

# ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ МЕГАПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛИ 09Г2С\*

*С.П. ЯКОВЛЕВА, доктор техн. наук, профессор  
С.Н. МАХАРОВА, канд. техн. наук  
П.Г. МОРДОВСКОЙ, канд. техн. наук  
(Институт физико-технических проблем  
Севера СО РАН, г. Якутск)*

Поступила 1 ноября 2015  
Рецензирование 11 января 2016  
Принята к печати 11 февраля 2016

**Мордовской П.Г.** – 677891, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1,  
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН  
e-mail: mordov@yandex.ru

Проведено исследование влияния комбинированной мегапластической деформации методами равноканального углового прессования (РКУП) при 450 °С и всестороннейковки (ВК) с суммарной степенью деформации 60 % на структуру и механические свойства ферритно-перлитной стали 09Г2С. Показано, что комбинированная мегапластическая деформация обусловила получение ультрамелкозернистой структуры со средним размером зерен феррита 3,8 мкм, перлита 2,8 мкм с пластинчато-зернистой морфологией перлитных колоний со средней толщиной пластинок цементита и свободных карбидов менее первых десятков нанометров. Полученная структура обусловила повышение предела текучести по сравнению с исходной крупнозернистой структурой на 44 %, предела прочности – на 32 %. Наблюдается рост пластичности в 3,5 раза по сравнению со значением, полученным для стали в состоянии после РКУП. Результаты показывают возможность применения комбинированной обработки РКУП+ВК в качестве технологии изготовления заготовок сложной формы с повышенными прочностными свойствами и достаточным сохранением пластичности за счет создания ультрамелкозернистой структуры с наноразмерными карбидами.

**Ключевые слова:** сталь, равноканальное угловое прессование, всесторонняя ковка, наноструктурирование, структура, механические свойства.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-52-59

## Введение

Конструкционную прочность сталей определяют следующие структурные факторы: размер зерна и состояние границ зерен, дефектность структуры и напряженное состояние, морфология основных и вторичных фаз. Повышения прочности стали можно добиться способом применения различных термических, химических,

деформационных и комбинированных обработок. В последние десятилетия в связи с ростом стоимости легирующих элементов все больший интерес вызывают комбинированные термометалургические обработки, которые позволяют в низколегированных конструкционных сталях получать значения прочности, характерные для средне- и высоколегированных сталей. Существует ряд работ по исследованию комби-

\* Финансирование: Программа фундаментальных исследований Президиума РАН № 8, проект 8.22. «Формирование нано-, субмикронной структуры при объемных и поверхностных термосиловых воздействиях после мегапластической деформации как основа для разработки конструкционных сталей с высоким уровнем свойств и адаптивным поведением при эксплуатации» (№ гос. рег. 01201257844).

нированных технологий, включающих в себя наноструктурирование методом РКУП с последующим деформированием сжатием (ковка, штамповка) для пластичных материалов, таких как алюминиевые и магниевые сплавы [1–6]. В настоящей работе исследованы структура и механические свойства конструкционной стали 09Г2С после комбинированной мегапластической деформации, состоящей из равноканального углового прессования (РКУП) и всестороннейковки (ВК). Как известно, при реализации РКУП заготовка неоднократно продавливается в специальной оснастке через два канала с одинаковыми поперечными сечениями, пересекающимися под углом  $\Phi$  [7–10]. К недостаткам РКУП в качестве технологии получения высокопрочных материалов помимо снижения пластичности можно отнести ограничение заготовок по размерам и форме. Данный недостаток можно устранить последующей ВК, в процессе которой заготовка подвергается многократному повторению операций свободнойковки. Дополнительная обработка ВК открывает новые перспективы применения технологии РКУП, так как существенно расширяется номенклатура изделий, обладающих наносубмикронной структурой с уникальными свойствами, полученными после наноструктурирования [11–19].

