

УДК 620.17  
DOI 10.17223/19988621/58/9

Е.Н. Москвичев, В.А. Скрипняк, В.В. Каракулов, Д.В. Лычагин

## ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ РИФЛЕНИИ ПРЕССОВАНИЕМ НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ МАГНИЕВОГО СПЛАВА Mg–Mn–Ce<sup>1</sup>

В представленной экспериментальной работе проведено исследование механических свойств и особенностей механического поведения магниевого сплава системы Mg–Mn–Ce, после обработки методом циклического прессования рифлением, при испытаниях на растяжение. Измельчение среднего размера зерна материала с 9 до 2.5 мкм привело к увеличению предела текучести на 30 %, а предела прочности – на 17 %. Изменения структуры также способствуют активации дополнительных систем скольжения, что способствует улучшению предельной деформации до разрушения.

**Ключевые слова:** магниевые сплавы, интенсивная пластическая деформация, циклическое рифление прессованием, микроструктура, механические свойства.

Магниевые сплавы широко используются в современной автомобильной и аэрокосмической отраслях промышленности за счет своих высоких удельных механических свойств. Особый интерес представляют деформируемые магневые сплавы системы Mg–Mn–Ce. Легирование церием позволяет повысить прочностные характеристики при повышенных температурах. В то же время содержание в магниевом сплаве марганца повышает коррозионную стойкость и обеспечивает хорошую пластичность.

В последнее время ведутся интенсивные исследования, нацеленные на улучшение комплекса механических свойств магниевых сплавов как за счет легирования и дисперсного упрочнения внедренными частицами, так и за счет измельчения размеров зерен, повышения однородности их распределения в объеме элементов конструкций [1, 2]. Методы интенсивной пластической деформации (ИПД) лежат в основе перспективных технологий получения проката магниевых сплавов с мелкозернистой и ультрамелкозернистой структурой [3–6].

В данной работе для измельчения структуры в магниевом сплаве Mg–Mn–Ce использован метод циклического рифления прессованием (ЦРП), относящийся к методам ИПД. Ранее данный метод применялся для повышения прочностных характеристик плоского листового проката алюминиевых сплавов, меди, низкоуглеродистых сталей, никеля, магния [7–9]. ЦРП позволяет за счет изменений структуры, улучшать прочностные и деформационные свойства листового проката различных размеров, ограниченных лишь производственными мощностями.

Целью данной работы было получение экспериментальных данных о влиянии изменений зеренной структуры магниевых сплавов Mg–Mn–Ce после циклического рифления прессованием на физико-механические свойства в квазистатических условиях нагружения.

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, направление III.23, при частичном финансовой поддержке РФФИ (проект №16-08-00037а) и гранта Президента Российской Федерации МК-2690.2017.8.

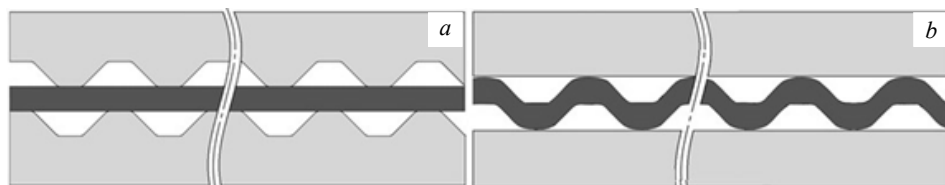
## Материал

Исследовались структурные изменения в результате ЦРП в деформируемом магниевом сплаве Mg–Mn–Ce со следующим составом: Mn 1.3 %, Ce 0.2 %, Mg – остальное, в соответствии с ГОСТ 14957-76. Образцы с размерами 120×20×2 мм для обработки ЦРП вырезались из листового проката в отожженном состоянии вдоль направления проката.

### Модификация структуры методом циклического рифления при прессовании

Для получения модифицированной зеренной структуры тонколистового проката магниевого сплава был использован метод циклического рифления прессованием, в процессе которого материал подвергается интенсивной сдвиговой деформации в условиях повышенного гидростатического давления.

