

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 538.951:539.375.5

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6

© 2008 г. **В.Н. Чувильдеев**¹, **М.Ю. Грязнов**^{1,2}, **В.И. Копылов**³, **А.Н. Сысоев**¹,
Б.В. Овсянников⁴, **А.А. Флягин**⁴

¹ Научно-исследовательский физико-технический институт ННГУ им. Н.И. Лобачевского

² Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

³ Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск

⁴ ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод»

gryaznov@nifti.unn.ru

Поступила в редакцию 18.06.2008

В результате обработки литых образцов промышленного алюминиевого сплава АМг6 по технологии равноканального углового прессования был получен микрокристаллический (МК) материал, обладающий рекордными механическими характеристиками. Предел прочности МК-сплава АМг6 достигает 440 МПа, что в 2 раза выше предела прочности сплава в литом состоянии. Одновременно МК-сплав АМг6 обнаруживает при комнатной температуре пластичность в 2 раза более высокую, чем его литые аналоги. Также показано, что предел прочности МК-сплава АМг6 после дополнительной холодной прокатки увеличивается до 540 МПа. В области низкотемпературной сверхпластичности (250–275 °С) удлинение до разрушения МК-сплава АМг6 достигает 320 %, что в 6 раз превышает характеристики промышленного сплава, полученные в аналогичных условиях испытаний.

Ключевые слова: микрокристаллические материалы, алюминиевые сплавы, технология РКУП, прочность, внутреннее трение, низкотемпературная сверхпластичность.

Введение

Сплав АМг6 – деформируемый алюминиевый сплав системы Al-Mg-Mn – сочетает удовлетворительную прочность с хорошей пластичностью, коррозионной стойкостью и хорошей свариваемостью. Это определяет широкое применение сплава АМг6 в судостроении, строительстве, ракетостроении и авиации.

Обычное значение удлинения сплава АМг6 до разрыва не превышает 15–20% при комнатной температуре и составляет 50–60% при температурах 200–300 °С [1], что существенно ограничивает спектр возможных приложений этого материала. Известно, что эффективным методом повышения деформируемости сплавов является создание мелкозернистой структуры, способствующей проявлению эффекта сверхпластичности [2–4]. В работах [5, 6] была продемонстрирована возможность получения сверхпластичности в сплаве АМг6 после прокатки: величина удлинения до разрыва составляла 200–230% при температурах 420–480 °С и

скорости деформации порядка $1 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Однако известно, что высокотемпературная термомеханическая обработка сплавов системы Al-Mg-Mn при температурах выше 340 °С существенно снижает их коррозионную стойкость [7].

Основной задачей работы являлось повышение предела прочности сплава АМг6 до 400–450 МПа при сохранении или увеличении пластичности. Получение сплава с такими свойствами позволит во многих случаях заменить дорогостоящие алюминиевые сплавы, содержащие скандий, типа 1575.

Второй задачей, решаемой в настоящей работе, является получение низкотемпературной сверхпластичности в МК-сплаве АМг6 в интервале температур от комнатной до 300 °С, а также определение оптимальных температурно-скоростных режимов сверхпластической деформации с использованием методов внутреннего трения.

Повышение прочности и пластичности сплава АМг6 при комнатных температурах, а также достижение сверхпластичности при повышен-

ных температурах деформации может быть осуществлено путем формирования микрокристаллической зеренной структуры методами интенсивного пластического деформирования.

Объект исследования

В настоящей работе объектом исследования был выбран алюминиевый сплав АМг6 (ОАО «КУМЗ»). Химический состав сплава: Al – 6.0%, Mg – 0.71%, Mn – 0.24%, Fe – 0.1%, Si – 0.04%, Ti – 0.02%, Zn – 0.01%, Cu (% по массе). Образцы литого сплава АМг6 были предварительно закалены и подвергнуты интенсивной пластической деформации по технологии равноканального углового прессования (РКУП) [8, 9]. РКУП является эффективным методом обработки металлов давлением, обеспечивающим управление процессами формирования их структуры [8]. При оптимальном выборе температурно-скоростных условий многоцикловое РКУП обеспечивает эффективное измельчение зерна, формирование большеугловых границ зерен и позволяет получать однородную нано- и микрокристаллическую структуру в объемных заготовках [9].

