

УДК 669.15

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ

Р. К. Исламгалиев¹, А. В. Ганеев², М. А. Никитина³, М. В. Карабаева⁴

¹rinatis@mail.ru, ²artur_ganeev@mail.ru, ³nik.marina.al@gmail.com, ⁴KARMA11@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 27.05.2016

Аннотация. Изучена возможность получения ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры в сталях мартенситного класса методами интенсивной пластической деформации (ИПД). Показана возможность получения целостных объемных заготовок с УМЗ структурой методами ИПД кручением и равноканальным угловым прессованием (РКУП). Исследованы особенности микроструктуры и фазового состава образцов с УМЗ структурой.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация; ультрамелкозернистая структура; мартенситные стали; прочность; пластичность.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что мартенситные коррозионно-стойкие стали широко используются во многих отраслях промышленности в качестве конструкционных материалов. Продление ресурса изделий из мартенситных сталей возможно с использованием новых научно-технических подходов, которые базируются на измельчении зеренной структуры методами интенсивной пластической деформации (ИПД). В частности, ранее было показано, что применение методов ИПД ведет к формированию ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры в различных сталях со средним размером зерен менее 1 мкм и преимущественно большеугловыми границами зерен [1, 2]. Такие УМЗ материалы представляют собой повышенный интерес благодаря их уникальным механическим свойствам: высокой прочности, усталости, а также низкотемпературной и высокоскоростной сверхпластичности [3–11].

Вместе с тем мартенситные стали являются труднодеформируемыми материалами в сравнении с алюминиевыми, магниевыми и медными сплавами, вследствие их сложной структуры, содержащей дисперсные частицы выделений и мартенситные рейки. Поэтому имеется ограниченное количество публикаций посвященных изучению структуры и свойств мартенситных сталей, подвергнутых ИПД [12, 13].

В настоящей работе рассмотрено влияние интенсивной пластической деформации на структуру и свойства мартенситной стали марки ЭИ-961Ш.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве исходного материала для исследований были использованы прутки диаметром 20 мм из стали ЭИ-961Ш (13X11H2B2MФ-Ш), химический состав которой приведен в табл. 1.

Исходный материал подвергали выдержке в аустенитной области при температуре 1050 °С в течение 1 часа с последующим охлаждением на воздухе и отпуском при температуре 800 °С, 1 ч.

Для формирования УМЗ структуры образцы диаметром 20 мм и толщиной 1 мм были подвергнуты интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) под давлением 6 ГПа, с количеством оборотов равным 10. Для оценки влияния температуры деформации на формируемую структуру, ИПДК проводили при температурах 20 °С и 300 °С.

Для проведения РКУП использовали оснастку с углом пересечения каналов 120 ° и диаметром канала 20 мм. РКУП было выполнено с понижением температуры от 600 °С до 500 °С с общим количеством проходов равным 6.

Таблица 1

Химический состав стали ЭИ-961Ш, ат.%, не более

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	W	V
0,1–0,16	до 0,6	до 0,6	1,5–1,8	до 0,03	до 0,03	10,5– 12	0,35– 0,5	1,6–2	0,18– 0,3

Структурные исследования проводили в просвечивающем электронном микроскопе JEOL JEM-2100. Тонкие фольги готовили на установке «Тепирол-5» методом струйной электролитической полировки. Структуру ИПДК образцов изучали на середине радиуса.

Микротвердость по методу Виккерса измеряли на установке Микромет 5101 вдоль диаметра ИПДК образцов под нагрузкой 100 г., используя время выдержки 10 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования структуры в просвечивающем электронном микроскопе показали, что

после обработки методом ИПДК в стали ЭИ-961Ш формируется УМЗ структура со средним размером зерна примерно 140 нм (рис. 1). Повышение температуры ИПДК обработки до 300°C привело к увеличению среднего размера зерна до 200 нм (рис. 2). После дополнительного отжига при температуре 450°C средний размер зерна существенно не изменился (рис. 3). Но при этом произошла релаксация внутренних напряжений и выделение дисперсных частиц упрочняющих фаз.

