

О МИНИМАЛЬНОМ РАЗМЕРЕ ЗЕРЕН В УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ И ГАМ-МЕТАЛЛАХ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

С.В. Бобылев^{1,2,3}, И.А. Овидько^{1,2,3*}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург 195251, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Россия

³Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург 199178, Россия

*e-mail: ovidko@gmail.com

Аннотация. Разработана теоретическая модель, в рамках которой определяются процессы, конкуренция между которыми задает минимальный размер зерен в ультрамелкозернистых материалах и Гам-металлах при интенсивном пластическом деформировании, а также проводится оценка характерных значений такого размера. Теоретическая оценка сделана на основании (а) имеющихся представлений, связывающих измельчение зерен в металлах при пластическом деформировании с эволюцией ансамблей решеточных дислокаций, и (б) экспериментальных данных, согласно которым рост зерен в ультрамелкозернистых металлах при интенсивном пластическом деформировании контролируется индуцируемой механическими напряжениями миграцией границ зерен. Полученные оценки хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

1. Введение

Среди классов перспективных материалов для структурных приложений особое место занимают ультрамелкозернистые (УМЗ) металлические материалы и Гам-металлы. Так, УМЗ материалы, характеризующиеся размерами зерен от 100 до 500 нм, демонстрируют высокую прочность и другие свойства, привлекательные для высоких технологий; см., например, [1–14]. Гам-металлы представляют собой класс особых титановых сплавов с необычной комбинацией механических свойств (высокая прочность, сверхупругость, высокая пластичность при низких температурах); см., например, [15–20]. При этом предварительная обработка посредством интенсивного пластического деформирования является необходимым условием для достижения высоких механических характеристик как для УМЗ металлов [1–3], так и для Гам-металлов [15–18]. Более того, УМЗ состояние в металлических материалах обычно формируется именно в результате обработки исходно крупнозернистых образцов интенсивной пластической обработкой [1–3].

Известно [21], что размер зерен металлических материалов, подвергаемых обработке методами интенсивной пластической деформации, не может быть получен сколь угодно малым, т.е. имеется некий предельный минимальный размер зерен (зависящий от материала), который можно получить данным методом. Физическая природа существования рассматриваемого предельного размера зерен есть предмет дискуссий [2,21] и представляет большой интерес как для фундаментальной науки о

неограниченно (в реальности до остановки на каком-либо препятствии). Там же [26] была получена оценка критического напряжения τ_c :

$$\tau_c \approx 0.8D\omega, \quad (1)$$

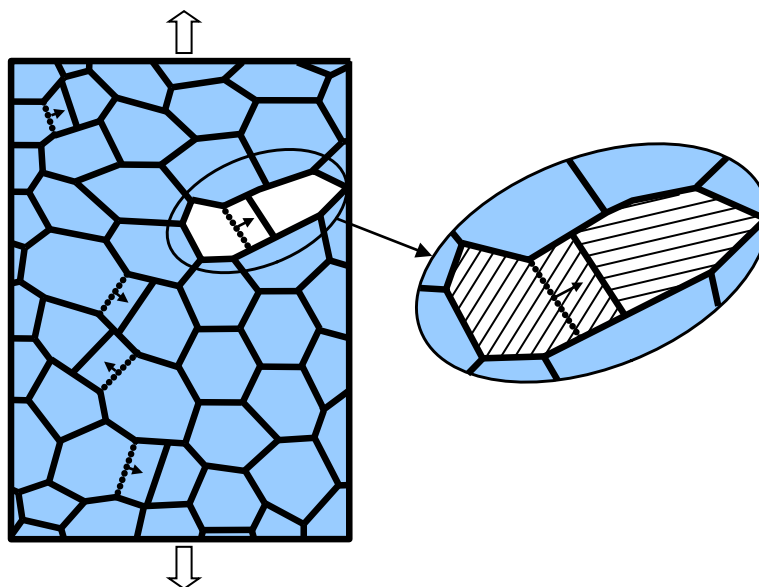


Рис. 1. Индуцируемая механическими напряжениями миграция границ зерен в наноструктурном материале (схематично).

