стадии упрочнения к стадии разупрочнения в сторону больших деформаций, увеличивая тем самым общую деформацию образца. Это означает, что ультразвуковые колебания облегчают внутризеренную деформацию, которую контролируют диффузионные процессы в материале, и позволяют достигнуть заметно больших деформаций на этой стадии, чем при простом растяжении.

### Список литературы

1. Клубович В. В., Степаненко А. В. Ультразвуковая обработка материалов. Мн.: Наука и техника, 1981. 295 с.
2. В.Е. Панин, Е.Н. Каблов, Ю.И. Почивалов, В.В. Колобнев. Физическая мезомеханика, 15, 6, 107-111 (2012).
3. В.В. Благовещенский, И.Г. Панин. ФТТ, 53, 10, 2005 (2011).
4. М.М. Мышляев, М.А. Прокунин, В.В. Шпейзман. ФТТ, 43, 5, 833 (2001).
5. М.М. Мышляев, В.В. Шпейзман, М.М. Камалов. ФТТ, 43, 11, 2015 (2001).
6. В.В. Шпейзман, М.М. Мышляев, М.М. Камалов, М.М. Мышляева. ФТТ, 45, 11, 2008 (2003).

## ДЕФЕКТНАЯ СТРУКТУРА И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ (РКУП)

**Бетехтин В.И.<sup>1</sup>, Sklenicka V.<sup>2</sup>, Нарыкова М.В.<sup>1</sup>, Кадомцев А.Г.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*ФГБУН Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия*  
[Vladimir.Betekhtin@mail.ioffe.ru](mailto:Vladimir.Betekhtin@mail.ioffe.ru)

<sup>2</sup>*Institute of Physics of Materials AS CR, Brno, Czech Republic*

Получение и исследование высокопрочных нано и микрокристаллических металлов и сплавов является одним из наиболее актуальных направлений современного материаловедения. Наноструктурные материалы получают, как правило, различными методами больших (интенсивных) пластических деформаций, особенно часто при РКУП. Однако, полученные при интенсивных воздействиях материалы являются по своей природе неравновесными, поэтому для практического использования важное значение приобретает оценка механической устойчивости (долговечности) таких материалов при длительном нагружении.

В данной работе рассмотрены результаты изучения степени деформации (числа проходов) при РКУП на дефектную структуру и долговечность при нагружении в режиме ползучести Al (99,96%), Cu (99,99%), Ti (BT1-0), Al+0.2%Sc, Cu+0.2%Zr, Cu+2%Co, Zr+2,5%Nb.

Оценка параметров неоднородностей электронной плотности (нанопор), образующихся при РКУП, проводилась методом малоуглового рентгеновского рассеяния, а объем нанопор - при прецизионном измерении плотности методом гидростатического взвешивания [1]. Размер зерен и их распределение по разориентации определялись с помощью электронной микроскопии и обратного электронного рассеяния.