ЦРП реализуется через обжатие плоского образца между двумя пресс-формами, выпрямление между двумя плоскими пресс-формами, сдвига образца на шаг рифления и повторное рифление с повторным выпрямлением. Принципиальная схема процесса представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Принципиальная схема циклического рифления прессованием: форма оснастки для рифления (а), форма оснастки для выпрямления (b)

**Fig. 1.** Basic scheme of a cyclic groove pressing: shape of the (a) grooving and (b) flattening equipment

Пластическая деформация происходит в основном в области сдвига, где эквивалентная деформация  $\varepsilon_{\text{eff}}$  достигает значения  $\sim 0.58$ . Соответственно, после одного прессования и одного выпрямления тонколистового образца общая деформация составляет  $\varepsilon_{\text{eff}} = \sim 1.16$ . Нагружение ранее недеформированных зон достигается за счет поворота образца на  $180^\circ$ . При многократном прессовании накопление пластической деформации в образце оценивается с помощью соотношения:  $\varepsilon_{\text{eff}} = \sim 1.16n$ , где  $n$  – число циклов прессования с рифлением.

ЦРП ранее применялась для обработки алюминиевого сплава 1560 [10]. В результате моделирования были получены оценки эволюции напряженно-деформированного состояния образцов, сил, действующих в элементах пресс формы во всем диапазоне деформирования [11]. Сконструированная по результатам моделирования пресс-форма была изготовлена и применялась для обработки магниевого сплава, исследованного в данной работе.

Циклическое прессование образцов магниевого сплава Mg–Mn–Ce выполнялось при температуре прессования  $(250 \pm 5)^\circ\text{C}$ , времени выдержки образца в прессформе – 3 мин, скорости прессования – 10 мм/мин, количестве циклов – 3. Для минимизации трения в качестве смазки поверхностей образца и прессформ использовалась высокотемпературная смазка на основе дисульфида молибдена.

### Микроструктурные изменения в результате циклического рифления при прессовании

Анализ структуры образцов в состоянии поставки и полученных после циклического рифления прессованием проводился методами оптической и электронной сканирующей микроскопии. Образцы для исследования зеренной структуры вырезались из образца электроэрозионным методом на установке DK7750 в направлении, нормальном плоскости заготовки. После механической шлифовки и полировки алмазными суспензиями с размерами частиц  $\sim 1$  мкм, поверхность была протравлена 3 %-м раствором азотной кислоты в спирте. Структура анализировалась с использованием оптической микроскопии, размер зерна был определен методом измерения длин хорд по ГОСТ 5639-82.

Исследования зеренной структуры методом дифракции отраженных электронов (ДОЭ) проводили на электронном микроскопе Tescan Vega II LMU.

Зеренная структура магниевого сплава Mg–Mn–Ce в исходном состоянии состояла из равноосных зерен с размерами, имеющими нормальное распределение в диапазоне 2–20 мкм, со средним размером зерна 9 мкм (см. рис. 2, *a, c, e*).