В настоящей работе РКУП осуществлялось в инструменте с углом пересечения рабочего и выходного каналов 90°. Однородность деформации простого сдвига контролировалась на каждом цикле с помощью поперечных рисок, механически нанесенных в плоскости течения образца. Скорость прессования заготовки размерами 22×22×165 мм³ составляла 0.4 мм/с. Литые образцы сплава АМг6 были подвергнуты 6 циклам РКУП при температуре 200°C. В результате прессования в сплавах была получена однородная микрокристаллическая структура со средним размером зерна порядка 0.4 мкм (рис. 1).

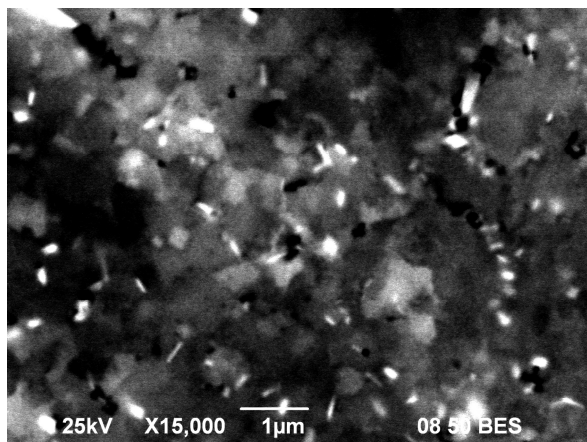


Рис. 1. Микроструктура сплава АМг6 после 6 циклов РКУП при увеличении ×15000

Методика эксперимента

Механические испытания в режиме растяжения с постоянной скоростью движения захватов с начальной истиной скоростью деформации от 10⁻⁴ до 10⁻¹ с⁻¹ проводились на машине для сверхпластических испытаний «Tinius Olsen H25S-K». Испытания проводились в диапазоне температур 20–550°C. Образцы для механических испытаний в форме двойной лопатки с размером рабочей части 2×2×3 мм³ изготавливались электроискровой резкой. Нагрев образцов до температуры испытаний осуществлялся в течение 5 минут. Для установления теплового равновесия образцы выдерживались при рабочей температуре в течение 10 минут.

Для измерения внутреннего трения в работе использовалась акустическая установка «обратный крутильный маятник», позволяющая проводить измерения величины внутреннего трения и упругих модулей в режиме свободных затухающих колебаний в частотном диапазоне от 1 до 10 Гц. Для измерений использовались образцы размером 1.5×1.5×35 мм. Измерения проводились на частоте 7 Гц. Амплитуда деформации не превышала 5·10⁻⁶. Непрерывный нагрев и охлаждение образцов проводились с постоянной скоростью 4°C/мин в термокамере установки.

Величина внутреннего трения определялась по формуле:

$$Q^{-1} = \frac{\ln(A_0/A_N)}{\pi N},$$

где A_0 и A_N – значения амплитуд, между которыми производился счет числа N периодов свободнотухающих колебаний.

Величина модуля сдвига определялась по формуле:

$$G = \frac{l}{\alpha a^3 b} \left(\frac{4\pi^2 J}{T^2} - k \right),$$

где J – момент инерции маятника, α – постоянная величина, $k = \text{const}$ – жесткость подвеса при кручении, T – период крутильных колебаний, a , b и l – толщина, ширина и длина образца соответственно.

Результаты и их обсуждение

Механические и сверхпластические испытания. Проведены механические испытания на растяжение образцов микрокристаллического (после РКУП) и литого сплава АМг6 при комнатной температуре и скорости деформации 3·10⁻³ с⁻¹. На образцах микрокристаллического

(МК) сплава АМг6 обнаружен эффект одновременного повышения прочности и пластичности при комнатной температуре. Обработка сплава по технологии РКУП обеспечила увеличение предела прочности литого сплава АМг6 при комнатной температуре от 210 до 440 МПа. Следует отметить, что повышение прочностных характеристик металлических материалов методами больших пластических деформаций приводит, как правило, к снижению пластических характеристик. Однако, в МК-сплаве АМг6 наблюдается повышение пластичности при комнатной температуре: удлинение до разрыва δ составляет 25%, что в 2 раза превышает характеристики исходного литого сплава АМг6 (см. табл. 1).

Для изучения влияния термической обработки на механические свойства МК-сплава АМг6

при комнатной температуре были проведены предварительные отжиги образцов в диапазоне температур 100–550°C (длительность отжига 30 минут). На рис. 2 приведены зависимости удлинения до разрыва и предела прочности МК и литого сплава от температуры предварительного отжига. Как видно из рисунка, механические характеристики МК-сплава АМг6 не изменяются при низкотемпературных отжигах от 100 до 250°C. Однако, термообработка при температурах 300°C (и выше) повышает пластические характеристики МК-сплава в 2–2.5 раза и снижает прочность материала на 25%. Таким образом, после термообработки МК-сплав АМг6 имеет показатели пластичности в 4 раза более высокие, чем исходный литой материал.