где $D = G/[2\pi(1-\nu)]$, G – модуль сдвига, ν – коэффициент Пуассона, ω – угол разориентировки мигрирующей границы зерна. В предположении, что процесс роста зерен под механической нагрузкой контролируется индуцируемой напряжениями миграцией границ зерен (рис. 1), критическое напряжение (1) оказывается напряжением, при котором начинается заметный рост зерен.

Как было отмечено выше, минимально достижимый размер зерна в материале, подвергнутом интенсивной пластической деформации, контролируется равенством критического напряжения τ_c (формула (1)), при котором инициируется нестабильная миграция границ зерен (в рассматриваемом случае - малоугловых границ субзерен с углами разориентировки $\sim 1^\circ - 3^\circ$) и критического напряжения τ_{F-R} активации источников Франка-Рида. Т.е. искомый минимальный размер зерна (обозначим его d_s) можно извлечь из уравнения $\tau_c = \tau_{F-R}$. Согласно [2], критическое напряжение τ_{F-R} зависит от размера зерна d и может быть оценено с помощью следующей приближенной формулы:

$$\tau_{F-R} \approx 3Gb/d, \quad (2)$$

где b – вектор Бюргерса дислокаций. Тогда из (1), (2) и уравнения $\tau_c = \tau_{F-R}$ получаем:

$$d_s \approx \frac{15\pi(1-\nu)b}{2\omega}. \quad (3)$$

3. Оценки минимального размера зерен

Оценим минимальный размер зерна d_s на примере УМЗ меди, никеля, а также Гам-металлов. Учитывая, что типичная граница субзерна в начале его формирования в деформируемом металле имеет угол разориентировки $\sim 1^\circ - 3^\circ$ ($\omega \sim 0.017 - 0.051$),

- [6] R.K. Islamgaliev, V.D. Sitdikov, K.M. Nesterov, D.L. Pankratov // *Reviews on Advanced Materials Science* **39** (2014) 61.
- [7] B.N. Semenov, I.V. Smirnov, Yu.V. Sudenkov, N.V. Tatarinova // *Materials Physics and Mechanics* **24** (2015) 319.
- [8] V.D. Sitdikov, I.V. Alexandrov, M.M. Ganiev, E.I. Fakhretdinova, G.I. Raab // *Reviews on Advanced Materials Science* **41** (2015) 44.
- [9] E. Khafizova, R. Islamgaliev, G. Klevtsov, E. Merson // *Materials Physics and Mechanics* **24** (2015) 232.
- [10] A.E. Medvedev, M.Yu. Murashkin, N.A. Enikeev, I.A. Ovid'ko, R.Z. Valiev // *Materials Physics and Mechanics* **24** (2015) 297.
- [11] E.V. Bobruk, X. Sauvage, N.A. Enikeev, B.B. Straumal, R.Z. Valiev // *Reviews on Advanced Materials Science* **43** (2015) 45.
- [12] M.M. Abramova, N.A. Enikeev, X. Sauvage, A. Etienne, B. Radiguet, E. Ubyivovk, R.Z. Valiev // *Reviews on Advanced Materials Science* **43** (2015) 83.
- [13] P. Kumar, M. Kawasaki, T.G. Langdon // *Journal of Materials Science* **51** (2016) 7.
- [14] M. Kawasaki, T.G. Langdon // *Journal of Materials Science* **51** (2016) 19.
- [15] T. Saito, T. Furuta, J.-H. Hwang, S. Kuramoto, K. Nishino, N. Suzuki, R. Chen, A. Yamada, K. Ito, Y. Seno, T. Nonaka, H. Ikehata, N. Nagasako, C. Iwamoto, Y. Ikuhara, T. Sakuma // *Science* **300** (2003) 464.
- [16] S. Kuramoto, T. Furuta, J.-H. Hwang, K. Nishino, T. Saito // *Metallurgical and Materials Transactions A* **37** (2006) 657.
- [17] M.Yu. Gutkin, T. Ishizaki, S. Kuramoto, I.A. Ovid'ko // *Acta Materialia* **54** (2006) 2489.
- [18] M.Yu. Gutkin, T. Ishizaki, S. Kuramoto, I.A. Ovid'ko, N.V. Skiba // *International Journal of Plasticity* **24** (2008) 1333.
- [19] Y. Kamimura, S. Katakura, K. Edagawa, S. Takeuchi, S. Kuramoto, T. Furuta // *Materials Transactions* **57** (2016) 1526.
- [20] N. Nagasako, R. Asahi, D. Isheim, D.N. Seidman, S. Kuramoto, T. Furuta // *Acta Materialia* **105** (2016) 347.
- [21] R. Pippan, S. Scheriau, A. Taylor, M. Hafok, A. Hohenwarter, A. Bachmaier // *Annual Reviews of Materials Research* **40** (2010) 319.
- [22] V. Yamakov, D. Wolf, S.R. Phillpot, A.K. Mukherjee, H. Gleiter // *Nature Materials* **1** (2002) 45.
- [23] S.V. Bobylev, I.A. Ovid'ko // *Applied Physics Letters* **92** (2008) 081914.
- [24] S.V. Bobylev, N.F. Morozov, I.A. Ovid'ko // *Physical Review B* **84** (2011) 094103.
- [25] J.P. Hirth, J. Lothe, *Theory of Dislocations* (Mc Graw-Hill Publ. Co, New York, 1982).
- [26] M.Yu. Gutkin, I.A. Ovid'ko // *Applied Physics Letters* **87** (2005) 251916.
- [27] R. Niu, K. Han // *Scripta Materialia* **68** (2013) 960.
- [28] C.J. Smithells, E.A. Brands, *Metals reference book* (Butterworths, London, 1976).
- [29] F. Dalla Torre, R. Lapovok, J. Sandlin, P.F. Thomson, C.H.J. Davies, E.V. Pereloma // *Acta Materialia* **52** (2004) 4819.
- [30] H.W. Zhang, X. Huang, N. Hansen // *Acta Materialia* **56** (2008) 5451.
- [31] E. Schafler, R. Pippan // *Materials Science & Engineering: A* **387–389** (2004) 799.