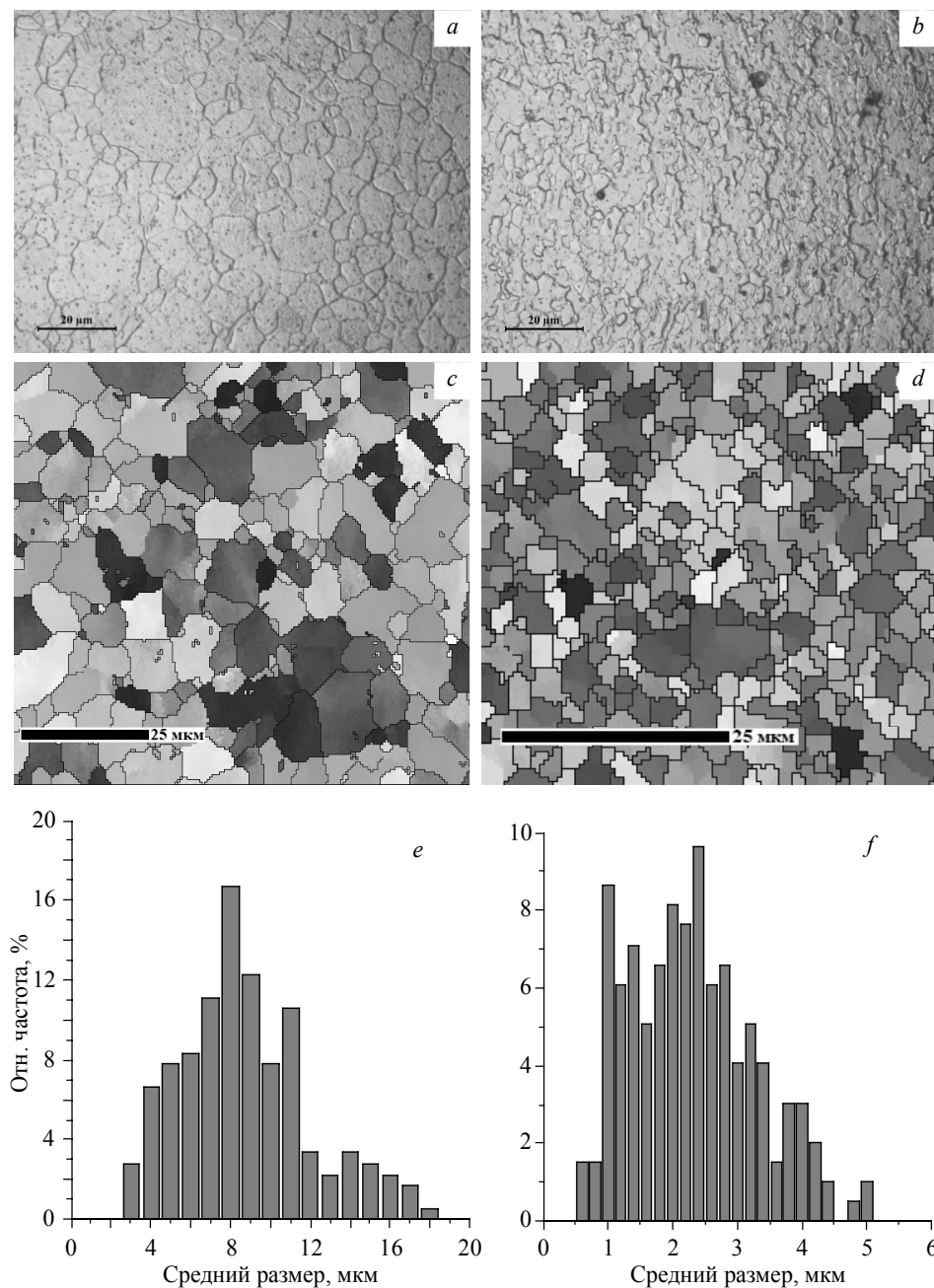
Анализ структуры обработанных образцов показал, что в ходе рифления прессованием исходная равноосная зеренная структура претерпевает изменения. Средний размер зерна уменьшается от 9 мкм до 2.2 мкм, зерна имеют размеры в диапазоне от 0.5 до 5 мкм (рис. 2, *b, d, f*).

Подобные закономерности изменения параметров зеренной структуры в результате ИПД, наблюдались в магниевом сплаве AZ31 (MA 2) при близких степенях деформации, был получен численно близкий эффект уменьшения размера зерна [12, 13]. Это обстоятельство указывает на существование общих закономерностей эволюции зеренной структуры в магниевых сплавах при интенсивной пластической деформации.

### Механическое поведение магниевого сплава после ЦРП

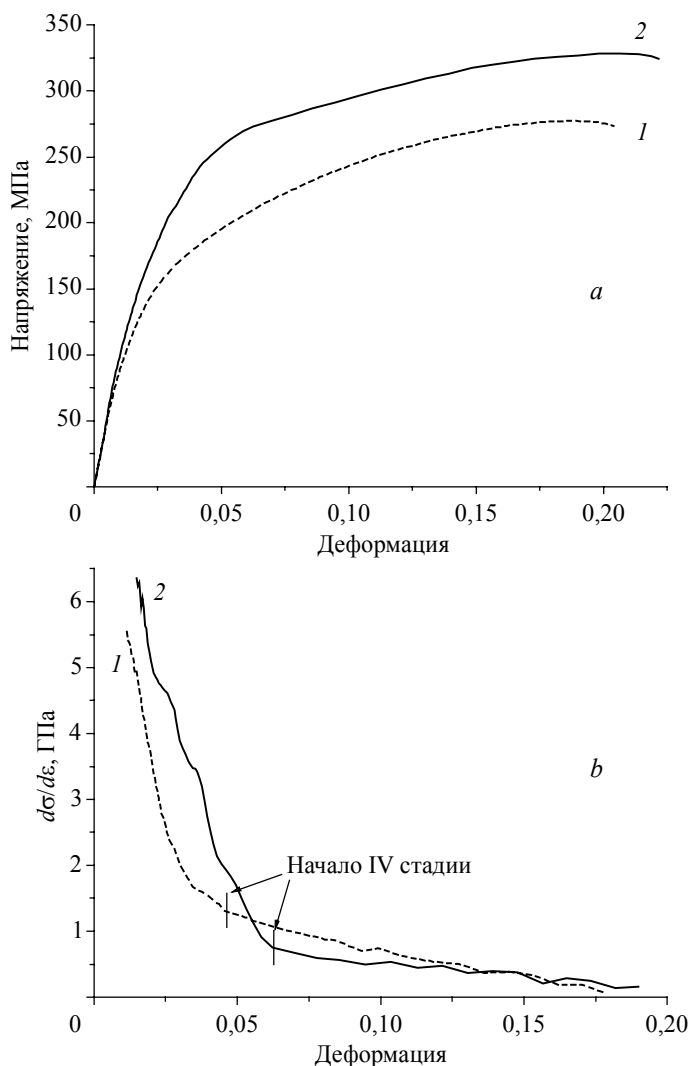
Для испытаний на растяжение из исходных заготовок электроэрозионным методом были вырезаны плоские образцы в виде лопаток, с размерами рабочей части  $9.45 \times 2 \times 1.1$  мм. Испытания на растяжение проводились на универсальной электромеханической испытательной машине Instron 5948 при скорости деформации  $10 \text{ с}^{-1}$  и комнатной температуре. Испытания проводились в соответствии с ISO 6892-1.