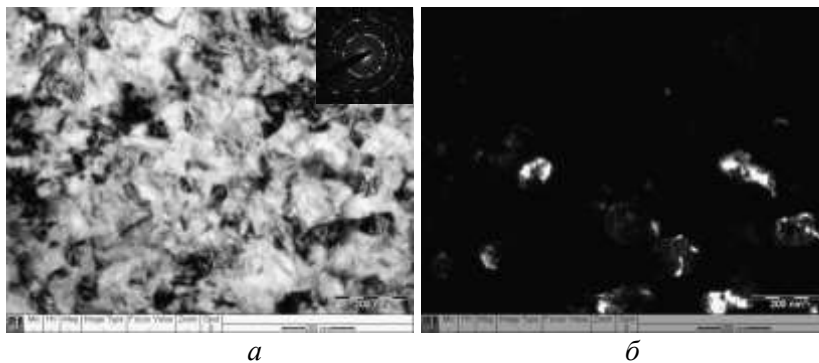


Рис. 1. Структура стали ЭИ-961Ш после ИПДК при температуре 20 °С:
а – светлопольное изображение; *б* – темнопольное изображение

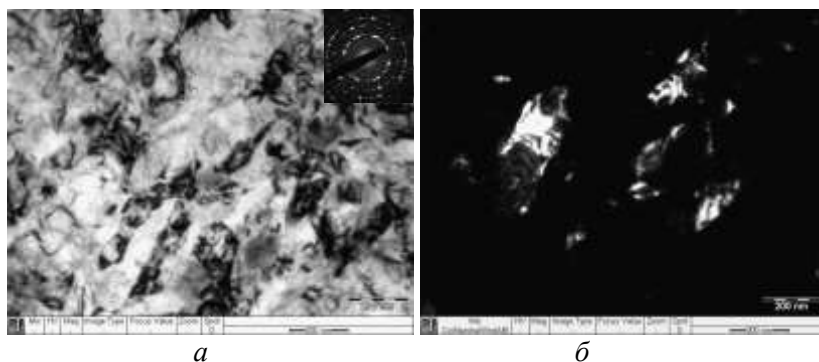


Рис. 2. Структура стали ЭИ-961Ш после ИПДК при температуре 300°C:
а – светлопольное изображение; *б* – темнопольное изображение

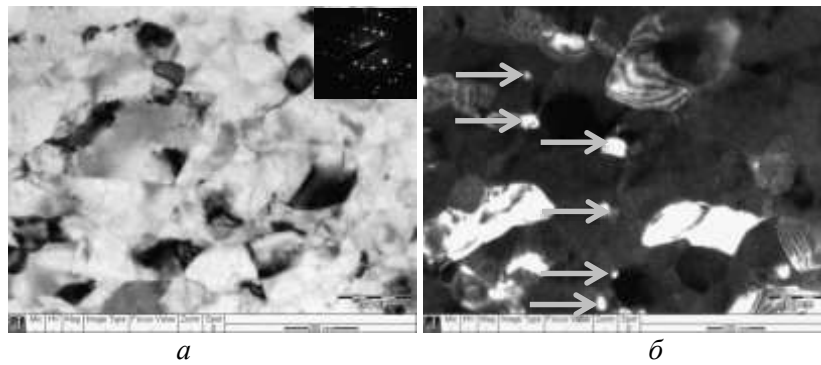


Рис. 3. Структура УМЗ образцов после ИПДК и дополнительного отжига при температуре 450°C:
а – светлопольное изображение ; б – темнопольное изображение

Применение ИПДК привело к значительному повышению микротвердости стали ЭИ-961Ш. При этом разность в микротвердости между образцами, подвергнутыми ИПДК при температурах 20 °С и 300 °С не превышала 50 МПа (8%). При дальнейшем нагреве стали ЭИ-961Ш до температур 450–500 °С наблюдался рост микротвердости в обоих состояниях (рис. 4), который можно объяснить выделением дисперсных частиц упрочняющих фаз. Снижение микротвердости при отжиге при температуре выше 600 °С очевидно связано с началом рекристаллизации и укрупнением выделенных дисперсных частиц. Из рис. 4 следует, что УМЗ структура, сформированная методом ИПДК, в стали ЭИ-961Ш стабильна до 600 °С.

