

07

Изменение характеристик сверхпластической деформации алюминий-литиевого сплава под действием ультразвуковых колебаний

© М.М. Мышляев^{1,2}, В.В. Шпейзман³, В.В. Клубович⁴, М.М. Кулак⁴, Г. Лю⁵

¹ Институт металлургии им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия

² Институт физики твердого тела РАН,
Черноголовка, Россия

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

⁴ Институт технической акустики НАН Белоруссии,
Витебск, Белоруссия

⁵ Пекинский институт авиационных материалов,
Пекин, Китай

E-mail: shpeizm.v@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 13 апреля 2015 г.)

Исследовано растяжение образцов алюминий-литиевого сплава 1420 в температурной области сверхпластичности $T = 320\text{--}395^\circ\text{C}$ и влияние на характеристики деформации ультразвуковых колебаний. Показано, что действие ультразвука проявляется в уменьшении сопротивления деформированию и увеличении общей деформации. Построенные в координатах истинные напряжения — истинные деформации кривые растяжения имеют, в отличие от стандартных кривых напряжения—деформации, протяженную область упрочнения, величина которой больше для образцов, деформированных с ультразвуком. По скачкам напряжений при изменении скорости растяжения определены коэффициенты скоростной чувствительности напряжений m и показано, что во всей области температур сверхпластичности при различных деформациях с ультразвуком и без него m можно считать постоянным: $m = 0.46 \pm 0.04$ и соответственно показатель степени напряжений в формуле для скорости деформации $n = 2.21 \pm 0.23$. Оценены энергии активации процесса деформации и сделан вывод об облегчении под действием ультразвука перемещения дислокаций при внутризеренной деформации, характерной для стадии упрочнения.

1. Введение

Воздействие на материал высокоэнергетического потока колебаний ультразвукового диапазона частот приводит к существенному изменению его механических характеристик. Широко известны методы упрочнения материалов путем объемной или поверхностной обработки их ультразвуком [1]. Другой особенностью ультразвукового воздействия является пластификация материала при его деформировании, что позволяет значительно снизить требуемые усилия и энергозатраты на различных стадиях технологических процессов обработки материалов [2]. В исследованиях изменений пластических свойств металлов при ультразвуковом воздействии большое внимание уделялось рассмотрению механизма, объясняющего изменение пластических свойств материала при наложении ультразвука [3–6]. Анализ экспериментальных данных показал, что уменьшение сопротивления деформированию при наложении ультразвуковых колебаний есть результат нелинейного поведения дислокаций и точечных дефектов под действием акустических и статических напряжений. Было показано, что структурные изменения в моно- и поликристаллах под воздействием ультразвуковых колебаний

характеризуются возникающими зонами пластической деформации с высокой плотностью дислокаций и повышенной концентрацией точечных дефектов. 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 и являются спорными. В частности, неизвестно действие ультразвука на деформацию в условиях сверхпластичности. В [7–9] было показано, что алюминий-литиевый сплав 1420 в области температур $T = 320\text{--}395^\circ\text{C}$ при растяжении с постоянной скоростью относительной деформации в интервале $10^{-2}\text{--}10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 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 про-

ведено исследование деформации в условиях сверхпластичности при одновременном действии растягивающей нагрузки и осевых ультразвуковых колебаний.

2. Экспериментальная методика

Опыты выполнены на алюминий-литиевом сплаве 1420 (Al–5.5%Mg–2.2%Li–0.12%Zr). Заготовки для образцов были вырезаны из горячекатанной плиты с рекристаллизованной структурой с зернами размером около $20\ \mu\text{m}$. Заготовки, нагретые до $T = 470^\circ\text{C}$, были закалены в воде и затем подвергнуты многократному равноканальному угловому прессованию (РКУ-прессованию) [10,11] на воздухе при 370°C . В результате были получены прутки диаметром 20 и длиной 70–80 мм. Закалка и РКУ-прессование были проведены в Уфимском государственном авиационном институте (УГАТУ). Структурное состояние можно охарактеризовать зернами со средним размером порядка $3\ \mu\text{m}$ (изредка встречались более крупные зерна — до 10–15 μm) и развитой субструктурой: субзернами, дислокационными ячейками и сплетениями, отдельными дислокациями, а также выделениями фазы Al_2LiMg и частицами фазы δ' (Al_3Li).