Уменьшение средних размеров зерна магниевого сплава сопровождается ростом сопротивления пластическому течению, изменением величины деформационного упрочнения и предельных характеристик. На рис. 3, *a* показаны экспериментальные диаграммы напряжение – деформация, полученные при растяжении образцов сплава в состоянии поставки (кривая 1) и после ЦРП (кривая 2). Результаты свидетельствуют о повышении напряжения течения для сплава после трех циклов ЦРП. Условный предел текучести сплава в состоянии поставки составил  $(105 \pm 5)$  МПа, предел кратковременной прочности –  $(273 \pm 10)$  МПа, предельная деформация до разрушения –  $\sim 17$  % (рис. 3, *a*). На рис. 3, *b* представлены зависимости коэффициента деформационного упрочнения  $d\sigma_s / d\varepsilon_{eq}^p$  как функции пластической деформации.



**Рис. 2.** Зеренная структура сплава Mg–Mn–Ce в состоянии поставки (*a, c, e*) и после трех циклов ЦРП (*b, d, f*): оптические снимки (*a, b*), анализ методом ДОЭ (*c, d*), гистограмма распределения зерен по размеру (*e, f*)

**Fig. 2.** Grained structure of Mg–Mn–Ce alloy at as-received state (*a, c, e*) and after three cycles of cyclic groove pressing (*b, d, f*): (*a, b*) optical micrographs, (*c, d*) EBSD analysis, and (*e, f*) distribution histogram according to a grain size



**Рис. 3.** Диаграммы истинное напряжение – истинная деформация (а): образец в состоянии поставки (кр. 1), образец после циклического рифления прессованием (кр. 2); зависимость коэффициента деформационного упрочнения от пластической деформации (б): образец в состоянии поставки (кр. 1); образец после трех циклов циклического рифления прессованием (кр. 2)

**Fig. 3.** True stress – true strain diagram for Mg–Mn–Ce alloy (а) at as-received state (curve 1) and after three cycles of cyclic groove pressing (curve 2); strain hardening coefficient as a function of the plastic strain of Mg–Mn–Ce alloy (б) at as-received state (curve 1) and after three cycles of cyclic groove pressing (curve 2)

Образцы из сплава Mg–Mn–Ce, подвергнутого циклическому рифлению прессованием, демонстрируют механическое поведение, отличное от поведения образцов в состоянии поставки. Произошло увеличение прочностных характери-

стик, так условный предел текучести возрос на  $\sim 30\%$  и составил  $(140 \pm 5)$  МПа, предел прочности увеличился на  $\sim 17\%$  и составил  $(320 \pm 10)$  МПа. Предельная деформация до разрушения составила  $\sim 19\%$ . Подобные изменения прочностных свойств при испытаниях на растяжение в целом характерны для магниевых сплавов при модификации их микроструктуры различными методами ИПД [14–17]. Изменения значений предельной деформации до разрушения магниевых сплавов при уменьшении среднего размера зерна могут быть обусловлены активацией новых дополнительных систем скольжения в зернах с микронными размерами, подобный эффект наблюдался в различных магниевых сплавах при измельчении зеренной структуры [18–21]. Измельчение зеренной структуры в магниевых сплавах также существенно уменьшает анизотропию их механических свойств.