Целью работы является исследование структуры и механических свойств стали 09Г2С, обработанной комбинированной мегапластической деформацией методами равноканального углового прессования и свободной всестороннейковки, что должно обеспечить получение заготовок сложной формы с повышенными прочностными свойствами.

### Материал и методы исследования

Исследования проведены на низколегированной конструкционной стали 09Г2С (Fe–1.34Mn–0.64Si–0.14Cr–0.09Ni–0.09C, мас. %). Форма заготовок цилиндрическая, диаметр 20 мм, длина 100 мм. РКУП проведено по маршруту «Вс» (поворот на  $90^\circ$  после каждого цикла прессования) на установке с углом пересечения каналов  $120^\circ$ , температура прессования  $450^\circ\text{C}$ , число циклов прессования – 4. Для снятия избыточных внутренних напряжений после мегапластической деформации провели отпуск при температуре

$350^\circ\text{C}$  в течение одного часа с последующим охлаждением в печи. Для дальнейшего формоизменения заготовки была проведена ВК, которую выполнили с помощью пневматического молота МА4128 до степеней обжатия 60 % при температуре началаковки  $1000^\circ\text{C}$  и концаковки  $800^\circ\text{C}$  с последующим охлаждением на воздухе.

Химический состав стали определен на спектрометре «FOUNDRY MASTER UVR WAS AG». Микроструктуру исследовали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) «JEOL-7800F» с ускоряющим напряжением 5,0 кВ. Количественный металлографический анализ выполнен на оптическом микроскопе «Neophot-32» методом секущих.

Для определения механических свойств материала в различных состояниях изготовлены образцы для испытаний на растяжение типа I по ГОСТ 1497–84. Испытания на растяжение проводились на универсальной электромеханической испытательной машине «ZWICK/ROELL Z600» при скорости деформирования 1 мм/мин и величине предельной нагрузки 1 т.

## Результаты и обсуждение

### Структура стали 09Г2С после комбинированной мегапластической деформации

Структура стали 09Г2С в исходном состоянии ферритно-перлитная (рис. 1, а), средний размер зерен феррита составляет 12,8 мкм, зерен перлита 10,5 мкм. Фазовый анализ показал  $\approx 75,0\%$  содержание зерен феррита и  $\approx 25,0\%$  перлитных областей. Перлитные колонии имеют пластинчатую структуру с толщиной пластинок цементита менее 1 мкм (рис. 1, б).

РКУП с четырьмя циклами прессования обуславливает измельчение зерен феррита до 6,1 мкм, зерен перлита до 6,5 мкм (рис. 1, в). При мегапластической деформации ферритно-перлитной стали формирование субструктуры, фрагментирование и разрушение цементита обладают сильным взаимным влиянием [11, 20]. Дислокации проникают в цементит и разрезают его на части. Углерод из цементита выносится перерезающими его дислокациями и равномерно распределяется по всему объему ультрамелкозернистой ферритной матрицы. Морфология перлитных колоний претерпевает существен-