Исходя из полученных выше результатов, РКУП проводили по следующей схеме 2 цикла 600 °С, 2 цикла 550 °С, 2 цикла 500 °С, что позволило получить целостные бездефектные заготовки.

Применение РКУП способствовало измельчению зеренной структуры до размера примерно 450 нм (рис. 5). При этом в структуре РКУП образцов были обнаружены дисперсные частицы упрочняющих фаз размером до 50 нм, которые выделились вследствие высоких температур РКУП обработки.

Изучение структуры методом рентгеноструктурного анализа показало, что ИПДК обработка приводит к увеличению параметра решетки и значительному уменьшению размеров ОКР.

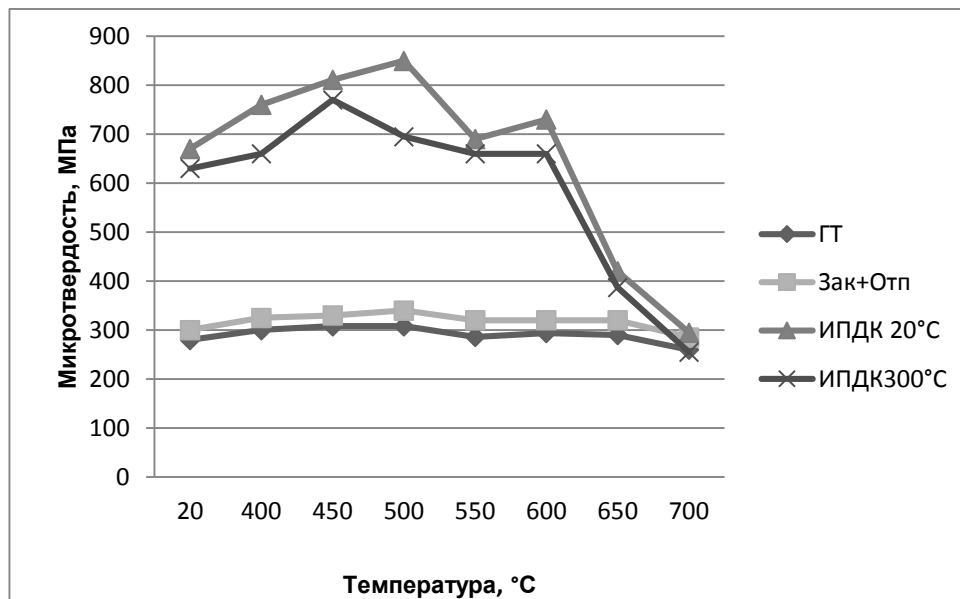
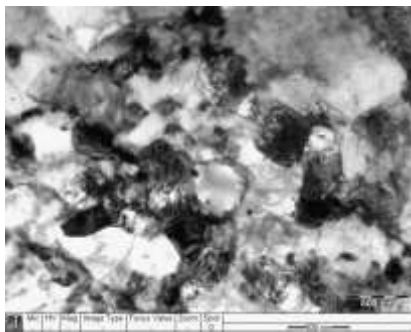


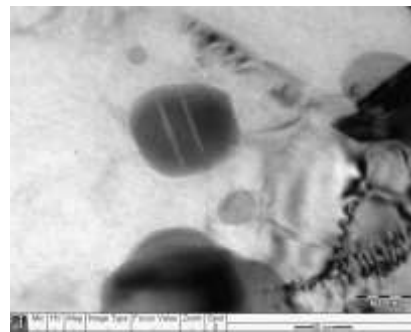
Рис. 4. Влияние температуры отжига на микротвердость ИПДК образцов мартенситной стали ЭИ961Ш

