

УДК 539.4, 539.3

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭФФЕКТ ПЛАСТИФИКАЦИИ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО НИЗКОЛЕГИРОВАННОГО СПЛАВА Al-Cu-Zr

Садыков Д.И. (Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»)

Научный руководитель – д. ф.-м. н, профессор Орлова Т.С.

(Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»)

Введение. Ультрамелкозернистые (УМЗ) алюминиевые сплавы являются перспективными функциональными материалами для использования в различных отраслях промышленности в виду своих высоких прочностных характеристик. Ключевым недостатком данного рода материалов является их низкая пластичность, значительно ограничивающая их практическое применение. В связи с этим необходима разработка новых, простых и эффективных подходов повышения пластичности УМЗ материалов при сохранении их высоких прочностных характеристик. Целью данной работы является исследование влияния температуры деформации на эффект пластификации (ЭП) – значительное увеличение пластичности, при сохранении высокой прочности, в результате воздействия дополнительной деформационно-термической обработки (ДТО) - обнаруженный нами ранее в УМЗ сплаве Al-Cu-Zr [1, 2].

Основная часть. УМЗ структура сплава Al-1.47Cu-0.34Zr (wt%) была получена методом ИПДК под гидростатическим давлением 6 ГПа и количестве оборотов, равном 10. Часть образцов была подвергнута дополнительной деформационно-термической обработке (ДТО), состоящей из низкотемпературного отжига ($T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 1\text{ h}$) и дополнительной деформации ИПДК на 0.25 оборота. Исследование влияния температуры деформации на ЭП проводилось путем проведения механических испытаний на одноосное растяжение образцов сплава в состояниях до отжига, после отжига и дополнительной деформации при постоянной скорости деформации ($5 \times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$) в диапазоне температур деформации от 293 до 77 К.

Показано, что при снижении температуры деформации наблюдается уменьшение величины эффекта пластификации. При достижении температуры 223 К эффект полностью исчезает. Дальнейшее понижение температуры до 77 К приводит практически к одинаковой пластичности во всех трех исследованных состояниях.

Микроструктурные исследования показали, что структура всех трех исследуемых состояний различается лишь особенностями структуры границ зерен, а именно плотностью дислокаций, формой и размером нанопреципитатов Al_2Cu расположенных в границах зерен (ГЗ). В состоянии до отжига преципитаты имеют эллиптическую форму, отжиг способствует увеличению размеров преципитаты, а также формированию более кристаллографически ограненной формы. После ДТО форма преципитатов сохраняется.

Изменения температурной зависимости предела текучести ($\sigma_{0.2}$) для всех исследованных состояний можно разделить на 2 области: I – относительно быстрого роста $\sigma_{0.2}$ при снижении температуры от 293 К до примерно 243 К и II – медленного роста $\sigma_{0.2}$ при понижении температуры от 223-243 К до 77 К.

Зависимость пластичности (δ) от температуры деформации показывает, что ЭП существует в области I, однако его величина непрерывно уменьшается с понижением температуры внутри данной области. При достижении температуры 223 К этот эффект практически полностью подавляется. Таким образом, в работе показано, что состояние ГЗ влияет на деформационное поведение УМЗ сплава Al-Cu-Zr в данной температурной области.

При дальнейшем понижении температуры от 223 К до 77 К пластичность возрастает. Все исследованные состояния демонстрируют значительную пластичность ($\delta \sim 8\%$) при 77 К

с сохранением высокой прочности ($\sigma_{0.2} > 430$ МПа, во всех исследуемых состояниях) Соответственно, можно сделать заключение, что в данной области состояние границ зерен перестает оказывать влияние на деформационное поведение УМЗ сплава Al-Cu-Zr. Увеличение пластичности в этой области можно объяснить затруднением процессов динамического возврата при низких температурах.

На основании анализа температурной зависимости предела текучести для всех трех исследуемых состояний была оценена энергия активации процессов пластического течения (Q_1) в температурной области существования ЭП (область I). Обнаружено, что отжиг способствует снижению энергии активации более чем в два раза (с 90 до 41 кДж/моль), а последующая деформация на 0.25 оборота способствует лишь частичному восстановлению величины Q_1 , до 72-82 кДж/моль.

Повышение пластичности и даже проявление «сверхпластичности» в УМЗ материалах часто связывают с процессами интенсификации зернограницного скольжения, связанных с процессами зернограницной диффузии. Известно, что коэффициент диффузии в неравновесных ГЗ значительно выше, чем коэффициент диффузии равновесных ГЗ. Следовательно, отжиг должен увеличивать энергию зернограницной диффузии, в то время как значение Q_1 в УМЗ сплаве Al-Cu-Zr после отжига уменьшается. В результате, можно сделать вывод, что в случае обнаруженного ЭП, процесс интенсификации зернограницного скольжения не может играть ключевой роли в проявлении данного эффекта.

Предположительно, в состоянии до отжига пластическая деформация осуществляется путем образования скоплений зернограницных дислокаций (ЗГД) у тройных стыков под действием внешнего напряжения и их дальнейшего испускания из тройных стыков. После отжига происходит изменение механизма пластического течения. Отжиг способствует релаксации ГЗ и аннигиляции части внесенных ЗГД, в результате чего источниками испускания дислокаций могут становиться нанопреципитаты Al_2Cu , расположенные в ГЗ, что, вероятно, и приводит к изменению энергии активации. ДТО способствует внесению дополнительной плотности дислокаций в ГЗ, что в сумме с испусканием решеточных дислокаций из нанопреципитатов Al_2Cu , расположенных в ГЗ, и обеспечивает повышенную пластичность, а также способствует частичному восстановлению энергии активации до величины в состоянии до отжига.

Выводы.

1. Впервые изучено влияние температуры деформации на эффект пластификации для разрабатываемого, нового УМЗ сплава Al-Cu-Zr, структурированного методом ИПДК. Показано, что эффект пластификации уменьшается с понижением температуры деформации и полностью исчезает при достижении 223 К.

2. Определена энергия активации для образцов сплава Al-Cu-Zr в состояниях до отжига, после отжига и ДТО. Показано, что отжиг способствует снижению энергии активации более чем в 2 раза, что, свидетельствует об изменении механизма пластической деформации.

Список использованных источников:

1. Orlova T.S., Sadykov D.I., Danilov D.V., Enikeev N.A., Murashkin M.Y. Ultrafine-grained Al-Cu-Zr alloy with high-strength and enhanced plasticity // Materials Letters. – 2021. – № 303. – pp. 130490.

2. Садыков Д.И., Орлова Т.С., Мурашкин М.Ю. Влияние скорости деформации на эффект пластификации ультрамелкозернистого сплава Al-Cu-Zr в высокопрочном состоянии // Физика твёрдого тела. – 2022. – № 64(6). – С. 683-690.