Из РКУ-прессованных прутков изготавливали плоские образцы в виде двойной лопатки для механических испытаний. Образцы имели толщину 0.85 мм и длину рабочей части 5 мм. Фронтальные и боковые поверхности образцов были тщательно отполированы. Слои материала с привнесенными при изготовлении образцов изменениями в структуре были удалены. Различия как по толщине, так и по ширине вдоль оси рабочей части образцов не превышали 0.01 мм. Ось симметрии образца, расположенная вдоль его длинной стороны, была задана параллельно оси прутков.

Деформирование образцов осуществляли на испытательной машине Instron в условиях одноосного растяжения с постоянной скоростью вдоль их оси при заданной температуре. Ошибка измерений прилагаемой к образцу нагрузки и удлинения образца были не хуже 0.25 и 1% соответственно. В ходе испытания температура поддерживалась постоянной с погрешностью 2.5°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 кГц. Акустическая система состояла из собственно преобразователя, бустера (усилителя) и двух волноводов, к которым крепили образец. Вся система была рассчитана для работы в замкнутом режиме. Акустическую систему с закрепленным образцом помещали в печь, где поддерживали постоянную в течение опыта

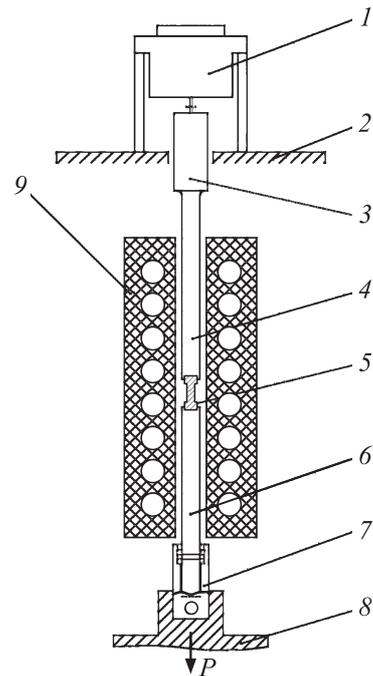


Рис. 1. Схема подведения ультразвуковых колебаний к образцу. 1 — датчик усилия, 2 — верхняя траверса испытательной машины, 3 — ультразвуковой преобразователь, 4 — верхний волновод, 5 — образец, 6 — нижний волновод-отражатель, 7 — нижний разгрузочный стакан, 8 — нижняя траверса, 9 — печь.

температуру в диапазоне $320\text{--}395^\circ\text{C}$. После выравнивания температуры в печи и волноводах подвели ультразвуковые колебания к образцу, включили испытательную машину и осуществляли растяжение образца. Схема волноводной системы показана на рис. 1. Так как вес нижней тяги не был компенсирован, то это привело к тому, что начальная точка была смещена на вес тяги, равный 8 Н, и ресурс пластичности испытываемых образцов не был выбран до предела. Поэтому диаграммы растяжения и участок разупрочнения были короче, чем приведенные в [7]. Амплитуда ультразвуковых колебаний составляла 5 μm .

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

$$\sigma_t = P(l_0 + \Delta l) / S_0 l_0, \quad (1)$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \Delta l / l_0), \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_t = V / (l_0 + \Delta l). \quad (3)$$

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

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 2, *a* приведена в качестве примера диаграмма 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 $\varepsilon = \Delta l/l_0$. Однако если перейти от σ и ε к истинным напряжениям и деформациям, рассчитанным по формулам (1) и (2), то окажется, что стадия упрочнения занимает значительно большую часть диаграммы растяжения (рис. 2, *b*).¹ 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.

