

## ДИНАМИЧЕСКИЙ ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ ПРИМЕСНЫХ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

**В.В. Малашенко<sup>1,2</sup>, Т.И. Малашенко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Донецкий физико-технический институт НАН Украины им. А.А. Галкина,  
Донецк, Украина, [malashenko@fti.dn.ua](mailto:malashenko@fti.dn.ua)

<sup>2</sup>Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина

Важная роль в решении проблемы создания перспективных функциональных нанокристаллических материалов, сочетающих высокую прочность с высокой пластичностью, принадлежит методу гидроэкструзии [1]. Довольно часто в нанокристаллах содержатся примеси, попавшие в них в процессе получения либо специально добавленные для повышения термостабильности исходного структурного состояния. Примесные добавки позволяют не только стабилизировать ультрамелкое зерно, но и сохранить высокий уровень предела текучести ультрамелкозернистых материалов [2]. При дальнейшем использовании эти заготовки могут быть подвергнуты высокоскоростному нагружению, в частности, при высокоскоростной обработке, ковке, формовке. При этом для многих металлов зависимость напряжения течения от скорости деформирования резко усиливается, что обусловлено их переходом в динамический режим преодоления барьеров, создаваемых структурными несовершенствами кристалла [3]. Присутствие примеси в этом случае может оказать влияние на величину динамического предела текучести. Хотя в ультрамелкозернистых материалах содержится обычно не более одной дислокации, тем не менее дислокационная плотность в процессе пластической деформации может быть довольно высокой:  $\rho \approx d^{-2}$ , где  $d$  – размер зерна. Так, для  $d = 1\mu\text{m}$  плотность дислокаций  $\rho = 10^{12}\text{m}^{-2}$ , а если  $d = 10\text{nm}$ , получим значение  $\rho = 10^{16}\text{m}^{-2}$ . Воспользовавшись подходом, развитым в работах [4-6], получим следующее выражение, описывающее вклад примесей в величину динамического предела текучести нанокристаллических материалов

$$\sigma_d = \frac{\pi n_0^{1/3} \mu^2 \chi^{2/3} b^2 \dot{\epsilon}}{3mc^3 R \rho} \quad (1)$$

где  $R$  – радиус примеси,  $\chi$  – параметр ее несоответствия,  $\mu$  – модуль сдвига,  $m$  – масса единицы длины дислокации,  $c$  – скорость распространения поперечных звуковых волн в кристалле,  $n_0$  – безразмерная концентрация примесей,  $\rho$  – средняя плотность дислокаций в материале,  $b$  – модуль вектора Бюргера дислокации,  $\dot{\epsilon}$  – скорость пластической деформации. Численные оценки для нанокристаллической меди ( $d=100\text{ nm}$ ,  $n_0 = 3 \cdot 10^{-3}$ ,  $\rho = 10^{11}\text{ m}^{-2}$ ,  $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^3\text{ s}^{-1}$ ) показали, что вклад примесей в предел текучести может составлять 10% и более.

1. V. Varyukhin, Y. Beygelzimer, R. Kulagin, O. Prokof'eva, A. Reshetov, *Materials Science Forum*, 667 (2011).
2. A.B. Lebedev, S.A. Pulnev, V.I. Kopylov, Yu.A. Burenkov, V.V. Vetrov, O.V. Vylegzhanin, *Scripta Mater.*, **35**, 1033 (1996).
3. В.С.Красников, А.Ю.Куксин, А.Е.Майер, А.В.Янилкин, *ФТТ*, **52**, 1295 (2010).
4. V.V. Malashenko, *Physica B: Phys. Cond. Mat.*, **404**, 3890 (2009).
5. В.В. Малашенко, *ФТТ*, **53**, 2204 (2011).
6. В.В. Малашенко, *ЖТФ*, 2011, **9**, 67 (2011).