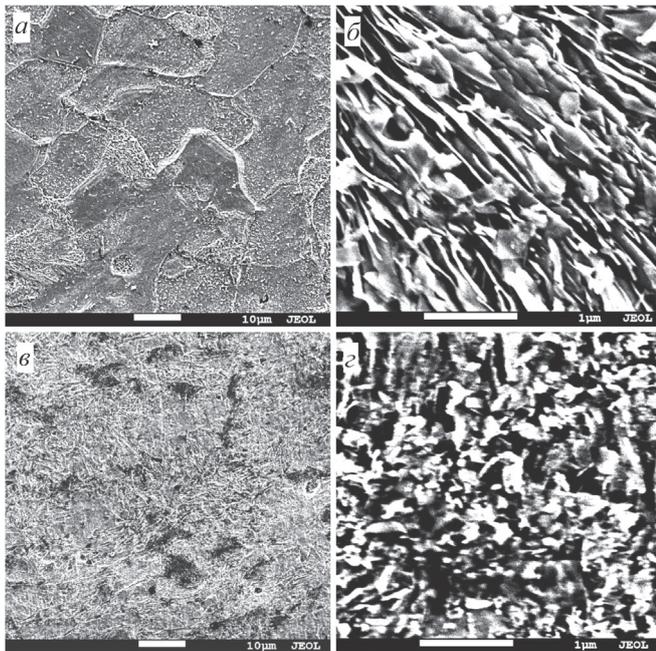


Рис. 1. Микроструктура и морфология перлита стали 09Г2С:

*a, б* – в исходном крупнозернистом состоянии;  
*в, з* – после РКУП

ные изменения, заключающиеся в утонении и дроблении цементитных пластинок, их сфероидизации и рассредоточении, т. е. происходит переход от пластинчатого перлита к зернистому. Толщина пластинок на участках с частично сохранившимся пластинчатым перлитом – первые сотни нанометров. Размерность других карбидных образований (в том числе сфероидизированного карбида) – также первые сотни нанометров и менее 100 нм (рис. 1, *з*).

После ВК стали с исходной крупнозернистой структурой происходит измельчение структурных элементов: средний размер зерен феррита составляет 6,7 мкм, перлита 5,5 мкм; объемная доля перлитных колоний снизилась до 18 % (рис. 2, *a*). Перлит крупнозернистой стали послековки сохраняет пластинчатость, но заметны дробление и переориентация цементитных пластинок (рис. 2, *б*). Пластины цементита имеют различную толщину по длине пластины и заостренные рваные концы, что является свидетельством высокой дефектности колоний перлита, морфология перлита преимущественно пластинчатая.

После РКУП и ВК получена УМЗ-структура со средним размером зерен феррита 3,8 мкм, перлита 2,8 мкм (рис. 2, *в*); перлитные колонии

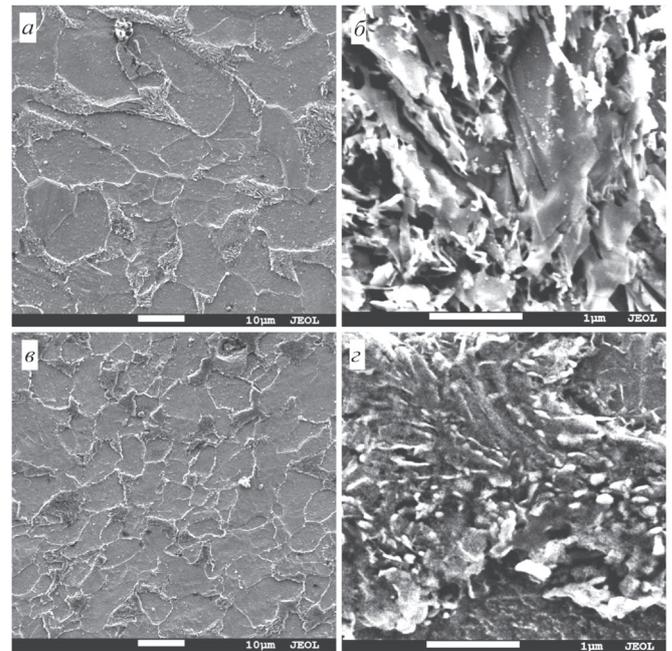


Рис. 2. Микроструктура и морфология перлита стали 09Г2С, подвергнутой ВК в исходном крупнозернистом состоянии (*a, б*) и после предварительного РКУП (*в, з*), СЭМ

растворились до объемной доли 15 %. Образовавшийся при воздействии деформационных нагрузок и высоких температур цементит внутри зерна перлита фрагментирован, имеет разнонаправленную ориентацию и более выраженную пластинчато-зернистую структуру, средняя толщина пластинок цементита и свободных карбидов менее первых десятков нанометров (рис. 2, *з*). Таким образом, в результате комбинированной обработки РКУП+ВК получена ультрамелкозернистая структура с наноразмерными частицами карбида.