На рис. 3 показаны кривые деформации в истинных координатах, полученные при растяжении с наложением ультразвуковых колебаний со скачкообразными изменениями скорости перемещения захвата испытательной машины. Различие между кривыми 1 и 2 заключается в направлении изменения скорости в первом скачке. Как видно из рис. 3, если провести огибающие по участкам кривых, соответствующим одинаковым скоростям деформации, то для обоих образцов они практически совпадают и для скорости $V = 5 \text{ mm/min}$ близки к приведенным на рис. 2, *b*. Это говорит о том, что структура образцов в процессе испытания в области сверхпластичности определяется величиной деформации и не зависит от пути ее достижения. Из рис. 3 также следует, что переход от участка упрочнения на кривой деформации к участку разупрочнения зависит от скорости деформации: при большей скорости переход начинается раньше по деформации. Так, например, при 370°C упрочнение при $V = 10 \text{ mm/min}$ заканчивается при $\varepsilon \sim 1.3$, а при $V = 5 \text{ mm/min}$ — при $\varepsilon \sim 2.0$. Для образцов, испытанных при 395°C , деформация перехода составляет 1.2 и 1.8 соответственно. Сравнение рис. 2, *b* и 3 показывает, что скачкообразное „раскачивание“ структуры также увеличивает стадию упрочнения и, как следствие этого, приводит к небольшому увеличению максимальных напряжений.

Рис. 4 демонстрирует влияние ультразвука на кривые деформации со скачком ее скорости. Как и аналогичные плавные кривые с постоянной скоростью удлинения (рис. 2, *b*), скачкообразные кривые располагаются ниже

¹ Следует иметь в виду, что поскольку полная пластичность образцов не выбрана (см. раздел 2), то стадия разупрочнения на рис. 2, *b* представляется несколько меньше ее истинной величины.

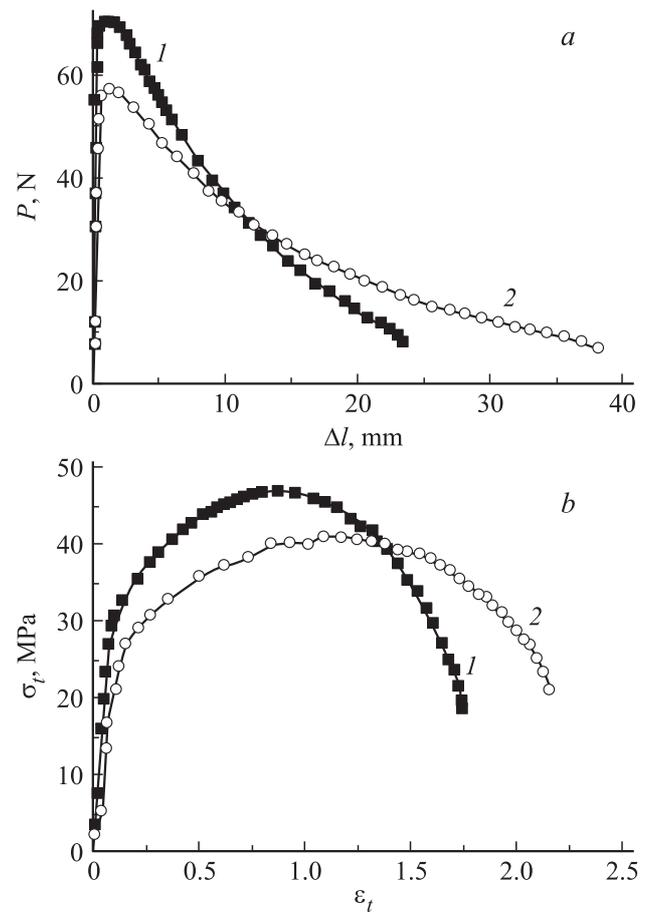


Рис. 2. Зависимости нагрузки на образце алюминиевого сплава от удлинения (*a*) и истинных напряжений от истинных деформаций (*b*) при растяжении (1) и то же с наложением ультразвуковых колебаний (2). Температура 370°C . Скорость перемещения захвата испытательной машины 5 mm/min .