Рентгеноструктурный анализ

Состояние	Параметр решетки, А	Размер ОКР, нм	Микроискажения, %
Закалка 1050 °С+отпуск 800 °С	2.87818(3)	1499	0,039
ИПДК при 20 °С, 10 об, 6 ГПа	2.88043(5)	34,6	0,27
ИПДК при 300 °С, 10 об, 6 ГПа	2.88021(8)	39,7	0,32



а



б

Рис. 5. Структура УМЗ образцов подвергнутых РКУП:

а – светлопольное изображение; б – изображение дисперсных частиц

Механические испытания на растяжение стандартных образцов показали, что предел прочности РКУП образцов повысился с 1030 МПа до 1070 МПа с сохранением пластичности примерно 8%. Небольшое изменение прочностных свойств связано, очевидно, с применением РКУП обработки при повышенной температуре 600 °С, что привело к укрупнению дисперсных частиц упрочняющих фаз и, соответственно, к снижению роли дисперсионного упрочнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение методов ИПД позволило измельчить структуру стали ЭИ-961 до 150 нм в случае ИПДК, и до 500 нм при обработке РКУП. При этом данная структура остается стабильной во всем рабочем диапазоне до 600 °С. Механические испытания на растяжение стандартных образцов показали, что предел прочности РКУП образцов повысился с 1030 МПа до 1070 МПа с сохранением пластичности примерно 8%.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 15-19-00144.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Valiev R. Z., Islamgaliev R. K., Alexandrov I. V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation // Progress in Materials Science. V. 45 (2000) P. 103-189. [R.Z.Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov "Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation" in J. Progress in Materials Science. Vol. 45 pp. 103-189, 2000.]
2. Nanomaterials by severe plastic deformation. Proceedings of international conference NanoSPD6. Edited by L.S.Toth. JOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 63 (2014). ["Nanomaterials by severe plastic deformation". Proceedings of international conference NanoSPD6. Edited by L.S.Toth. JOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2014, Vol. 63]
3. Эфрос Н. Б., Пилугин В. П., Эфрос Б. М., Пацелов А. М., Чернышев Е. Г., Лоладзе Л. В. Влияние интенсивной пластической деформации под давлением на структуру, фазовый состав и прочностные свойства нержавеющей хромоникелевых сталей // ФТВД, 2004, Вып.14. № 3 С. 82-89. [N.B. Efros, V.P. Pilyugin, B.M. Efros, A.M. Patselov, E.G. Chernyshev, L.V. Loladze. "Effect of severe plastic deformation under pressure on structure, phase composition and mechanical properties of stainless chromium-nickel steels", (in Russian), FTVD, 2004, Vol. 14 no. 3 pp. 82-89]
4. Rybal'chenko O. V., Dobatkin S. V., Kaputkina, L. M., Raab G. I., Krasilnikov N. A. Strength of ultrafine-grained corrosion-resistant steels after severe plastic deformation // Mat. Sci. Eng. 2004. A387-389 P. 244-248. [O.V.Rybal'chenko, S.V.Dobatkin, L.M.Kaputkina, G.I.Raab, N.A.Krasilnikov. Strength of ultrafine-grained corrosion-resistant steels after

severe plastic deformation. *Mat. Sci. Eng.*, 2004, A387-389 pp.244 – 248,.]