Для повышения прочностных характеристик МК-сплава АМг6 образцы материала были под-

Таблица 1

Механические характеристики сплава АМг6 при комнатной температуре и в диапазоне температур 200–300 °С

Способ получения	Температура деформации, °С	Скорость деформации, с ⁻¹	Удлинение до разрыва, %	Предел прочности, МПа	Ссылки
РКУП	20	$3 \cdot 10^{-3}$	25	440	наст. работа
РКУП + ТО ¹	20	$3 \cdot 10^{-3}$	57	350	наст. работа
РКУП + прокатка	20	$3 \cdot 10^{-3}$	16	540	наст. работа
Литье	20	–	12	210	наст. работа
Ковка	20	–	19	330	[1]
Прокатка	20	–	19	340	[6]
РКУП	260	$3 \cdot 10^{-3}$	320	62	наст. работа
Литье	250	$5 \cdot 10^{-4}$	38	200	[6]
Прокатка	250	–	55	160	[1]

¹ ТО – термическая обработка

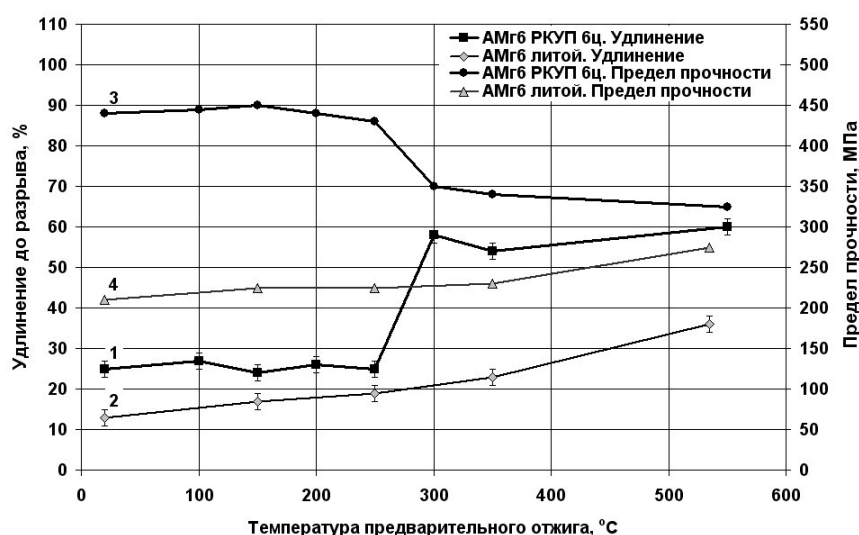


Рис. 2. Зависимости относительного удлинения до разрыва (кр. 1 и 2) и предела прочности (кр. 3 и 4) от температуры предварительного отжига сплава АМг6 в исходном состоянии (литом) и после РКУП (6 циклов)