ON MINIMUM GRAIN SIZE IN ULTRAFINE-GRAINED MATERIALS AND GUM-METALS PROCESSED BY SEVERE PLASTIC DEFORMATION

S.V. Bobylev^{1,2,3}, I.A. Ovid'ko^{1,2,3,*}

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251, Russia

²St. Petersburg State University, St. Petersburg, 198504, Russia

³Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199178, Russia

*e-mail: ovidko@gmail.com

Abstract. A theoretical model is suggested which identifies processes whose competition controls a minimum saturation grain size achievable in ultrafine-grained materials and Gum-metals (special titanium alloys) processed by severe plastic deformation. Within this model, typical values of the minimum grain size in various materials are estimated. The estimation is based on (i) the representations that grain refinement in deformed metals occurs through evolution of ensembles of lattice dislocations, and (ii) the experimentally established fact that grain growth in ultrafine-grained metals under severe plastic deformation is typically controlled by stress-induced migration of grain boundaries. Obtained estimates of minimum grain sizes are well consistent with corresponding experimental data.

Acknowledgements. *The work was supported, in part (for SVB), by the Ministry of Education and Science of Russian Federation (Zadanie 9.1964.2014/K) and, in part (for IAO), by St. Petersburg State University (grant 6.38.337.2015).*

References

- [1] R.Z. Valiev, T.G. Langdon // *Progress in Materials Science* **51** (2006) 881.
- [2] Y. Estrin, A. Vinogradov // *Acta Materialia* **61** (2013) 782.
- [3] R.Z. Valiev, A.P. Zhilyaev, T.G. Langdon, *Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications* (Wiley, Hoboken, New Jersey, 2014).
- [4] A.P. Zhilyaev, S.N. Sergeev, V.A. Popov, A.V. Orlov // *Reviews on Advanced Materials Science* **39** (2014) 15.
- [5] A.A. Samigullina, A.A. Nazarov, R.R. Mulyukov, Yu.V. Tsarenko, V.V. Rubanik // *Reviews on Advanced Materials Science* **39** (2014) 48.
- [6] R.K. Islamgaliev, V.D. Sitdikov, K.M. Nesterov, D.L. Pankratov // *Reviews on Advanced Materials Science* **39** (2014) 61.
- [7] B.N. Semenov, I.V. Smirnov, Yu.V. Sudenkov, N.V. Tatarinova // *Materials Physics and Mechanics* **24** (2015) 319.
- [8] V.D. Sitdikov, I.V. Alexandrov, M.M. Ganiev, E.I. Fakhretdinova, G.I. Raab // *Reviews on Advanced Materials Science* **41** (2015) 44.
- [9] E. Khafizova, R. Islamgaliev, G. Klevtsov, E. Merson // *Materials Physics and Mechanics* **24** (2015) 232.
- [10] A.E. Medvedev, M.Yu. Murashkin, N.A. Enikeev, I.A. Ovid'ko, R.Z. Valiev // *Materials Physics and Mechanics* **24** (2015) 297.