Для дальнейшего анализа деформационного поведения обратимся к рис. 3, *b*, как видно из представленных графиков, при модификации зеренной структуры изменяется также и коэффициент деформационного упрочнения (КДУ). На протяжении почти всей третьей стадии (стадии параболического упрочнения) значение КДУ образца из обработанного материала выше, чем у образца из материала в состоянии поставки. Также стоит отметить уменьшение переходной зоны при переходе на четвертую стадию, что обусловлено более быстрым переходом от базисного скольжения к призматическому за счет уменьшения размера зерна. Уровень деформационного упрочнения и механизм переориентации внутри зерна, а также механизмы его измельчения при умеренных температурах деформации объясняются формированием в образце дислокационной субструктуры, в частности они определяют упрочнение при больших пластических деформациях (стадии III и IV кривых деформации), соответствующих обработке ЦПР [22–24].

Микротвердость образцов в исходном состоянии и после рифления прессованием была измерена на полуавтоматическом микротвердомере Duramin 5 производства Struers при нагрузке 2.0 Н и времени выдержки под нагрузкой 12 с. Значение микротвердости сплава Mg–Mn–Ce после обработки методом ЦПР имеет тенденцию к увеличению. В состоянии поставки микротвердость сплава Mg–Mn–Ce составляла 0.48 ГПа, а после трех циклов ЦРП на 12.5 % выше (0.54 ГПа).

### Заключение

Интенсивная пластическая деформация материала до степени 3.5 приводит к измельчению зерна и формированию в материале структуры с распределением размеров зерен в диапазоне от 0.5 до 5 мкм. Проведенное исследование влияния модификации зеренной структуры листового проката магниевых сплавов Mg–Mn–Ce, на особенности механического поведения при растяжении и микротвердость показало, что структурные изменения, достигнутые после трех циклов ЦРП приводят к улучшению механических свойств материала, предел упругости и временное сопротивление разрушению возрастают на 30 и 17 % соответственно, при испытаниях на осевое растяжение в квазистатических условиях со скоростью деформации  $10 \text{ с}^{-1}$ . За счет уменьшения среднего размера зерна также улучшается склонность материала к активации дополнительных систем скольжения, что, в свою очередь, способствует достижению больших степеней деформации по сравнению с крупнокристаллическим материалом. Полученные данные о механическом поведении сплава Mg–1.3Mn–0.2Ce после обработки ЦПР согласуются с экспериментальными данными о механическом поведении мелкозернистых ГПУ сплавов, полученных другими методами ИПД.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хрусталёв А.П., Ворожцов С.А., Жуков И.А., Промахов В.В., Даммер В.Х., Ворожцов А.Б. Структура и механические свойства композиционных материалов на основе магния, упрочненных наночастицами нитрида алюминия // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59. № 12. С. 176–178.
2. Vorozhtsov S., Khrustalyov A., Khmeleva M., & Zhukov I. Structure and deformation characteristics in magnesium alloy ZK51A reinforced with AlN nanoparticles // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1772. P. 030004. DOI:10.1063/1.4964542.
3. Valiev R.Z. and Langdon T.G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement // Progress in Materials Science. 2006. V. 51(7). P. 881–981. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2006.02.003.
4. Furukawa M., Horita Z., Nemoto M. & Langdon, T.G. The use of severe plastic deformation for microstructural control // Materials Science and Engineering A. 2002. V. 324(1–2). P. 82–89. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01288-6.
5. Valiev R.Z., Alexandrov I.V., Zhu Y.T. & Lowe T.C. Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation // J. Materials Research. 2002. V. 17(1). P. 5–8. DOI: 10.1557/JMR.2002.0002.
6. Krasnoveikin V.A., Kozulin A.A. & Skripnyak V.A. Detection of structural changes and mechanical properties of light alloys after severe plastic deformation // J. Physics: Conference Series. 2017. V. 919. P. 012012. DOI: 10.1088/1742-6596/919/1/012012.
7. Jandaghi M.R. & Pouraliakbar H. Study on the effect of post-annealing on the microstructural evolutions and mechanical properties of rolled CGPed Aluminum-Manganese-Silicon alloy // Materials Science and Engineering A. 2017. V. 679. P. 493–503. DOI: 10.1016/j.msea.2016.10.054.
8. Fong K.S., Danno A., Tan M.J. & Chua B.W. Tensile flow behavior of AZ31 magnesium alloy processed by severe plastic deformation and post-annealing at moderately high temperatures // J. Materials Processing Technology. 2017. V. 246. P. 235–244. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.03.025.
9. Gupta A.K., Maddukuri T.S. & Singh S.K. Constrained groove pressing for sheet metal processing // Progress in Materials Science. 2016. V. 84. P. 403–462. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.09.008.
10. Moskvichev E.N., Skripnyak V.A., Skripnyak V.V., Kozulin A.A. & Lychagin D.V. Influence of structure to plastic deformation resistance of aluminium alloy 1560 after groove pressing treatment // Letters on Materials. 2016. V. 6(2). P. 141–145. DOI: 10.22226/2410-3535-2016-2-141-145.
11. Moskvichev E., Kozulin A., Krasnoveikin V. & Skripnyak V. Numerical simulation of deformation behavior of aluminum alloy sheets under processing by groove pressing method // MATEC Web of Conferences. V. 143. P. 01011. DOI: 10.1051/mateconf/201814301011.
12. Wang Q., Song J., Jiang B., Tang A., Chai Y., Yang T., Huang G. & Pan F. An investigation on microstructure, texture and formability of AZ31 sheet processed by asymmetric porthole die extrusion // Materials Science and Engineering A. 2018. V. 720. P. 85–97. DOI: 10.1016/j.msea.2018.02.055.
13. Han T., Huang G., Deng Q., Wang G., Jiang B., Tang A., Zhu Y. & Pan F. Grain refining and mechanical properties of AZ31 alloy processed by accumulated extrusion bonding // J. Alloys and Compounds. 2018. V. 745. P. 599–608. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.02.248.
14. Козулин А.А., Скрипняк В.А., Красновейкин В.А., Скрипняк В.В., Каравацкий А.К. Исследование физико-механических свойств ультрамелкозернистых магниевых сплавов после интенсивной пластической деформации // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 9. С. 98–104.
15. Yang Q., Jiang B., Jiang W., Luo S. & Pan F. Evolution of microstructure and mechanical properties of Mg–Mn–Ce alloys under hot extrusion // Materials Science and Engineering A. 2015. V. 628. P. 143–148. DOI: 10.1016/j.msea.2015.01.048.