### Механические свойства стали 09Г2С после комбинированной мегапластической деформации

В таблице представлены результаты механических испытаний образцов исследуемой стали в различных структурных состояниях, а также приведены усредненные параметры ферритных и перлитных зерен, причем в составе перлита содержатся пластинчатые частицы карбида наноразмерной толщины и сфероидные нанокарбида. Пределы текучести и прочности стали 09Г2С после РКУП увеличились более чем в два раза, т. е. сталь по этим характеристикам

**Параметры микроструктуры и механические характеристики стали 09Г2С  
в различных состояниях**

| Образцы   | $d_{\text{ср.феррита}}, \text{ мкм}$ | $d_{\text{ср.перлита}}, \text{ мкм}$ | Морфология перлита    | $\sigma_T, \text{ МПа}$ | $\sigma_B, \text{ МПа}$ | $\delta, \%$ |
|-----------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|
| Исходное  | 12,8                                 | 10,5                                 | Пластинчатая          | 350                     | 480                     | 32           |
| РКУП      | 6,1                                  | 6,5                                  | Зернистая             | 1005                    | 1010                    | 4,9          |
| ВК        | 6,7                                  | 5,5                                  | Пластинчатая          | 460                     | 565                     | 17           |
| РКУП и ВК | 3,8                                  | 2,8                                  | Пластинчато-зернистая | 503                     | 633                     | 17           |

приближается к высокопрочным, но увеличение прочности сопровождается многократным снижением относительного удлинения – более чем в шесть раз. Ковка УМЗ стали, полученной после РКУП, обусловила снижение значений пределов текучести и прочности стали на 50 и 47 % соответственно и повышение пластичности более чем в три раза. Тем не менее полученная прочность остается выше значений, чем в исходном крупнозернистом состоянии и после ВК.

Сопоставляя результаты исследования структуры и механических свойств, можно сделать заключение, что наибольшей прочностью и минимальной пластичностью обладает сталь после РКУП. Сталь послековки также показала повышение пределов текучести и прочности до 460 и 565 МПа и снижение пластичности до 17 %. Наиболее мелкозернистая структура с пластинчато-зернистой морфологией перлита, содержащего наноразмерные карбиды, полученная после комбинированной мегапластической деформации, обусловила достижение пределов текучести и прочности 503 и 633 МПа соответственно, а пластичности 17 %, что является наилучшим сочетанием прочностных и пластичных свойств стали 09Г2С, полученных после примененных видов обработки.

### Выводы

1. Применение обработки всесторонней ковкой со степенью обжатия 60 % при температуре началаковки 1000 °С позволило сохранить наноразмерные элементы структуры, полученные в стали 09Г2С после наноструктурирования методом РКУП. В результате комбинированной мегапластической деформации методами РКУП и ВК образовалась ультрамелкозернистая струк-

тура с пластинчато-зернистой морфологией перлитных колоний, в составе которых содержатся пластинки цементита с толщиной менее 100 нм и наноразмерные частицы сфероидизированного цементита.

2. Обработка ВК позволила провести формоизменение заготовки низколегированной стали с цилиндрической на брусок после упрочнения методом РКУП при существенном повышении прочностных свойств по сравнению с исходным крупнозернистым состоянием (предел текучести повысился на 44 %, предел прочности – на 32 %) и при многократном улучшении пластичности по сравнению с состоянием после РКУП (относительное удлинение увеличилось в 3,5 раза).

Таким образом, результаты исследований показывают возможность использования всестороннейковки в качестве технологии формоизменения заготовок, обеспечивающей определенный уровень сохранения структуры и свойств низколегированных сталей, полученных ими при объемном наноструктурировании методом РКУП.

