

АНОМАЛЬНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО СПЛАВА Al-Mg-Zr В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

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. Al-Mg сплавы широко применяются в различных отраслях промышленности. Особый интерес они представляют, как потенциально возможная замена дорогим нержавеющей и никелевым сталям в качестве криогенных материалов. Ключевым недостатком Al-Mg сплавов является их относительно низкая прочность. Одним из способов преодоления данного недостатка является формирование ультрамелкозернистых (УМЗ) структур методами интенсивной пластической деформации. Однако высокая прочность УМЗ материалов, как правило, сопровождается снижением пластичности, что с учетом отсутствия систематических исследований влияния низких температур на механические свойства УМЗ материалов ограничивает перспективы их применения. Ранее для УМЗ Al [1] и УМЗ сплава системы Al-Zr [2] было показано, что применение деформационно-термической обработки (ДТО) вида: «отжиг + небольшая дополнительная деформация», способствует значительному увеличению пластичности при сохранении высокого уровня прочности. Целью данной работы является исследования влияния ДТО на механические свойства УМЗ сплава Al-Mg-Zr, а также влияния пониженных температур деформации на достигнутые наилучшие механические характеристики.

Основная часть. УМЗ структура сплава Al-0.95Mg-0.32Zr (wt. %) была получена методом кручения под высоким давлением (КВД) при $P = 2$ GPa и количестве оборотов $n = 10$. Часть образцов после КВД была подвергнута ДТО, состоящей из двух этапов: низкотемпературного отжига ($T = 150$ °C, $t = 1$ h) и дополнительной КВД на 0.25 оборота при $P = 2$ GPa. Исследование влияния температуры деформации на механические свойства, проводилось путем проведения механических испытаний на одноосное растяжение образцов сплава в состояниях после КВД, после КВД и отжига, и после полной ДТО при постоянной скорости деформации (5×10^{-4} s⁻¹) в диапазоне температур деформации от 293 до 77 К.

Показано, что снижение температуры деформации с 293 до 77 К приводит к росту прочности в состояниях после КВД ($\sigma_{0.2}$ увеличивается с ~420 до ~560 МПа) и после КВД и отжига ($\sigma_{0.2}$ увеличивается с ~370 до ~440 МПа). Во всем исследуемом температурном интервале в этих состояниях наблюдается крайне низкая пластичность ($\delta_{КВД} \sim 1.6$ –0.4%, $\delta_{КВД+отжиг} \sim 0.5$ –0.6%). Полная ДТО приводит к значительному увеличению пластичности системы Al-Mg-Zr ($\delta \sim 7$ –13 %) при сохранении высокого уровня прочности ($\sigma_{0.2} \sim 300$ –435 МПа). Достигнутые в результате ДТО высокие показатели прочности и пластичности сохраняются во всем исследуемом диапазоне температур деформации.

Микроструктурные исследования показали, что средний размер зерен во всех исследуемых состояниях остается практически неизменным и составляет ~400-500 нм. Наблюдается преимущественно большеугловая разориентировка границ зерен (БУГЗ). ГЗ в состояниях после КВД и после полного ДТО размыты, искривлены и плохо выражены, что указывает на их неравновесное состояние. Отжиг, напротив, способствует формированию более четких ГЗ, что свидетельствует о процессе релаксации структуры ГЗ и переходе их в более равновесное состояние.

Структурным параметром, значительно изменяющимся от состояния к состоянию, является плотность дислокаций. Отжиг способствует уменьшению плотности дислокации, что можно объяснить процессами возврата, а последующая деформация приводит к введению

дополнительной плотности дислокаций. В виду того, что ПЭМ исследования продемонстрировали практически полное отсутствие дислокационной структуры внутри зерен дислокационную плотность относят к ГЗ и приграничным областям. Путем проведения ЭДС-сканирования на ГЗ обнаружена сегрегация атомов Mg, что является типичным для Al-Mg сплавов, структурированных методом КВД.

На основе сопоставления особенности микроструктуры и результирующих свойств в исследуемых состояниях, эффект повышения пластичности в результате ДТО можно объяснить в рамках модели, предложенной нами ранее для УМЗ ТЧ Al [1]. Дополнительная деформация после отжига приводит к введению дополнительной плотности внешних зернограничных дислокаций (ВЗГД) в релаксированную структуру ГЗ. В Al-Mg-Zr сплаве такие дислокации, внесенные дополнительной деформацией после отжига, могут быть не закреплены сегрегированными атомами Mg, что увеличивает степень неравновесности ГЗ. Внесенные дислокации могут образовывать скопления на ГЗ у тройных стыков под действием внешней нагрузки и, способствовать эмиссии большего количества решеточных дислокаций из ГЗ при относительно меньшем внешнем напряжении.

В таком случае, аномальное изменение прочности и пластичности в состоянии после ДТО в температурном диапазоне 243–293 К, можно объяснить конкуренцией термоактивационных процессов, влияющими на подвижность ВЗГД. Такими процессами могут быть динамическое деформационное старение (ДДС) и преодоление зернограничного барьера Пайерлса (ЗГБП). С одной стороны, снижение температуры ведет к снижению коэффициента диффузии атомов Mg в ГЗ и увеличивает время необходимое для закрепления ЗГД, что в свою очередь увеличивает подвижность ВЗГД, с другой стороны с понижением температуры время необходимое для преодоления ЗГБП увеличивается, что снижает подвижность ВЗГД. В интервале температур 243–293 К, по-видимому, доминирует процесс ДДС, что и приводит к аномальному изменению предела текучести и пластичности с понижением температуры.

Выводы. Впервые исследовано влияние температуры деформации на прочность и пластичность УМЗ сплава Al-0.95Mg-0.32Zr (wt. %), структурированного КВД, в различных состояниях. Показано, что в результате ДТО, состоящая из низкотемпературного отжига и последующей дополнительной деформации, приводит к существенному повышению пластичности при сохранении высокой прочности. Достигнутые высокие показатели прочности и пластичности сохраняются во всем исследуемом диапазоне температур. Изменение дислокационной структуры ГЗ, вызванное ДТО, является ключевым фактором, ответственным за повышение пластичности после ДТО.

Для УМЗ сплава Al-0.95Mg-0.32Zr (wt. %) после ДТО впервые обнаружен аномальный характер температурных зависимостей $\sigma_{0.2}$ и δ в интервале температур деформации 243–293 К. Предложено возможное объяснение такого аномального поведения.

Список использованных источников:

1. Orlova T. S. et al. Hardening by annealing and implementation of high ductility of ultra-fine grained aluminum: experiment and theory //Reviews on Advanced Materials Science. – 2018. – Т. 57. – №. 2. – С. 224-240.
2. Orlova T. S. et al. Influence of Decreased Temperature of Tensile Testing on the Annealing-Induced Hardening and Deformation-Induced Softening Effects in Ultrafine-Grained Al-0.4 Zr Alloy //Materials. – 2022. – Т. 15. – №. 23. – С. 8429.