5. **Добаткин С. В., Капуткина Л. М., Рыбальченко О. В., Комлев В. С.** Фазовые и структурные превращения в коррозионно-стойких сталях после сдвига под давлением и нагрева// *Металлы*. 2012. №5 С. 28-37. [S. V.Dobatkin, L. M. Kaputkina, O. V. Rybalchenko, V. S. Komlev. "Phase and structural transformations in KORRO-sion-resistant steels after the shift under pressure and heating", (in Russian) *Metals.*, 2012, Vol. 5 pp.28-37]

6. **Закирова А. А., Садикова Э. И.** Влияние температуры интенсивной пластической деформации на структуру и свойства коррозионностойкой стали //Письма о материалах. 2012. Т. 2. С. 235-239. [A. A. Zakirov, E. I. Sadikov " Effect of intensive plastic deformation temperature on the structure and properties of corrosion-resistant steel. (in Russian) *Letters of materials*", 2012, Vol. 2. pp. 235-239]

7. **Scheriau S., Zhang Z., Kleber S., Pippan R.** Deformation mechanisms of a modified 316L austenitic steel subjected to high pressure torsion// *Mat. Sci. Eng.*, 2011, A. Vol. 528 pp. 2776-2786,. [S. Scheriau, Z. Zhang, S. Kleber, R. Pippan "Deformation mechanisms of a modified 316L austenitic steel subjected to high pressure torsion", *Mat. Sci. Eng.*, 2011, A. Vol. 528 pp.2776-2786]

8. **Huang C. X., Gao Y. L., Yang G., Wu S. D., Li G. Y., Zhang S. F.** Bulk nanocrystalline stainless steel fabricated by equal channel angular pressing // *J. Mater. Res.* Vol. 21 pp. 1687–1692, 2006 [C.X.Huang, Y.L.Gao, G.Yang, S.D.Wu, G.Y.Li, S.F.Zhang. "Bulk nanocrystalline stainless steel fabricated by equal channel angular pressing", *J. Mater. Res.*, 2006, Vol.21 pp. 1687 – 1692.]

9. **Косицына И. И., Сагарадзе В. В.** Фазовые превращения и механические свойства нержавеющей стали в наноструктурном состоянии // *Известия РАН. Серия Физическая*. 2007. Т. 71. Вып. 2. С. 293-296. [I.I. Kositsyna, V. V. Sagaradze " Phase transformations and mechanical properties of stainless steel nano-structural state", (in Russian), *Izvestiya RAN. Physical series*, 2007, Vol.71, no.2 pp. 293-296.]

10. **Корзников А. В., Корзникова Г. Ф., Зарипова Р. Г., Закирова А. А.** Сверхпластичность сталей и сплавов на основе железа // *Письма о материалах*. 2012. Т. 2 С. 170-176,. [A. V. Korznikov G. F. Korznikova, R. G. Zaripov, A. A. Zakirov "The superplasticity of steel and iron-based alloys", (in Russian) *Letters of Materials*, 2012, Vol. 2 pp. 170-176]

11. **Tsuchiyama T., Nakamura Y., Hidaka H., Takaki S.** Effect of Initial Microstructure on Superplasticity in Ultrafine Grained 18Cr-9Ni //Stainless Steel. *Materials Transactions*. 2004. Vol. 45, 7 pp. 2259-2263,. [T.Tsuchiyama, Y.Nakamura, H.Hidaka, S.Takaki. "Effect of Initial Microstructure on Superplasticity in Ultrafine Grained 18Cr-9Ni Stainless Steel", in *Materials Transactions*, 2004, Vol.45, no.7 pp. 2259-2263]

12. **Fan Z. Q., Hao T., Zhao S. X., Luo G. N., Liu C. S., Fang Q. F.** The microstructure and mechanical properties of T91 steel processed by ECAP at room temperature// *Journal of Nuclear Materials*. 2013. Vol. 434 pp. 417–421, [Z. Q.Fan, T. Hao, S. X. Zhao, G. N. Luo, C. S. Liu, Q. F. Fang "The microstructure and mechanical properties of T91 steel processed by ECAP at room temperature", *Journal of Nuclear Materials*, 2013, Vol. 434 pp. 417–421]

13. **Yang G., Huang C. X., Wang C., Zhang L. Y., Hu C., Zhang Z. F., Wu S. D.** Enhancement of mechanical properties of heat-resistant martensitic steel processed by equal channel angular pressing // *Materials Science and Engineering A*, 2009, Vol. 515 pp. 199–206. [G. Yang, C. X. Huang, C. Wang, L. Y.