- [11] E.V. Bobruk, X. Sauvage, N.A. Enikeev, B.B. Straumal, R.Z. Valiev // *Reviews on Advanced Materials Science* **43** (2015) 45.
- [12] M.M. Abramova, N.A. Enikeev, X. Sauvage, A. Etienne, B. Radiguet, E. Ubyivovk, R.Z. Valiev // *Reviews on Advanced Materials Science* **43** (2015) 83.
- [13] P. Kumar, M. Kawasaki, T.G. Langdon // *Journal of Materials Science* **51** (2016) 7.
- [14] M. Kawasaki, T.G. Langdon // *Journal of Materials Science* **51** (2016) 19.
- [15] T. Saito, T. Furuta, J.-H. Hwang, S. Kuramoto, K. Nishino, N. Suzuki, R. Chen, A. Yamada, K. Ito, Y. Seno, T. Nonaka, H. Ikehata, N. Nagasako, C. Iwamoto, Y. Ikuhara, T. Sakuma // *Science* **300** (2003) 464.
- [16] S. Kuramoto, T. Furuta, J.-H. Hwang, K. Nishino, T. Saito // *Metallurgical and Materials Transactions A* **37** (2006) 657.
- [17] M.Yu. Gutkin, T. Ishizaki, S. Kuramoto, I.A. Ovid'ko // *Acta Materialia* **54** (2006) 2489.
- [18] M.Yu. Gutkin, T. Ishizaki, S. Kuramoto, I.A. Ovid'ko, N.V. Skiba // *International Journal of Plasticity* **24** (2008) 1333.
- [19] Y. Kamimura, S. Katakura, K. Edagawa, S. Takeuchi, S. Kuramoto, T. Furuta // *Materials Transactions* **57** (2016) 1526.
- [20] N. Nagasako, R. Asahi, D. Isheim, D.N. Seidman, S. Kuramoto, T. Furuta // *Acta Materialia* **105** (2016) 347.
- [21] R. Pippan, S. Scheriau, A. Taylor, M. Hafok, A. Hohenwarter, A. Bachmaier // *Annual Reviews of Materials Research* **40** (2010) 319.
- [22] V. Yamakov, D. Wolf, S.R. Phillpot, A.K. Mukherjee, H. Gleiter // *Nature Materials* **1** (2002) 45.
- [23] S.V. Bobylev, I.A. Ovid'ko // *Applied Physics Letters* **92** (2008) 081914.
- [24] S.V. Bobylev, N.F. Morozov, I.A. Ovid'ko // *Physical Review B* **84** (2011) 094103.
- [25] J.P. Hirth, J. Lothe, *Theory of Dislocations* (Mc Graw-Hill Publ. Co, New York, 1982).
- [26] M.Yu. Gutkin, I.A. Ovid'ko // *Applied Physics Letters* **87** (2005) 251916.
- [27] R. Niu, K. Han // *Scripta Materialia* **68** (2013) 960.
- [28] C.J. Smithells, E.A. Brands, *Metals reference book* (Butterworths, London, 1976).
- [29] F. Dalla Torre, R. Lapovok, J. Sandlin, P.F. Thomson, C.H.J. Davies, E.V. Pereloma // *Acta Materialia* **52** (2004) 4819.
- [30] H.W. Zhang, X. Huang, N. Hansen // *Acta Materialia* **56** (2008) 5451.
- [31] E. Schafler, R. Pippan // *Materials Science & Engineering: A* **387–389** (2004) 799.