16. Huo Q., Xiao Z., Yang X., Ando D., Sutou Y. & Koike J. Enhanced fatigue properties of cast AZ80 Mg alloy processed by cyclic torsion and low-temperature annealing // *Materials Science and Engineering A*. 2017. V. 696. P. 52–59. DOI: 10.1016/j.msea.2017.04.061.
17. Yang Q., Jiang B., Li X., Dong H., Liu W. & Pan F. Microstructure and mechanical behavior of the Mg–Mn–Ce magnesium alloy sheets // *J. Magnesium and Alloys*. 2014. V. 2(1). P. 8–12. DOI: 10.1016/j.jma.2014.01.009.
18. Cáceres C.H. & Blake A.H. On the strain hardening behaviour of magnesium at room temperature // *Materials Science and Engineering A*. 2007. V. 462(1–2). P. 193–196. DOI: 10.1016/j.msea.2005.12.113.
19. Chen L., Yuan F., Jiang P., Xie J. & Wu X. Mechanical properties and deformation mechanism of Mg–Al–Zn alloy with gradient microstructure in grain size and orientation // *Materials Science and Engineering A*. 2017. V. 694. P. 98–109. DOI: 10.1016/j.msea.2017.04.005.
20. Koike J., Kobayashi T., Mukai T., Watanabe H., Suzuki M., Maruyama K. & Higashi K. The activity of non-basal slip systems and dynamic recovery at room temperature in fine-grained AZ31B magnesium alloys // *Acta Materialia*. 2003. V. 51(7). P. 2055–2065. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00005-3.
21. Ang H.Q., Abbott T.B., Zhu S. & Easton M.A. Anelasticity of die-cast magnesium-aluminium based alloys under different strain rates // *Materials Science and Engineering A*. 2017. V. 707. P. 101–109. DOI: 10.1016/j.msea.2017.09.012.
22. Koneva N.A., Lychagin D.V., Trishkina L.I., Kozlov E.V. Types of dislocation sub-structures and stages of stress-strain curves of FCC alloys // *Strength of metals and alloys. Proc. of VII International conference*. V. 1. NY: Pergamon Press, 1985. P. 21–26. DOI: 10.1016/b978-0-08-031642-0.50011-8.
23. Kozlov E.V., Koneva N.A., Lychagin D.V., Trishkina L.I. Role of internal stress fields at various stages of strain hardening // *Physics of Metals and Metallography*. 2000. V. 90(1). P. S59–S67.
24. Koneva N.A., Lychagin D.V., Teplyakova L.A., Kozlov E.V., Parameters of dislocation structures and factors determining flow stress at stages III and IV // *Strength of metals and alloys. Proc. of VIII International conference*. V. 1. New York: Pergamon Press, 1988. P. 385–390. DOI: 10.1016/b978-0-08-034804-9.50057-7.