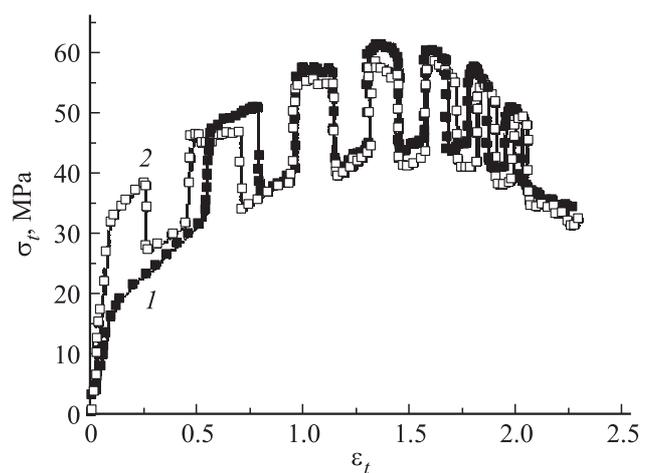


Рис. 3. Зависимость истинных напряжений от истинных деформаций при растяжении с наложением ультразвуковых колебаний со скачкообразными изменениями скорости перемещения захвата испытательной машины от 5 до 10 mm/min и обратно с первым скачком в сторону увеличения скорости (1) и уменьшения (2) для алюминиевого сплава. Температура 370°C .

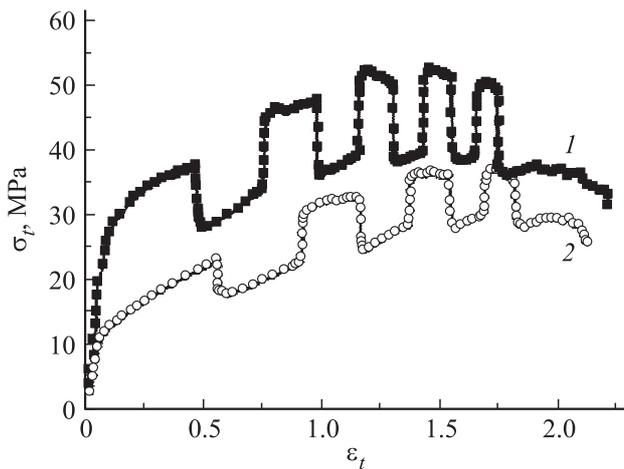


Рис. 4. Зависимость истинных напряжений от истинных деформаций при растяжении со скачкообразными изменениями скорости перемещения захвата испытательной машины от 5 до 10 мм/мин и обратно (1) и то же с наложением ультразвуковых колебаний (2) для алюминиевого сплава. Температура 395°C.

для растяжения с ультразвуком. Смещение области перехода от упрочнения к разупрочнению на рис. 4 можно проследить по форме коротких отрезков кривых между скачками скорости захвата испытательной машины. Так, на кривой для растяжения без ультразвука (1) отсутствие упрочнения можно заметить после $\varepsilon_t \sim 1.2$ для большой скорости растяжения и $\varepsilon_t \sim 1.7$ для малой скорости, а для кривой с ультразвуком (2) — после 1.5 и 2.0 соответственно. Точное определение значений деформации перехода по кривым со скачками скорости может осложняться релаксационными процессами сразу после скачка, что особенно заметно при больших деформациях и скачках в сторону уменьшения скорости.