### Список литературы

1. Isothermal upset forging of AA5083 after severe plastic deformation by ECAE / I. Puertas, C.J. Luis-Pérez, D. Salcedo, J. León, R. Luri, J.P. Fuertes // *Procedia CIRP*. – 2013. – Vol. 12. – P. 288–293. – doi: 10.1016/j.procir.2013.09.050.
2. Luis Pérez C.J., Salcedo Pérez D., Puertas Arbizu I. Design and mechanical property analysis of ultrafine grained gears from AA5083 previously processed by equal channel angular pressing and isothermal forging // *Materials & Design*. – 2014. – Vol. 63. – P. 126–135. – doi: 10.1016/j.matdes.2014.05.048.
3. Plastic forming of the equal-channel angular pressing processed 6061 aluminum alloy / W.J. Kim,

Y.K. Sa, H.K. Kim, U.S. Yoon // *Materials Science and Engineering: A*. – 2008. – Vol. 487, iss. 1/2. – P. 360–368. – doi: 10.1016/j.msea.2007.10.069.

4. Shi B.Q., Chen R.S., Ke W. Effects of forging processing on the texture and tensile properties of ECAEed AZ80 magnesium alloy // *Materials Science and Engineering: A*. – 2012. – Vol. 546. – P. 323–327. – doi: 10.1016/j.msea.2012.03.036.

5. Структура и свойства магниевое сплава Mg-0,3%Ca после мультиосевой деформации и равноканального углового прессования / С.В. Добаткин, Л.Л. Рохлин, Г.А. Салищев, В.И. Копылов, В.Н. Серебряный, Н.Д. Степанов, И.Е. Тарыгина, И.С. Курошев, Н.С. Мартыненко // *Металлы*. – 2014. – № 6. – С. 70–79.

6. Ефимова Ю.Ю., Концева Н.В., Никитенко О.А. Исследование состояния карбидной фазы после наноструктурирования и последующего волочения низкоуглеродистой стали // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. – 2009. – № 3. – С. 45–48.

7. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: Академкнига, 2007. – 398 с. – ISBN 978-5-946282-17-8.

8. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // *Acta Materialia*. – 2000. – Vol. 48, iss. 1. – P. 1–29. – doi: 10.1016/S1359-6454(99)00285-2.

9. Пластическая обработка металлов простым сдвигом / В.М. Сегал, В.И. Резников, А.С. Дробышевский, В.И. Копылов // *Известия АН СССР. Металлы*. – 1981. – № 1. – С. 115–123.

10. Valiev R.Z., Korznikov A.V., Mulyukov R.R. Structure and properties of ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation // *Materials Science and Engineering: A*. – 1993. – Vol. 168, iss. 2. – P. 141–148. – doi: 10.1016/0921-5093(93)90717-S.

11. Структура и свойства стали Ст3 после теплового равноканального углового прессования / С.В. Добаткин, Р.З. Валиев, Н.А. Красильников, Г.И. Рааб, В.Н. Коненкова // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2000. – № 9. – С. 31–35.

12. Влияние режимов равноканального углового прессования на механические и магнитные свойства стали 09Г2С / Э.С. Горкунов, С.М. Задворкин, Л.С. Горулева, Е.А. Туева, И.Н. Веселов, С.П. Яковлева, С.Н. Махарова, П.Г. Мордовской // *Дефектоскопия*. – 2012. – № 10. – С. 18–27.

13. Влияние режимов объемного наноструктурирования мегапластической деформацией на свойства конструкционной стали / С.П. Яковлева, С.Н. Махарова, П.Г. Мордовской, М.З. Борисова // *Перспективные материалы*. – 2011. – № 13. – С. 961–967.

14. Microstructural evolution in a commercial low carbon steel by equal channel angular pressing / D.H. Shin, B.C. Kim, Y.-S. Kim, K.-T. Park // *Acta Materialia*. – 2000. – Vol. 48, iss. 9. – P. 2247–2255. – doi: 10.1016/S1359-6454(00)00028-8.

