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

формировании УМЗ состояния в металлах при интенсивном пластическом деформировании, так и для развития технологий такого деформирования. Основная цель настоящей работы – разработка теоретической модели, в рамках которой определяются процессы, задающие минимальный размер зерен в УМЗ материалах и Гам-металлах при интенсивном пластическом деформировании, и проводится оценка характерных значений такого размера.

2. Основные процессы, контролирующие измельчение зерна (наноструктурирование) в деформируемых металлических материалах

Измельчение зеренной структуры в исходно крупнозернистых металлах при пластическом деформировании обычно осуществляется в результате эволюции ансамблей решеточных дислокаций, образования малоугловых границ зерен из таких последующей трансформации малоугловых границ зерен лислокаций и в высокоугловые; см., например, [2]. (В деформируемых наноструктурных материалах измельчение зеренной структуры также эффективно реализуется посредством индуцированного напряжением расщепления границ зерен и последующей их миграции под действием напряжений; см., например, [22-24].) При этом процессом, который контролирует интенсивность образования малоугловых границ зерен (стенок дислокаций) и соответственно измельчения зерен, является зарождение решеточных дислокаций. В металлах решеточные дислокации, из которых формируется малоугловые границы зерен, обычно генерируются источниками типа Франка-Рида [25], что позволяет нам трактовать напряжение для активации таких источников как характеристическое напряжение для измельчения зеренной структуры при интенсивном пластическом деформировании.

Процесс, который является обратным для измельчения зеренной структуры металла, есть рост зерен. В металлах с УМЗ структурой, деформируемых при комнатной и низких температурах, в качестве доминирующего механизма для роста зерен экспериментально выявлена стимулируемая напряжением миграция границ зерен (рис. 1) [21]. При этом критическое напряжение для реализации такой миграции, фактически, играет роль характеристического напряжения для роста зерен при интенсивном пластическом деформировании.

Таким образом, основными процессами, которые контролируют измельчение зеренной структуры и рост зерен в металлах при интенсивном пластическом деформировании, являются, соответственно, зарождение решеточных дислокаций источниками Франка-Рида и стимулируемая напряжением миграция границ зерен. В данном контексте в рамках предлагаемой модели мы определяем, что насыщение размера зерен (достижение данным размером его минимального критического значения) в металлах, подвергаемых интенсивной пластической деформации, происходит. когда достигается динамический баланс рассматриваемых контролирующих процессов. Более точно, насыщение размера зерен происходит, когда малоугловые границы — стенки дислокаций, зарождающиеся на источниках Франка-Рида, — начинают мигрировать под действием приложенного механического напряжения.

В терминах характеристических напряжений динамический баланс измельчения и роста зерен в деформируемых металлах достигается когда критическое напряжение τ_{F-R} для активации источников Франка-Рида становится равным критическому напряжению τ_c для начала атермической миграции границ зерен.

В работе [26] была предложена теоретическая модель миграции границ зерен, где, среди прочего, было показано, что по достижении некоторого критического уровня напряжений τ_c миграция может становится нестабильной: границы зерен двигаются

О минимальном размере зерен в ультрамелкозернистых материалах...

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

$$\tau_c \approx 0.8 D\omega$$
,



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 ~1°-3°) 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:

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

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

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

3. Оценки минимального размера зерен

Оценим минимальный размер зерна d_s на примере УМЗ меди, никеля, а также Гамметаллов. Учитывая, что типичная граница субзерна в начале его формирования в деформируемом металле имеет угол разориентировки ~1°-3° (ω ~ 0.017 - 0.051),

(1)

получаем следующие оценки. В меди, характеризующейся значениями параметров G = 48 GPa, v = 0.34, $b \approx 0.26$ nm [27], мы находим: $d_s \sim 79 - 238$ nm (нижняя оценка соответствует бо́льшему углу разориентировки 3°, верхняя – меньшему 1°). Аналогично, в никеле, характеризующемся значениями G = 73 GPa, v = 0.31, $b \approx 0.25$ nm [28], получаем $d_s \sim 80 - 239$ nm. Полученные оценки хорошо согласуются с имеющими экспериментальными данными. Например, для меди, подвергнутой РКУ прессованию, минимальный размер зерна составляет $d_s \sim 200$ nm [29]. Для нанокристаллического никеля, полученного кручением под высоким давлением, типичные значения $d_s \sim 50 - 200$ nm [30,31].

Отдельный интерес представляет такая же оценка для Гам-металлов. Характерной особенностью этих сплавов является крайне низкое значение модуля сдвига в определенных кристаллографических плоскостях (в которых преимущественно и будут зарождаться решеточные дислокации). Однако, как видно из формулы (3), низкое значение модуля сдвига не влияет на минимальный размер зерна d_s . Характерные значения параметров для Гам-металлов приведены в работе [17]: $G \approx 9$ GPa, v = 0.3, $b \approx 0.29$ nm. Отсюда имеем: $d_s \sim 94-281$ nm. Как видно, для Гам-металлов оценка приблизительно такая же как и для обычных металлов.

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе мы дали оценку минимального размера зерна d_s , который можно получить методами интенсивной пластической деформации в ультрамелкозернистых металлических материалах и Гам-металлах. Оценка сделана на основании экспериментальных данных [21] о том, что рост зерен под действием механической нагрузки контролируется индуцируемой напряжениями миграцией границ зерен. В рамках предложенной модели искомый минимальный размер зерна определяется из баланса критических напряжений для нестабильной миграции границ зерен и активации дислокационных источников Франка-Рида. Численные оценки на примере меди ($d_s \sim 79-238$ nm) и никеля ($d_s \sim 80-239$ nm) показали, что наша теоретическая оценка хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными [29–31]. Для Гам-металлов наша модель предсказывает приблизительно такие же значения минимального размера зерна ($d_s \sim 94-281$ nm), что и для обычных УМЗ металлов.

Работа выполнена при поддержке (для С.В.Б.) Министерства образования и науки РФ (Задание № 9.1964.2014/К) и (для И.А.О.) Санкт-Петербургского государственного университета (грант 6.38.337.2015).

Литература

- [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.

О минимальном размере зерен в ультрамелкозернистых материалах...

- [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 Gummetals (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.

О минимальном размере зерен в ультрамелкозернистых материалах...

- [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.