Анализ многочисленных экспериментальных данных показывает, что связь скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ с напряжением σ и абсолютной температурой T выражается соотношением

$$\dot{\varepsilon} = A(\sigma/\sigma_0)^n T^{-1} \exp(-U/kT), \quad (4)$$

где $n \approx 2$, U — энергия активации, k — постоянная Больцмана, A — постоянная, σ_0 — параметр, введенный из соображений размерности; $\sigma_0 = 1$ МПа, если σ выражено в МПа. В [7–9] показано, что формула (4) соблюдается и в случае сверхпластической деформации для истинных напряжений σ_t и скорости истинных деформации $\dot{\varepsilon}_t$. Используя (4), можно из опытов со скачками скорости деформации получить величину n и обратную ей величину — параметр скоростной чувствительности напряжений m в разных точках кривой деформации:

$$n = m^{-1} = [\ln(\sigma_{t2}/\sigma_{t1}) / \ln(V_2/V_1)]^{-1}. \quad (5)$$

Здесь индексы 1 и 2 означают начало и конец скачка, а $\dot{\varepsilon}_{t2}/\dot{\varepsilon}_{t1} = V_2/V_1$, что для условий нашего эксперимента равно 2 или 0.5.

Всего было проведено 50 измерений параметра n при разных деформациях, температурах, при растяжении с ультразвуком и без него. Результаты показали, что n слабо зависит от условий эксперимента. Так, для растяжения с ультразвуком среднее значение m и n и их среднеквадратичные отклонения составляли $m = 0.46 \pm 0.05$ и $n = 2.20 \pm 0.25$, то же для растяжения без ультразвука — $m = 0.45 \pm 0.02$ и $n = 2.24 \pm 0.12$, а среднее по всем испытаниям — $m = 0.46 \pm 0.04$ и $n = 2.21 \pm 0.23$. Последнее значение n было использовано нами при оценке энергии активации процесса сверхпластической деформации.

Для расчета энергии активации на участке разупрочнения были выбраны точки касания кривых $\dot{\varepsilon}_t T(\sigma)$ и прямых (в двойных логарифмических координатах) $F\sigma^n(\sigma)$, где F — постоянная, а $n = 2.21$ (рис. 5, а, б). Из формулы (4) следует, что поскольку в точках касания $\dot{\varepsilon} T = (\sigma/\sigma_0)^n$, то $F = A \exp(-U/kT)$. Построив зависимости $F(1/T)$ в полулогарифмических координатах, можно по полученным прямым определить энергию активации процесса деформации U и предэкспоненту A