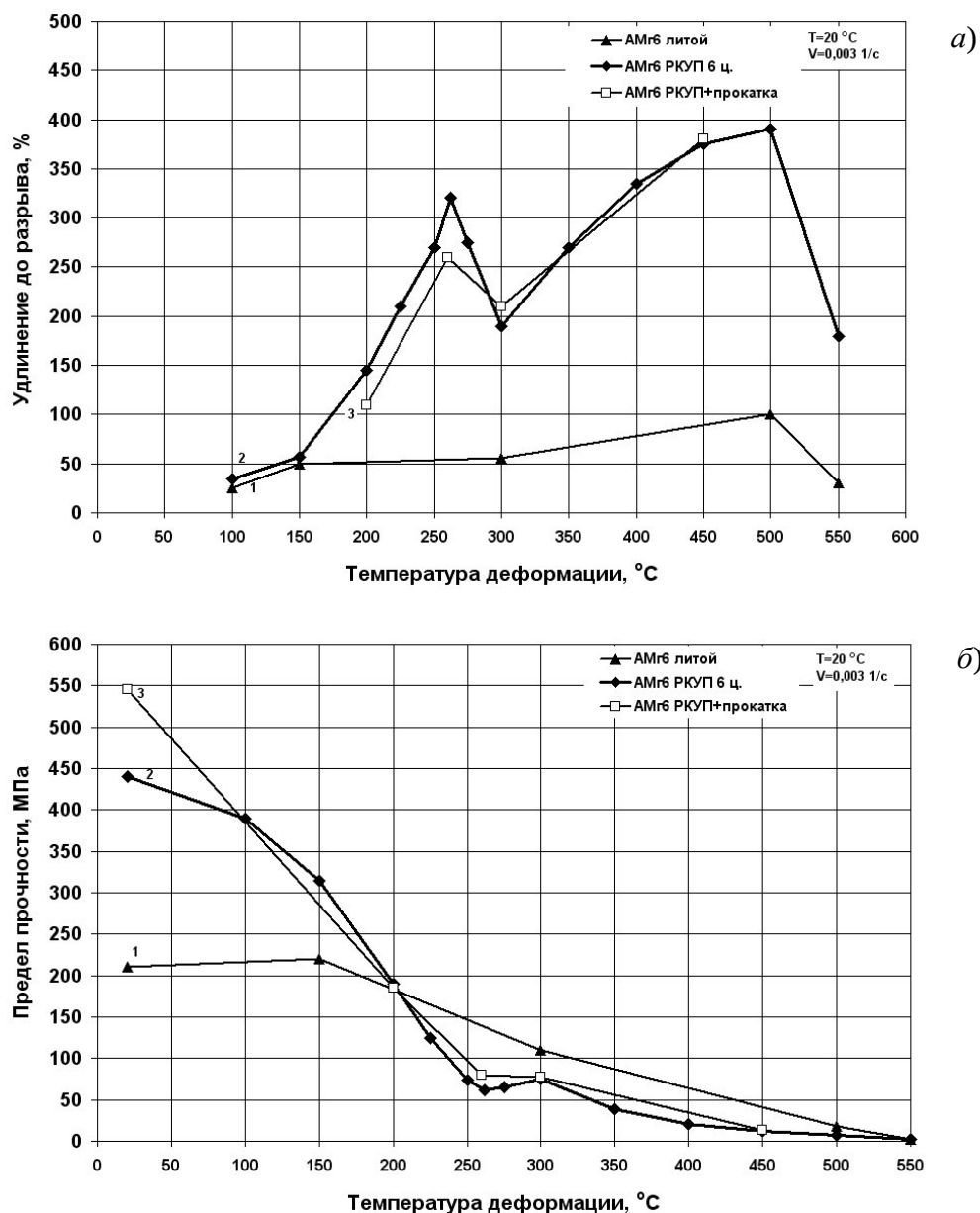


Рис. 3. Зависимость относительного удлинения до разрыва (а) и предела прочности (б) от температуры деформации сплава АМг6 в литом состоянии (кр. 1), после РКУП (кр. 2) и после РКУП и прокатки (кр. 3)

вергнуты холодной прокатке с обжатием 50%. Механические испытания на растяжение образцов МК-сплава после прокатки показали, что при температуре 20 °C и скорости деформации $3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ предел прочности увеличился до 540 МПа, тогда как удлинение до разрыва снизилось до 16%.

Результаты механических испытаний на растяжение МК и литого сплава АМг6 при температурах 100–550 °C и скорости деформации $3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ приведены на рис. 3. В сплаве АМг6 после РКУП (6 циклов) величина удлинения до разрыва δ интенсивно возрастает от 40 до 320% по мере повышения температуры деформации от 100 до 260 °C и резко снижается до 200% при

температуре 300 °C. При дальнейшем повышении температуры пластичность растет, достигая максимальной величины 380% при температуре 500 °C. В сплаве АМг6 после РКУП и прокатки зависимость величины удлинения от температуры деформации имеет подобный немонотонный характер. Пластичность при повышенных температурах деформации МК-сплавов до и после прокатки существенно не изменяется. Для литого сплава АМг6 показано, что удлинение до разрыва не превышает 100% во всем диапазоне температур деформации от 100 до 550 °C.

На рис. 3б приведены зависимости предела прочности от температуры деформации для сплава АМг6 в различных состояниях. Литой