15. Park K.-T., Shin D.H. Annealing behavior of sub-micrometer grained ferrite in a low carbon steel fabricated by severe plastic deformation // *Materials Science and Engineering: A*. – 2002. – Vol. 334, iss. 1/2. – P. 79–86. – doi: 10.1016/S0921-5093(01)01796-8.

16. Dynamic deformation behavior of ultrafine-grained low-carbon steels fabricated by equal-channel angular pressing / B.C. Hwang, H.S. Lee, Y.G. Kim, S. Lee, B.D. Ahn, D.H. Shin, C.G. Lee // *Metallurgical and materials transaction: A*. – 2005. – Vol. 36, iss. 2. – P. 389–397. – doi: 10.1007/s11661-005-0310-1.

17. Ultrafine grained dual phase steel fabricated by equal channel angular pressing and subsequent intercritical annealing / K.-T. Park, S.Y. Han, B.D. Ahn, D.H. Shin, Y.K. Lee, K.K. Um // *Scripta Materialia*. – 2004. – Vol. 51, iss. 9. – P. 909–913. – doi: 10.1016/j.scriptamat.2004.06.017.

18. Effect of hardening friction treatment with hard-alloy indenter on microstructure, mechanical properties, and deformation and fracture features of constructional steel under static and cyclic tension / A.V. Makarov, R.A. Savrai, N.A. Pozdejeva, S.V. Smirnov, D.I. Vichuzhanin, L.G. Korshunov, I.Yu. Malygina // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 205, iss. 3. – P. 841–852. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.08.025.

19. Structure, mechanical characteristics, and deformation and fractures of quenched structural steel under static and cyclic loading after combined strain-heat nanostructuring treatment / A.V. Makarov, R.A. Savrai, E.S. Gorkunov, A.S. Yurovskikh, I.Yu. Malygina, N.A. Davydova // *Physical Mesomechanics*. – 2015. – Vol. 18, iss. 1. – P. 43–57. – doi: 10.1134/S1029959915010063.

20. Целлермаер В.Я. Субструктурно-фазовые превращения при интенсивной пластической деформации металлов // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 1999. – № 12. – С. 44–49.

**ОБРАБОТКА METALLOV**

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1 (70), January – March 2016, Pages 52–59

**Structure and mechanical properties of the low-carbon steel after severe plastic deformation and forging**

**Yakovleva S.P.**, D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Material Science Department, e-mail: spyakovleva@yandex.ru

**Makharova S.N.**, Ph.D. (Engineering), Leading researcher, e-mail: snmachar@yandex.ru

**Mordovskoi P.G.**, Ph.D. (Engineering), Junior researcher, e-mail: mordov@yandex.ru

Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS, 1 Oktyabrskaya str., Yakutsk, 677891, Russian Federation

**Abstract**

The effect of the hot forming obtained by multi-directional forging on the structure and mechanical properties of the ferrite-pearlite dual phase steel 09Mg2Si after equal channel angular pressing (ECAP) is studied. Four passes of ECAP were conducted using a route of “Bc” (90-deg rotation after each pass) adjusted to 120° internal angle of channels, 450 °C pressing temperature. Subsequent multi-directional forging (MDF) was performed with accumulated strain of deformation of 60 and 80%. To remove the excess of internal stress after severe plastic deformation (SPD) billets were annealed at 350 °C for 1 hour with following furnace cooling. Thermo mechanical processing by MDF affects not only the shape and structure, but, respectively, the mechanical properties of the billets too, due to the processes of deformation and recrystallization of metal. After ECAP and MDF more fine-grained structure was expected to ensure the best strength characteristics, but there was decrease in values compared to steel, which was processed only by ECAP. Nevertheless its yield point after combined processing by SPD and forging exceeds the initial values by 40-80%, the ultimate tensile strength - by 32-45%. Subsequent MDF also resulted in increase of ductility of the ultrafine grained (UFG) steel 2–3 times in comparison with steel after ECAP. After ECAP and MDF with accumulated strain of deformation 80% ferrite and pearlite grains of the steel were significantly refined to 3.8 and 2,5 μm respectively, that is 2 times less than after ECAP. Research results show the applicability of combined treatment which consists of the ECAP and MDF as manufacturing technology of work pieces with shaped form with sufficient preservation of structural and mechanical conditions obtained after ECAP.