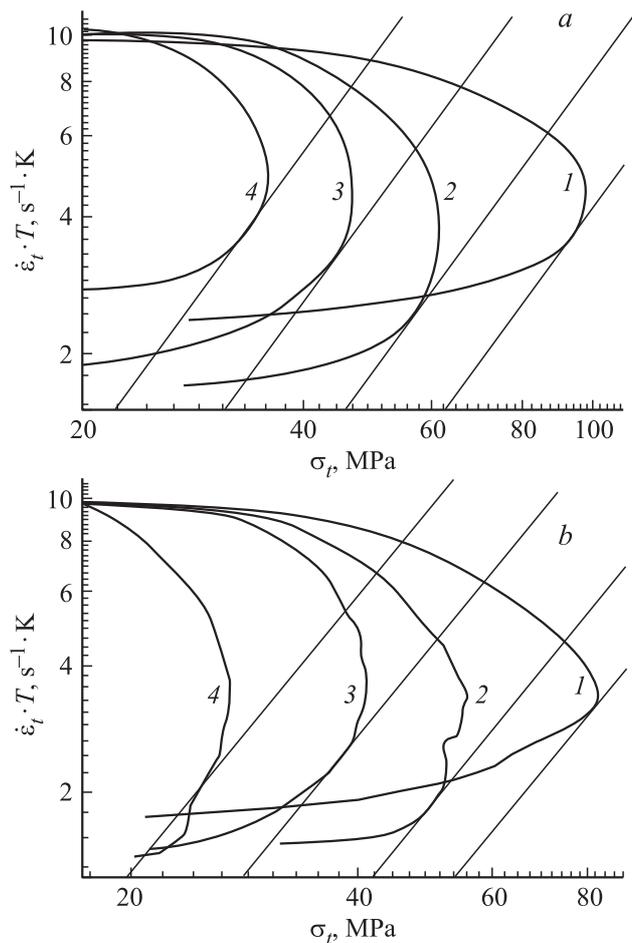


Рис. 5. Зависимости величины $\dot{\varepsilon}_t T$ от истинных напряжений σ_t и касательные к ним с $n = 2.21$ для растяжения (а) и растяжения с ультразвуком (б). Температура, °С: 320 (1), 355 (2), 370 (3) и 395 (4).

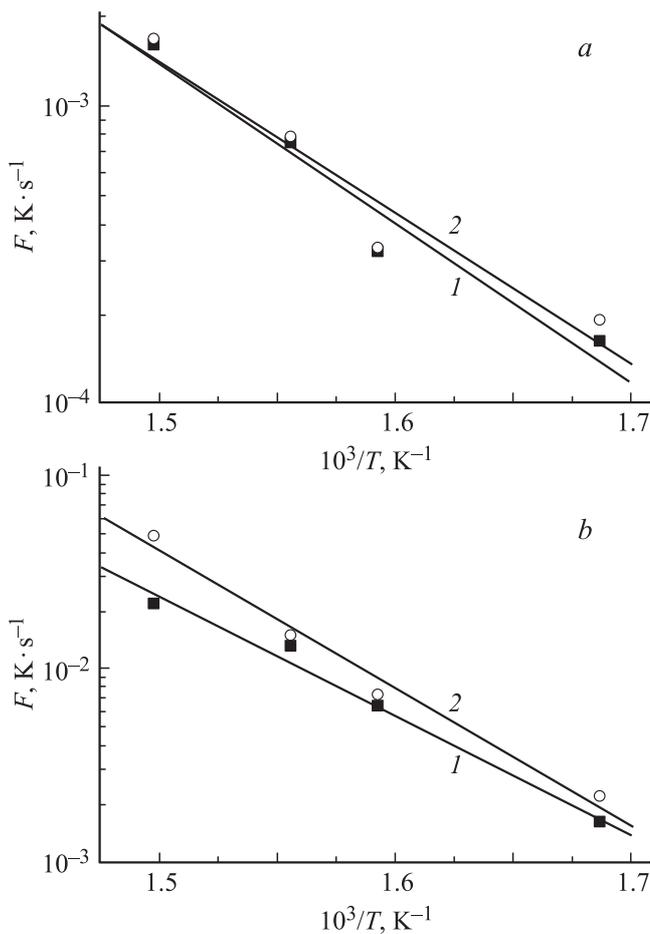


Рис. 6. Зависимость величины $F = A \exp(-U/kT)$ от обратной температуры в области разупрочнения (*a*) и упрочнения (*b*) для растяжения (1) и растяжения с ультразвуком (2).

(рис. 6, *a*). Построенные по методу наименьших квадратов прямые дают близкие значения $\ln A$ и U/k для деформации с ультразвуковыми колебаниями (11.0 ± 3.6 и 11.7 ± 2.3) и без них (11.9 ± 3.0 и 12.3 ± 1.9), что дает для энергии U при растяжении (0.96 ± 0.15) eV и при растяжении с ультразвуком (1.02 ± 0.13) eV, а для коэффициента A соответственно $10^{5.3 \pm 0.1}$ и $10^{5.1 \pm 0.1} \text{ Ks}^{-1}$. Полученные значения энергии активации близки между собой, а также к приведенным в [7] и к энергии самодиффузии по границам зерен [12,13]. Следовательно, можно сделать вывод о том, что добавление ультразвуковых колебаний не изменило механизма деформации на участке разупрочнения.

