

УДК 539.4, 539.3

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА ЭФФЕКТ ПЛАСТИФИКАЦИИ В УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОМ НИЗКОЛЕГИРОВАННОМ СПЛАВЕ Al-Cu-Zr

Садыков Д.И. (Университет ИТМО)

Научный руководитель – д. ф.-м. н, профессор Орлова Т.С.
(Университет ИТМО)

Аннотация

Исследовано влияние скорости деформации на эффект пластификации (ЭП), обнаруженный в ультрамелкозернистом (УМЗ) низколегированном сплаве Al-1.47Cu-0.34Zr (wt.%), структурированном методом интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) и прошедшем дополнительную деформационно-термическую обработку (ДТО). Показано, что в диапазоне скоростей деформации от 10^{-4} до 10^{-3} s^{-1} сплав в состоянии после ДТО сохраняет высокую пластичность при высокой прочности. Определен коэффициент скоростной чувствительности для сплава Al-1.47Cu-0.34Zr (wt.%) в состоянии до и после ДТО. Обсуждаются возможные причины подавления ЭП при высоких скоростях деформации ($\geq 10^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Введение. Сплавы на основе алюминия привлекают большое внимание из-за их высокого потенциала для использования в различных отраслях промышленности, таких как электротехническая, авиационная, аэрокосмическая благодаря высокой электропроводности, легкости и коррозионной стойкости. Серьезным недостатком данного типа материалов является их низкая прочность. В последнее время для повышения прочности применяется подход по формированию УМЗ структур методами интенсивной пластической деформации (ИПД). Платой за высокую прочность, является низкая пластичность УМЗ материалов, что сильно ограничивает сферу их практического применения. Целью данной работы является исследование влияния скорости деформации на ЭП – значительное увеличение пластичности в результате воздействия дополнительной ДТО - обнаруженный нами недавно в УМЗ сплаве Al-Cu-Zr.

Основная часть. После проведения предварительного длительного отжига, для формирования равновесной структуры, методом ИПДК под гидростатическим давлением 6 ГПа и количестве оборотов, равном 10, была сформирована УМЗ структура сплава Al-Cu-Zr. Часть образцов сплава прошла дополнительную ДТО, состоящую из низкотемпературного кратковременного отжига при температуре 125°C в течение 240 min и дополнительной ИПДК на 0.25 оборота. Исследование влияния скорости деформации на ЭП проводилось путем проведения механических испытаний на одноосное растяжение образцов сплава в состояниях до и после ДТО, при комнатной температуре и при постоянных скоростях деформации ($\dot{\epsilon}$): 10^{-4} , 5×10^{-4} , 10^{-3} и 10^{-2} s^{-1} .

Показано, что образцы УМЗ сплава до проведения ДТО демонстрируют рост прочностных характеристик с увеличением скорости деформации. При изменении скорости деформации с 10^{-4} до 10^{-2} s^{-1} предел текучести ($\sigma_{0.2}$) увеличивается с 320 до 430 МПа, предел прочности (σ_{UTS}) возрастает с 520 до 570 МПа, одновременно с этим наблюдается падение пластичности до разрушения (δ) с ~ 6 до 1 %. Тенденция изменения прочностных характеристик у образцов после ДТО подобна таковой у образцов до ДТО, однако величины пределов прочности и текучести несколько ниже. Образцы после ДТО демонстрируют высокую пластичность до разрушения ($\delta > 10\%$) в широком диапазоне скоростей деформации $\dot{\epsilon}' = 10^{-4} - 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, где величина пластичности практически не зависит от $\dot{\epsilon}'$. При увеличении скорости деформации до $\dot{\epsilon}' = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ пластичность резко понижается до $\sim 5\%$, что указывает на нивелирование ЭП при дальнейшем повышении $\dot{\epsilon}'$. Значение $\delta \sim 5\%$ при $\dot{\epsilon}' = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ почти в 5 раз превышает

величину пластичности в состоянии до ДТО при такой же скорости деформации, что свидетельствует о том, что относительный ЭП сохраняется во всем исследуемом диапазоне скоростей деформации.

Был определен коэффициент скоростной чувствительности m , так как известно, что некоторые УМЗ Al-сплавы демонстрируют высокую пластичность и даже «сверхпластичность» в связи со значительным вкладом в процесс пластической деформации механизма зернограницного проскальзывания (ЗГП), который характеризуется повышенными значениями коэффициента $m \sim 0.1-0.3$. Определенный в данной работе коэффициент скоростной чувствительности для образцов до ДТО составил 0.033 ± 0.016 , что хорошо согласуется с литературными данными для УМЗ металлов с г.ц.к. решеткой. Важно отметить, что значение коэффициента скоростной чувствительности (с учетом погрешности) после проведения ДТО практически не изменяется ($m = 0.038 \pm 0.011$). Следовательно, можно заключить, что обнаруженный ЭП в состоянии после ДТО не связан с увеличением коэффициента скоростной чувствительности и интенсификацией процесса ЗГП.

Высокая пластичность в состоянии после ДТО, может быть объяснена в рамках известной модели, объясняющей ЭП в УМЗ Al. Согласно модели, пластическая деформация в УМЗ Al, структурированном методом ИПДК, осуществляется путем эмиссии решеточных дислокаций из границ зерен (ГЗ). Дополнительная ДТО приводит к внесению дополнительной плотности зернограницных дислокаций (ЗГД) в релаксированную отжигом структуру границ зерен (ГЗ) и приграничные области, что может влиять на формирование дислокационных скоплений в ГЗ под действием внешних напряжений, и, как следствие, на эмиссию дислокаций из ГЗ. Влияние скорости деформации на ЭП также можно объяснить в рамках указанной модели. В связи с тем, что время достижения предела текучести при высоких скоростях деформации становится сравнимым со временем формирования скоплений дислокаций в ГЗ при комнатной температуре (~ 6 s), можно предположить, что дислокации не успевают образовывать достаточно мощные скопления в ГЗ, что приводит к более низкой пластичности и нивелированию эффекта пластификации при высоких скоростях деформации.

Выводы. В результате проведенного исследования можно сделать несколько выводов:

1. Исследовано влияние скорости деформации на ЭП в УМЗ сплаве Al-Cu-Zr в состоянии после ДТО. Показано, что в диапазоне скоростей деформации от 10^{-4} до 10^{-3} s^{-1} образцы демонстрируют высокую пластичность ($\delta > 10\%$) при сохранении высокого уровня прочности. При повышении скорости до 10^{-2} s^{-1} , наблюдается снижение пластичности до $< 5\%$, однако относительно состояния до ДТО, при аналогичной скорости деформации, ЭП сохраняется.
2. Впервые был определен коэффициент скоростной чувствительности для образцов сплава Al-1.47Cu-0.34Zr (wt.%) в состояниях до и после ДТО. В обоих состояниях коэффициент m практически не изменяется, что указывает на то, что процесс ЗГП не играет ключевой роли в, обнаруженном ЭП.
3. Подавление ЭП при больших скоростях деформации, может быть объяснено в рамках модели, предложенной ранее для объяснения ЭП в УМЗ Al и в предположении о термоактивированном скольжении внесенных ДТО ЗГД.