**Keywords:**

steel, equal-channel angular pressing, multi-directional forging, nanostructuring, structure, mechanical properties.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-52-59

**References**

1. Puertas I., Luis-Pérez C.J., Salcedo D., León J., Luri R., Fuertes J.P. Isothermal upset forging of AA5083 after severe plastic deformation by ECAE. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 12, pp. 288–293. doi: 10.1016/j.procir.2013.09.050
2. Luis Pérez C.J., Salcedo Pérez D., Puertas Arbizu I. Design and mechanical property analysis of ultrafine grained gears from AA5083 previously processed by equal channel angular pressing and isothermal forging. *Materials & Design*, 2014, vol. 63, pp. 126–135. doi: 10.1016/j.matdes.2014.05.048
3. Kim W.J., Sa Y.K., Kim H.K., Yoon U.S. Plastic forming of the equal-channel angular pressing processed 6061 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, vol. 487, iss. 1–2, pp. 360–368. doi: 10.1016/j.msea.2007.10.069
4. Shi B.Q., Chen R.S., Ke W. Effects of forging processing on the texture and tensile properties of ECAEed AZ80 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, vol. 546, pp. 323–327. doi: 10.1016/j.msea.2012.03.036
5. Dobatkin S.V., Rokhlin L.L., Salishchev G.A., Kopylov V.I., Serebryanyi V.N., Stepanov N.D., Tarytina I.E., Kuroshv I.S., Martynenko N.S. Struktura i svoistva magnievogo splava Mg-0,3%Ca posle mul'tiosevoi deformat-

sii i ravnokanal'nogo uglovogo pressovaniya [Structure and properties of an Mg-0.3% Ca magnesium alloy after multiaxial deformation and equal-channel angular pressing]. *Metally – Russian metallurgy (Metally)*, 2014, no. 6, pp. 70–79. (In Russian)

6. Efimova Yu.Yu., Koptseva N.V., Nikitenko O.A. Issledovanie sostoyaniya karbidnoi fazy posle nanostrukturirovaniya i posleduyushchego volocheniya nizkouglerodistoi stali [Research of a condition of the carbide phase after the nanostructuring and the subsequent drawing of low carbon steel]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova – Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2009, no. 3, pp. 45–48. (In Russian)

7. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. *Ob"emnye nanostrukturnye metallicheskie materialy: poluchenie, struktura i svoystva* [Bulk nanostructured metal materials: development, structure and properties]. Moscow, Akademkniga Publ., 2007. 398 p. ISBN 978-5-946282-17-8

8. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. *Acta Materialia*, 2000, vol. 48, iss. 1, pp. 1–29. doi: 10.1016/S1359-6454(99)00285-2

9. Segal V.M., Reznikov V.I., Drobyshevskii A.I., Kopylov V.I. Plasticheskaya obrabotka metallov prostym sdvigom [Plastic metal processing by simple shear]. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Metally – Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Metals*, 1981, no. 1, pp. 115–123.