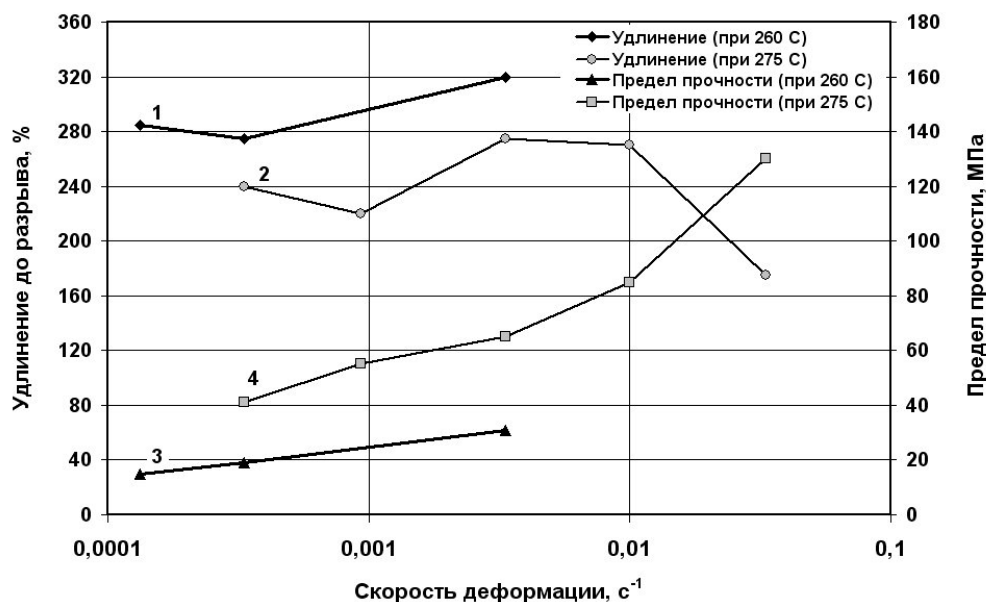


Рис. 4. Зависимости относительного удлинения до разрыва (кр. 1 и 2) и предела прочности (кр. 3 и 4) от скорости деформации МК-сплава АМг6 (РКУП 6 циклов) при температурах деформации 260 и 275 °C

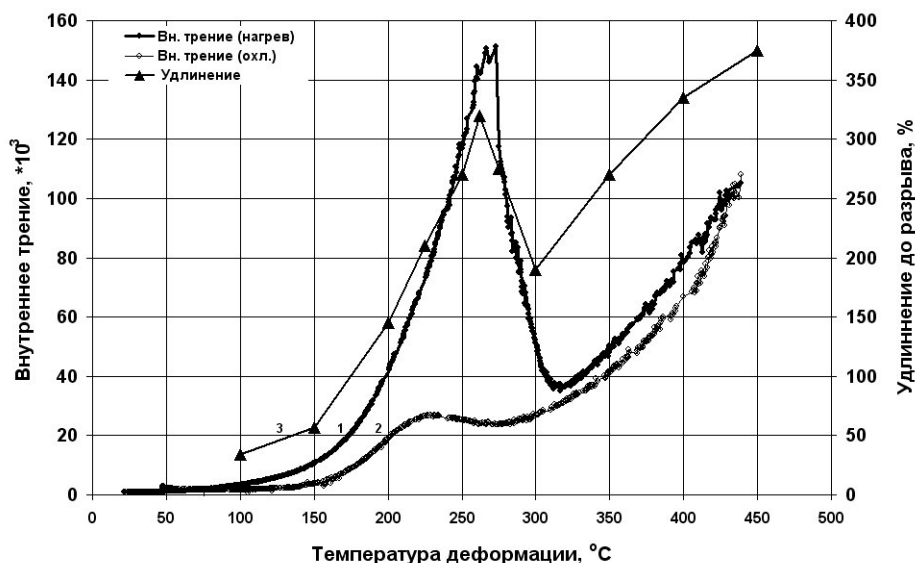


Рис. 5. Температурная зависимость внутреннего трения, полученная при нагреве (кр. 1) и охлаждении (кр. 2), и зависимость относительного удлинения до разрыва от температуры деформации (кр. 3) МК-сплава АМг6 (РКУП 6 циклов)

сплав имеет при температурах 20–150 °C более низкую прочность по сравнению с МК-сплавами, однако при температурах выше 300 °C литой сплав незначительно прочнее МК-сплавов. Как видно на рис. 3б, МК-сплавы обладают практически одинаковыми прочностными характеристиками во всем интервале температур деформации. Следует отметить, что минимум на кривой в области 250–275 °C совпадает с максимумом на температурной зависимости удлинения до разрыва (рис. 3а).

Зависимости относительного удлинения до разрыва и предела прочности при оптимальных температурах сверхпластичности (260 и 275 °C)

от скорости деформации $\dot{\epsilon}$ приведены на рис. 4. Величина удлинения до разрыва изменяется немонотонно, достигая 320% при $T = 260$ °C и $\dot{\epsilon} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$; предел прочности монотонно увеличивается с повышением скорости деформации в интервале от $1 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$.