Для оценки энергии активации на участке упрочнения был использован аналогичный метод, но характеристики деформации ($\dot{\epsilon}_t, \sigma$) при каждой температуре соответствовали половине напряжений, использованных в приведенной выше оценке для участка разупрочнения. Зависимости $F(1/T)$ для растяжения с ультразвуком и без него приведены на рис. 6, *b*. Расчет $\ln A$ и U/k для деформации с ультразвуковыми колебаниями (21.1 ± 2.5 и 16.2 ± 1.6) и без них (17.6 ± 1.9 и 14.2 ± 1.2), что да-

ет для энергии U при растяжении (1.41 ± 0.14) eV и при растяжении с ультразвуком (1.23 ± 0.10) eV, а для коэффициента A соответственно $10^{9.3 \pm 1.1}$ и $10^{7.7 \pm 0.8} \text{ Ks}^{-1}$. Энергия активации процесса деформации на участке упрочнения отличается от энергии на участке разупрочнения и приближается к энергии самодиффузии в алюминии [12], что отмечалось в [7] для растяжения без ультразвука.

Для области упрочнения можно заметить некоторое изменение коэффициентов U и A при воздействии ультразвука. Несмотря на то что это различие находится в пределах точности приведенных выше оценок U и A , оно оказывает влияние на скорость деформации, если сравнение проводить при одинаковых напряжениях. Вычисления скорости деформации, проведенные по формуле (4), показывают, что различие в коэффициенте A может полностью компенсировать наблюдаемую разницу в кривых деформации при растяжении с ультразвуком и без него. Отсюда следует, что ультразвуковые колебания изменяют характеристики движения дислокаций (возможно, скорость или плотность дислокаций), не затрагивая природу барьеров для их движения.

Область разупрочнения наступает при очень больших деформациях, влияние ультразвука в ней значительно слабее, что следует из близости параметров A и U в формуле (4) для растяжения с ультразвуком и без него. Возможно, это связано с тем, что зернограничная деформация не столь чувствительна к ультразвуковым колебаниям, как внутризеренная.

4. Заключение

Приведенные выше данные показывают, что добавление ультразвуковых колебаний к одноосному растяжению не приводит к смене механизмов деформации как на стадии упрочнения, так и разупрочнения. 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] В.В. Клубович, А.В. Степаненко. Ультразвуковая обработка материалов. Наука и техника, Минск (1981). 295 с.
- [2] И.К. Вагапов. Нелинейные эффекты в ультразвуковой обработке. Наука и техника, Минск (1987). 160 с.
- [3] Н.А. Тяпунина, В.В. Благовещенский, Г.М. Зиненкова, Ю.А. Ивашкин. Изв. вузов. Физика **25**, 6, 118 (1982).
- [4] В.Е. Панин, Е.Н. Каблов, Ю.И. Почивалов, В.В. Колобнев. Физ. мезомеханика **15**, 6, 107 (2012).

- [5] Г.Н. Малик, А.В. Мац, В.И. Соколенко. Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники 6 (14), 39–41 (2004).
- [6] В.В. Благовещенский, И.Г. Панин. ФТТ 53, 10, 2005 (2011).
- [7] М.М. Мышляев, М.А. Прокунин, В.В. Шпейзман. ФТТ 43, 5, 833 (2001).
- [8] М.М. Мышляев, В.В. Шпейзман, М.М. Камалов. ФТТ 43, 11, 2015 (2001).
- [9] В.В. Шпейзман, М.М. Мышляев, М.М. Камалов, М.М. Мышляева. ФТТ 45, 11, 2008 (2003).
- [10] V.M. Segal, V.L. Reznikov, A.E. Drobyshevskiy, V.I. Kopylov. Rus. Metallurgy 1, 99 (1981).
- [11] V.M. Segal. Mater. Sci. Eng. A 197, 157 (1995).
- [12] J. Friedel. Dislocations. Pergamon press, Oxford (1964). [Ж. Фридель. Дислокации. Мир, М. (1967) 643 с.].
- [13] Дж.П. Старк. Диффузия в твердых телах. Энергия, М. (1980). 239 с.