10. Valiev R.Z., Korznikov A.V., Mulyukov R.R. Structure and properties of ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering: A*, 1993, vol. 168, iss. 2, pp. 141–148. doi: 10.1016/0921-5093(93)90717-S

11. Dobatkin S.V., Valiev R.Z., Krasil'nikov N.A., Raab G.I., Konenkova V.N. Struktura i svoystva stali St3 posle teplogo ravnokanal'nogo uglovogo pressovaniya [Structure and properties of steel St3 after hot equal-channel angular pressing]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment*, 2000, no. 9, pp. 31–35. (In Russian)

12. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Goruleva L.S., Tueva E.A., Veselov I.N., Yakovleva S.P., Makharova S.N., Mordovskoi P.G. The effect of equal channel angular pressing on the mechanical and magnetic properties of 09Г2С steel. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2012, vol. 48, iss. 10, pp. 568–575. doi: 10.1134/S1061830912100051. Translated from *Defektoskopiya*, 2012, no. 10, pp. 18–27.

13. Yakovleva S.P., Makharova S.N., Mordovskoi P.G., Borisova M.Z. Vliyanie rezhimov ob"emnogo nanostrukturirovaniya megaplasticheskoi deformatsiei na svoystva konstruktsionnoi stali [Influence of modes of bulk nanostructuring by megaplastic deformation on the properties of constructional steel]. *Perspektivnye materialy – Journal of Advanced Materials*, 2011, no. 13, pp. 961–967. (In Russian)

14. Shin D.H., Kim B.C., Kim Y.-S., Park K.-T. Microstructural evolution in a commercial low carbon steel by equal channel angular pressing. *Acta Materialia*, 2000, vol. 48, iss. 9, pp. 2247–2255. doi: 10.1016/S1359-6454(00)00028-8

15. Park K.-T., Shin D.H. Annealing behavior of submicrometer grained ferrite in a low carbon steel fabricated by severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering: A*, 2002, vol. 334, iss. 1–2, pp. 79–86. doi: 10.1016/S0921-5093(01)01796-8

16. Hwang B.C., Lee H.S., Kim Y.G., Lee S., Ahn B.D., Shin D.H., Lee C.G. Dynamic deformation behavior of ultrafine-grained low-carbon steels fabricated by equal-channel angular pressing. *Metallurgical and Materials Transaction: A*, 2005, vol. 36, iss. 2, pp. 389–397. doi: 10.1007/s11661-005-0310-1

17. Park K.-T., Han S.Y., Ahn B.D., Shin D.H., Lee Y.K., Um K.K. Ultrafine grained dual phase steel fabricated by equal channel angular pressing and subsequent intercritical annealing. *Scripta Materialia*, 2004, vol. 51, iss. 9, pp. 909–913. doi: 10.1016/j.scriptamat.2004.06.017

18. Makarov A.V., Savrai R.A., Pozdejeva N.A., Smirnov S.V., Vichuzhanin D.I., Korshunov L.G., Malygina I.Yu. Effect of hardening friction treatment with hard-alloy indenter on microstructure, mechanical properties, and deformation and fracture features of constructional steel under static and cyclic tension. *Surface and Coatings Technology*, 2010, vol. 205, iss. 3, pp. 841–852. doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.08.025

19. Makarov A.V., Savrai R.A., Gorkunov E.S., Yurovskikh A.S., Malygina I.Yu., Davydova N.A. Structure, mechanical characteristics, and deformation and fractures of quenched structural steel under static and cyclic loading after combined strain-heat nanostructuring treatment. *Physical Mesomechanics*, 2015, vol. 18, iss. 1, pp. 43–57. doi: 10.1134/S1029959915010063

20. Tsellermaer V.Ya. Substructural and phase transformations during intense plastic deformation of metals. *Steel in Translation*, 1999, vol. 29, no. 12, pp. 75–81. Translated from *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya*, 1999, no. 12, pp. 44–49.

**Funding**

Program of the fundamental research of the Presidium of RAS N8, the project 8.22. "The formation of nano-, submicron structures under the volume and surface thermal-effects influence after megaplastic deformation as the basis for the development of structural steels with a high level of properties and adaptive behavior during operation» (state registration number 01201257844).

**Article history:**

Received 1 November 2015

Revised 11 January 2016

Accepted 11 February 2016