Статья поступила 28.09.18 г.

Moskvichev E.N., Skripnyak V.A., Karakulov V.V., Lychagin D.V. (2019) IMPACT OF THE MICROSTRUCTURE CHANGES UNDER CYCLIC GROOVE PRESSING ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF MG–MN–CE MAGNESIUM ALLOY. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 58. pp. 109–118

DOI 10.17223/19988621/58/9

In this study, the mechanical behavior of Mg–Mn–Ce magnesium alloy was investigated experimentally. The material tested had two structural states: coarse-crystalline (commercial rolled sheet) and microstructured state. The method of cyclic groove pressing (CGP), which allows processing of flat samples, is used to grind the material grain structure. The paper presents a description of the CGP and the results of investigation of the material microstructure at as-received state and after three processing cycles. The tensile tests were carried out under quasi-static conditions. Analysis of the grained structure performed using the electron and optical microscopy methods showed that the material treatment up to the deformation degree of 3.5 by CGP method made it possible to obtain the blanks with a fined structure whose grain size distribution was in the range of 0.5–5  $\mu\text{m}$  with average grain size of 2.2  $\mu\text{m}$ . The uniaxial tensile tests were carried out at a strain rate of  $10\text{s}^{-1}$  at room temperature in order to assess the influence of structural modifications on the mechanical behavior. It was shown that the mechanical characteristics of material improved, and the yield stress and tensile strength increased by 30% and 17%, respectively. The grain structure changes were found to contribute to the activation of additional slip systems in the HCP lattice which enhanced the ultimate deformation to failure.



**Financial support.** The research was performed in the framework of the Program of Fundamental Research of the State Academies of Sciences for 2013–2020, line of research III.23, and partially supported by the Grant of the President of the Russian Federation (MK 2690.2017.8) and by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 16-08-00037a).

**Keywords:** magnesium alloys, severe plastic deformation, cyclic groove pressing, microstructure, mechanical properties.

*MOSKVICHEV Evgeny Nikolaevich* (Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: em\_tsu@mail.ru

*SKRIPNYAK Vladimir Al'bertovich* (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: skrp2006@yandex.ru

*LYCHAGIN Dmitry Vasil'evich* (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: dvl-tomsk@mail.ru

*KARAKULOV Valeriy Vladimirovich* (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation).

#### REFERENCES

1. Khrustalyov A.P., Vorozhtsov S.A., Zhukov I.A., Promakhov V.V., Dammer V.K., Vorozhtsov A.B. (2017) Structure and Mechanical Properties of Magnesium-Based Composites Reinforced with Nitride Aluminum Nanoparticles. *Russian Physics Journal*. 59(12). pp. 2183–2185. DOI: 10.1007/s11182-017-1034-6.
2. Vorozhtsov S., Khrustalyov A., Khmeleva M., Zhukov I. (2016) Structure and deformation characteristics in magnesium alloy ZK51A reinforced with AlN nanoparticles. *AIP Conference Proceedings*. 1772. 030004-1–030004-6. DOI:10.1063/1.4964542.
3. Valiev R.Z., Langdon T.G. (2006) Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progress in Materials Science*. 51(7). pp. 881–981. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2006.02.003.
4. Furukawa M., Horita Z., Nemoto M., Langdon T.G. (2002) The use of severe plastic deformation for microstructural control. *Materials Science and Engineering A*. 324(1-2). pp. 82–89. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01288-6.
5. Valiev R.Z., Alexandrov I.V., Zhu Y.T., Lowe T.C. (2002) Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation. *Journal of Materials Research*. 17(1). pp. 5–8. DOI: 10.1557/JMR.2002.0002.
6. Krasnoveikin V.A., Kozulin A.A., Skripnyak V.A. (2017) Detection of structural changes and mechanical properties of light alloys after severe plastic deformation. *Journal of Physics: Conference Series*. 919. pp. 012012. DOI: 10.1088/1742-6596/919/1/012012.
7. Jandaghi M.R., Pouraliakbar H. (2017) Study on the effect of post-annealing on the microstructural evolutions and mechanical properties of rolled CGPed Aluminum-Manganese-Silicon alloy. *Materials Science and Engineering A*. 679. pp. 493–503. DOI: 10.1016/j.msea.2016.10.054.
8. Fong K.S., Danno A., Tan M.J., Chua B.W. (2017) Tensile flow behavior of AZ31 magnesium alloy processed by severe plastic deformation and post-annealing at moderately high temperatures. *Journal of Materials Processing Technology*. 246. pp. 235–244. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.03.025.
9. Gupta A.K., Maddukuri T.S., Singh S.K. (2016) Constrained groove pressing for sheet metal processing. *Progress in Materials Science*. 84. pp. 403–462. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.09.008.
10. Moskvichev E.N., Skripnyak V.A., Skripnyak V.V., Kozulin A.A., Lychagin D.V. (2016) Influence of structure to plastic deformation resistance of aluminium alloy 1560 after groove pressing treatment. *Letters on Materials*. 6(2). pp. 141–145. DOI: 10.22226/2410-3535-2016-2-141-145.