Исследование внутреннего трения и модуля сдвига. Проведены исследования внутреннего трения и модуля сдвига в МК-сплаве АМг6 после РКУП (6 циклов) в интервале температур 20–400 °C, в герцовом диапазоне частот. Результаты исследований температурных зависимостей внутреннего трения $Q^{-1}(T)$ и модуля сдвига

$G(T)$, полученные при нагреве и охлаждении при частоте колебаний маятника 7 Гц, представлены на рис. 5 и 6. При нагревании образца от комнатной температуры до 265°C величина внутреннего трения (рис. 5, кр. 1) увеличивается от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1.5 \cdot 10^{-1}$. В интервале температур 265–315°C величина $Q^{-1}(T)$ резко снижается до значения $3.5 \cdot 10^{-2}$, но при дальнейшем нагревании практически линейно возрастает до $1 \cdot 10^{-1}$ при 440 °C. Таким образом, в температурном спектре внутреннего трения МК-сплава АМг6 наблюдается новый пик внутреннего трения при температуре 265°C. При охлаждении образца наблюдается уменьшение величины внутреннего трения (рис. 5, кр. 2). При температуре 225°C здесь наблюдается максимум внутреннего трения амплитудой $2.7 \cdot 10^{-2}$. Здесь следует отметить две важные особенности: во-первых, зависимости $Q^{-1}(T)$ при нагревании и охлаждении не совпадают и, во-вторых, пик внутреннего трения при нагревании выше в 5 раз максимума на кривой $Q^{-1}(T)$ при охлаждении.

Величина модуля сдвига в МК-сплаве АМг6 при нагревании от 25 до 265°C монотонно уменьшается (рис. 6 кр. 1) от 23 до 12 ГПа. В диапазоне температур 265–310°C наблюдается аномальное увеличение модуля сдвига на 1.5 ГПа. Дальнейшее увеличение температуры до 440°C приводит к уменьшению модуля сдвига до 10 ГПа. При охлаждении образца модуль сдвига монотонно возрастает от 10 до 21 ГПа.

Необходимо отметить, что при повторных нагревах образца МК-сплава АМг6 в диапазоне температур 25–430°C кривые $Q^{-1}(T)$ и $G(T)$ практически идентичны соответствующим кривым, полученным при охлаждении образца после первого нагрева, т.е. максимум на кривой $Q^{-1}(T)$ при 265 °C и аномальный рост величины модуля сдвига при 265–310°C являются необратимыми.

Представляется важным сделать подробный комментарий, касающийся объяснения причин возникновения максимумов внутреннего трения в МК-сплаве АМг6 при нагреве и охлаждении и отличия прямого и обратного хода (нагрева и охлаждения) кривых $Q^{-1}(T)$. Пик внутреннего трения, наблюдаемый при первом нагреве МК-сплава АМг6, имеет достаточно сложную природу. Величина внутреннего трения при нагреве может быть представлена как сумма трех составляющих. Первый вклад – фон внутреннего трения, экспоненциально растущий при увеличении температуры. Вторая составляющая обусловлена дислокационным внутренним трением, этот вклад резко снижается вследствие уменьшения плотности дислокаций (возврата) в

узком интервале температур 265–315°C. Третий вклад связан с зернограничным внутренним трением.

Рассмотрим, как проявляются эти составляющие на каждой стадии нагрева МК-сплава АМг6 (рис. 5 кр. 1). При нагреве в интервале температур 25–200°C внутреннее трение имеет две составляющие: высокий фон внутреннего трения, характерный для МК-сплава, и дислокационное внутреннее трение. В диапазоне температур интенсивных структурных изменений 200 – 300°C имеют место все три вышеперечисленные механизма: на фон внутреннего трения налагаются резкое снижение величины дислокационного внутреннего трения, обусловленное уменьшением плотности дислокаций в материале, и рост зернограничного внутреннего трения, обусловленный интенсивным зернограничным проскальзыванием. После нагрева до 320°C, когда структурные изменения в МК-сплаве АМг6 завершились, основной вклад в величину внутреннего трения дает фон внутреннего трения. При охлаждении образца МК-сплава структурные изменения не искажают вклад зернограничного внутреннего трения, и на температурной зависимости $Q^{-1}(T)$ при температуре 225°C наблюдается только зернограничный пик внутреннего трения.

