

ДИСКЛИНАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ БЫСТРОГО ОБРАЗОВАНИЯ И МЕДЛЕННОГО РАСТВОРЕНИЯ ПОР НА ГРАНИЦАХ ЗЕРЕН ПРИ ОТЖИГЕ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Гуткин М.Ю.¹, Орлова Т.С.², Скиба Н.В.^{1,3}

¹ *Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия*

² *Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия*

³ *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,*

Санкт-Петербург, Россия

m.y.gutkin@gmail.com

Благодаря присутствию в структуре ультрамелкозернистых (УМЗ) сплавов наноразмерных выделений второй фазы часто удается получить сочетание высокой прочности и хорошей пластичности материала [1,2]. Ускоренное выделение второй фазы в УМЗ сплавах, полученных интенсивной пластической деформацией, наблюдалось в [3–5]. Так, значительное количество нановыделений Al_3Zr отмечалось в УМЗ сплаве $Al-Zr$, структурированном кручением под высоким давлением с последующим отжигом при 230 °С [5]. Причины ускоренной кинетики образования таких выделений пока не ясны. Эксперименты по отжигу этого сплава *in situ* в камере сканирующего просвечивающего электронного микроскопа показали, что в первые 10 мин отжига по границам зерен (ГЗ) и по их тройным стыкам происходит множественное образование пор [6]. Затем при длительном отжиге в течение 3 ч наблюдалось постепенное растворение этих пор, причем некоторые из них растворялись полностью. Такое растворение пор, сопровождаемое эмиссией вакансий, может объяснить ускоренное выделение второй фазы в УМЗ сплаве.

Для объяснения этих наблюдений в настоящей работе предлагаются теоретические модели, описывающие рост пор на стыковых и зернограничных клиновидных дисклинациях. Предполагается, что на первой стадии отжига происходит уменьшение свободного объема в структуре неравновесных ГЗ за счет образования вакансий, которые мигрируют к дисклинациям и коагулируют на них с образованием пор. Появление таких пор приводит к понижению упругой энергии дисклинаций. Рассчитаны равновесный и критические радиусы поры, в интервале между которыми присутствие на дисклинации поры энергетически выгодно. Показано, что равновесный радиус поры и интервал между ее критическими радиусами увеличиваются с ростом мощности дисклинации. Показано также, что свободного объема в неравновесных ГЗ достаточно для быстрого образования на них пор на начальной стадии отжига.

Для последующей (длительной) стадии отжига предложена модель переползания зернограничных дислокаций (ЗГД) к порам на стыковых и зернограничных дисклинациях. Такое переползание сопровождается растворением пор и эмиссией ими вакансий, поглощение которых и обеспечивает переползание ЗГД. Рассчитано изменение энергии при соответствующем уменьшении размера дисклинационной структуры вокруг поры, и показано, что это уменьшение энергетически выгодно. Предложенный механизм хорошо согласуется с экспериментальными наблюдениями [4–6].

1. X. Sauvage, G. Wilde, S.V. Divinski, et al., *Mater. Sci. Eng. A* 540 (2012) 1.
2. A. Deschamps, G. Fribourg, Y. Bréchet, et al., *Acta Mater.* 60 (2012) 1905.
3. X. Sauvage, A. Duchaussoy, G. Zaher, *Mater. Trans.* 60 (2019) 1151.
4. Y. Nasedkina, X. Sauvage, E.V. Bobruk, et al., *J. Alloys Compd.* 710 (2017) 736.
5. T.A. Latynina, A.M. Mavlyutov, M.Y. Murashkin, et al., *Philos. Mag.* 99 (2019) 2424.
6. W. Lefebvre, N.V. Skiba, F. Chabanais, et al., *J. Alloys Compd.* 862 (2021) 158455.