Zhang, C. Hu, Z. F. Zhang, S. D. Wu "Enhancement of mechanical properties of heat-resistant martensitic steel processed by equal channel angular pressing" *Materials Science and Engineering A*, 2009, Vol. 515 pp. 199–206]

ОБ АВТОРАХ

ИСЛАМГАЛИЕВ Ринат Кадыханович, проф. каф. НТ фак. АТС УГАТУ. Физик, препод. (БГУ, 1980). Д-р. физ.-мат. наук по специальности «Физика конденсированного состояния» (ИФМК, 1999). Иссл. ультрамелкозернистых материалов и их свойств, полученных методами интенсивной пластической деформацией.

ГАНЕЕВ Артур Вилевич, дипл. инженер (УГАТУ 2003) по специальности «Материаловедение в машиностроении». Инж. 1 кат. НИИ ФПМ. Область научн. интересов – иссл. структуры металлов и сплавов методами электронной микроскопии

НИКИТИНА Марина Александровна, дипл. инж. - технолог (УГАТУ 2005 г.) по спец. «Реновация средств и объектов материального производства», мл. научн. сотр. НИИ ФПМ. Иссл. в обл. ультрамелкозернистых сталей и сплавов на основе TiAl, полученных методами интенсивной пластической деформации.

КАРАБАЕВА Марина Владимировна, доц. каф. материаловедения и физ. металлов фак. АТС УГАТУ. Инж. – мех. по спец. «Машины и технология обработки металлов давлением» (УАИ, 1987 г.), к.т.н. (1997 г.), доц. Обл. научн. интересов – структура и механические свойства сталей и сплавов.

METADATA

Title: Structure and properties of ultrafine-grained martensitic steel.

Authors: R.K. Islamgaliev¹, A.V. Ganeev, M.A. Nikitina, M.V. Karavaeva

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (USATU), Russia.

Email: ¹saturn@mail.rb.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 20, no. 3 (73), pp. 19-24, 2016. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract. The possibility of producing an ultrafine-grained (UFG) structure in martensitic grade steels by severe plastic deformation (SPD) is investigated. The possibility of producing integral bulk billets with a UFG structure by high-pressure torsion and equal-channel angular pressing (ECAP) is demonstrated. The features of the microstructure and phase composition of samples having a UFG structure are studied.

Key words: severe plastic deformation; ultrafine-grained structure; martensitic steels; strength; ductility.

About the authors:

ISLAMGALIEV, Rinat K., Professor of the Department of Nanotechnology in the Faculty of Aircraft Technology Systems of Ufa State Aviation Technical University. Physicist, lecturer (Bashkir State University, 1980). Doctor's Degree in Physics and Mathematics in the specialty "Physics of Condensed Matter" (Institute of Physics of Molecules and Crystals, 1999). Research on ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation, and their properties.

e-mail: saturn@mail.rb.ru

GANEV, Artur V., Dipl. Engineer (USATU 2003), specialty "Materials Science in Mechanical Engineering." Engineer of the 1st category at IPAM USATU. Research interests – Study of the structure of metals and alloys by electron microscopy.

NIKITINA, Marina A., Dipl. Engineer (USATU 2005) in "Renovation of the means and facilities of material production", Junior Researcher at IPAM USATU. Research in the field of ultrafine-grained TiAl-based steels and alloys produced by severe plastic deformation.

KARAVAEVA, Marina V., Associate Professor at the Department of Materials Science and Metal Physics in the Faculty of Aircraft Technology Systems of USATU. Mechanical engineer in the specialty "Machines and the Technology of Metal Forming" (Ufa Aviation Institute, 1987), Ph.D. (Cand. Sci.) (1997), associate professor. Research interests - structure and mechanical properties of steels and alloys.