Применение метода внутреннего трения для оптимизации режимов сверхпластической деформации. В работе показано, что величина внутреннего трения и её температурная зависимость коррелируют с величиной удлинения до разрыва и её зависимостью от температуры деформации для МК-сплава АМг6 (см. рис. 5). Причина корреляции связана с существованием единого микромеханизма деформации, контролирующего зернограничное внутреннее трение и сверхпластичность, – зернограничного проскальзывания. Теоретической основой нового подхода является теория неравновесных границ зерен [11] и, в частности, разработанные на её основе модели зернограничного и дислокационного внутреннего трения и модели сверхпластического течения в микрокристаллических сплавах. Весьма интересным представляется также выявленный эффект подобия температурной зависимости модуля сдвига и зависимости предела прочности от температуры деформации (см. рис. 6).

Обнаруженная корреляция поведения величин внутреннего трения и удлинения до разрыва позволяет использовать метод внутреннего трения для определения температурного диапазона, в котором материал имеет максимальную пластич-

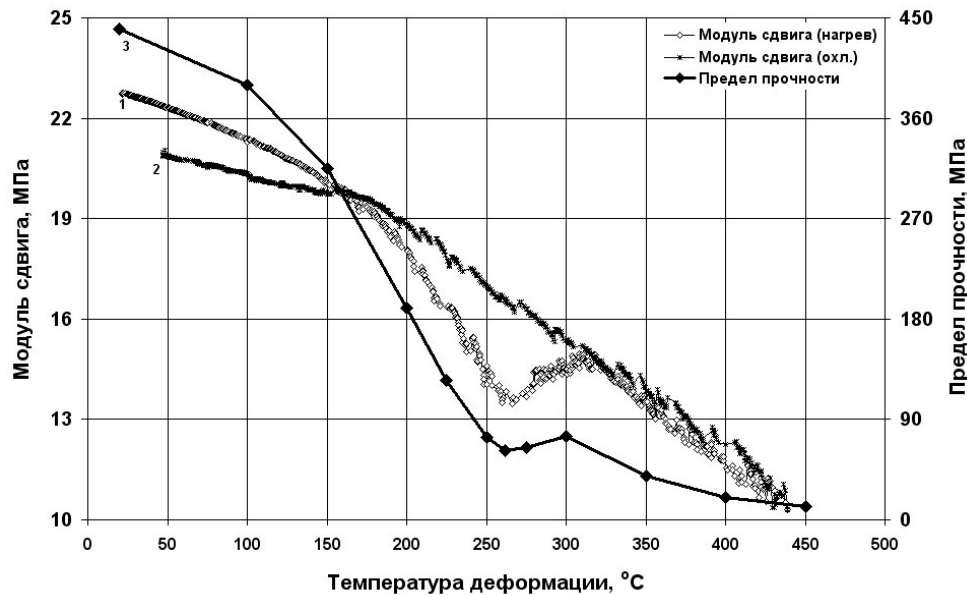


Рис. 6. Температурная зависимость модуля сдвига, полученная при нагреве (кр. 1) и охлаждении (кр. 2) и зависимость предела прочности от температуры деформации (кр. 3) МК-сплава АМг6 (РКУП 6 циклов)

ность (сверхпластичность), а также может быть применен для оптимизации режимов сверхпластического деформирования МК-сплавов.

Анализ результатов. Высокая пластичность МК-сплава АМг6 при температурах 200–275°C может быть объяснена в рамках представлений о развитии в этих условиях низкотемпературной сверхпластичности. Реологическое уравнение, связывающее скорость сверхпластического течения с напряжением течения σ и температурой деформации T имеет вид [4]:

$$\dot{\varepsilon} = A \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{G} \right)^n \left(\frac{b}{d} \right)^p \left(\frac{G D_{b0} \varphi}{kT} \right) \exp \left(- \frac{Q}{RT} \right),$$

где b — вектор Бюргерса, d — средний размер зерна, φ — толщина границы зерна, D_{b0} — предэкспоненциальный множитель коэффициента зернограницной диффузии, σ_0 — внутреннее напряжение, G — модуль сдвига, k — постоянная Больцмана, Q — энергия активации зернограницной диффузии, R — молярная газовая постоянная, n — величина, обратная коэффициенту скоростной чувствительности $m = \partial \ln \sigma / \partial \ln \dot{\varepsilon}$, $p = 2$ и $A = 10^2$ — численные коэффициенты. Коэффициент скоростной чувствительности m , определяемый из анализа экспериментальной зависимости $\sigma(\dot{\varepsilon})$, в рассматриваемом случае изменяется в интервале 0.4 ? 0.5. При полученных значениях m из приведенного выше выражения для $\dot{\varepsilon}$ вычислим энергию активации процесса пластического течения материала

$Q = (K - \ln(\sigma - \sigma_0)/m)/RT$ (здесь K — константа). В МК-сплаве АМг6 величина энергии активации сверхпластического течения составляет 65 кДж/моль, что на 20% ниже обычных значений энергии активации зернограницной диффузии в Al [10]. При полученных значениях Q величина коэффициента зернограницной диффузии $D_b^* = D_{b0} \exp(-Q/RT)$ при температуре 275°C примерно в 150 раз выше, чем обычное значение $D_b = 7 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$, вычисленное на основе стандартных данных $D_{b0} = 9 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $Q = 85 \text{ кДж/моль}$ [10]. Таким образом, низкие (неравновесные [11]) значения энергии активации зернограницной диффузии обуславливают появление сверхпластического течения сплава при относительно низких температурах деформации.

Заключение

Сравнение полученных результатов с данными других работ показывает (см. табл. 1), что МК-сплав АМг6 обнаруживает при комнатной температуре пластичность в 3 раза более высокую, чем его аналоги. Предел прочности МК-сплава АМг6 достигает 440 МПа, что на 100 МПа выше предела прочности аналогичных крупнокристаллических сплавов. В области низкотемпературной сверхпластичности (250–275°C) удлинение до разрушения МК-сплава АМг6 достигает 320%, что в 6 раз превышает характеристики крупнокристаллических сплавов в аналогичных условиях испытаний.

Авторы благодарят Н.В. Мелехина и С.В. Шотина за помощь в проведении экспериментальных исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 06-08-01119, 08-02-99047-р_офи, 08-08-99142-р_офи), Фонда грантовой поддержки фундаментальных исследований в области физики металлов и металловедения «ИНТЕЛС» (грант № 54-08-02) и при поддержке программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRHE) Министерства образования и науки РФ и Американского Фонда Гражданских Исследований и Развития CRDF (RUX0-001-NN-06, № ВРЗСО).

Список литературы

1. Машиностроение. Энциклопедия. Ред. совет: К.В. Фролов и др. Том II-3. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы / Под ред. И.Н. Фридляндера. М.: Машиностроение, 2001. 880 с.
2. Chuvil'deev V.N., Nieh T.G., Gryaznov M.Yu., et al. // Scripta Materialia. 2004. V. 50. № 6. P. 861–865.
3. Чувильдеев В.Н., Грязнов М.Ю., Копылов В.И. и др. // Доклады академии наук. 2008. Т. 419. № 2. С. 189–192.
4. Nieh T.G., Wadsworth J., Sherby O.D. Superplasticity in metals and ceramics. Cambridge Univ. Press, 1997.
5. Рабинович М.Х., Кайбышев О.А., Тимошенко Ю.Б., Трифонов В.Г., Свияжский Г.Я. // Технология легких сплавов. 1978. № 3. С. 11–14.
6. Микляев П.Г. Механические свойства легких сплавов при температурах и скоростях обработки давлением: Справочник. М.: Металлургия, 1994. 280 с.
7. Aluminum: properties and physical metallurgy / Edited by J.E. Hatch. Ohio, American Society for Metals. Metals Park, 1984.
8. Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. Процессы пластического структурообразования металлов. Минск: Наука и техника, 1994. 232 с.
9. Kopylov V.I. Investigations and Applications of Severe Plastic Deformation / Ed. by T.C. Lowe and R.Z. Valiev. Kluwer Academic Publisher, 2000. P. 23–27.
10. Фрост Г.Дж., Эшби М.Ф. Карты механизмов деформации. Челябинск: Металлургия, 1989. 328 с.

MECHANICAL PROPERTIES OF MICROCRYSTALLINE AMg6 ALUMINUM ALLOY

V.N. Chuvil'deev, M.Yu. Gryaznov, V.I. Kopylov, A.N. Sysoev, B.V. Ovsyannikov, A.A. Flyagin

A microcrystalline (MC) material with record-breaking mechanical properties has been obtained by equal channel angular pressing of AMg6 cast aluminum alloy samples. The ultimate tensile strength of MC AMg6 alloy reaches 440 MPa, which is twice as much as that of the cast alloy. At the same time, it shows double plasticity at the room temperature as compared to its cast counterparts. The MC AMg6 alloy ultimate tensile strength has also been found to increase up to 540 MPa after additional cold rolling. In the range of low-temperature superplasticity (250–275°C), the elongation to failure of MC AMg6 alloy reaches 320%, which is 6 times greater than that of the commercial alloy tested under similar conditions.

11. Чувильдеев В.Н. Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения. М.: Физматлит, 2004. 305 с.