11. Moskvichev E., Kozulin A., Krasnoveikin V., Skripnyak V. (2018) Numerical simulation of deformation behavior of aluminum alloy sheets under processing by groove pressing method. *MATEC Web of Conferences*. 143. 01011. DOI: 10.1051/mateconf/201814301011.
12. Wang Q., Song J., Jiang B., Tang A., Chai Y., Yang T., Huang G., Pan F. (2018) An investigation on microstructure, texture and formability of AZ31 sheet processed by asymmetric porthole die extrusion. *Materials Science and Engineering A*. 720. pp. 85–97. DOI: 10.1016/j.msea.2018.02.055.
13. Han T., Huang G., Deng Q., Wang G., Jiang B., Tang A., Zhu Y., Pan F. (2018) Grain refining and mechanical properties of AZ31 alloy processed by accumulated extrusion bonding. *Journal of Alloys and Compounds*. 745. pp. 599–608. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.02.248.
14. Kozulyn A.A., Skripnyak V.A., Krasnoveikin V.A., Skripnyak V.V., Karavatskii A.K. (2015) An investigation of physico-mechanical properties of ultrafine-grained magnesium alloys subjected to severe plastic deformation. *Russian Physics Journal*. 57(9). pp. 1261–1267. DOI: 10.1007/s11182-015-0372-5.
15. Yang Q., Jiang B., Jiang W., Luo S., Pan F. (2015) Evolution of microstructure and mechanical properties of Mg–Mn–Ce alloys under hot extrusion. *Materials Science and Engineering A*. 628. pp. 143–148. DOI: 10.1016/j.msea.2015.01.048.
16. Huo Q., Xiao Z., Yang X., Ando D., Sutou Y., Koike J. (2017) Enhanced fatigue properties of cast AZ80 Mg alloy processed by cyclic torsion and low-temperature annealing. *Materials Science and Engineering A*. 696. pp. 52–59. DOI: 10.1016/j.msea.2017.04.061.
17. Yang Q., Jiang B., Li X., Dong H., Liu W., Pan F. (2014) Microstructure and mechanical behavior of the Mg–Mn–Ce magnesium alloy sheets. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2(1). pp. 8–12. DOI: 10.1016/j.jma.2014.01.009.
18. Cáceres C.H., Blake A.H. (2007) On the strain hardening behaviour of magnesium at room temperature. *Materials Science and Engineering A*. 462(1-2). pp. 193–196. DOI: 10.1016/j.msea.2005.12.113.
19. Chen L., Yuan F., Jiang P., Xie J., Wu X. (2017) Mechanical properties and deformation mechanism of Mg–Al–Zn alloy with gradient microstructure in grain size and orientation. *Materials Science and Engineering A*. 694. pp. 98–109. DOI: 10.1016/j.msea.2017.04.005.
20. Koike J., Kobayashi T., Mukai T., Watanabe H., Suzuki M., Maruyama K., Higashi K. (2003) The activity of non-basal slip systems and dynamic recovery at room temperature in fine-grained AZ31B magnesium alloys. *Acta Materialia*. 51(7). pp. 2055–2065. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00005-3.
21. Ang H.Q., Abbott T.B., Zhu S., Easton M.A. (2017) Anelasticity of die-cast magnesium–aluminum based alloys under different strain rates. *Materials Science and Engineering A*. 707. pp. 101–109. DOI: 10.1016/j.msea.2017.09.012.
22. Koneva N.A., Lychagin D.V., Trishkina L.T., Kozlov E.V. (1985) Types of dislocation substructures and stages of stress-strain curves of F.C.C. alloys. *Strength of Metals and Alloys. Proceedings of the 7th International Conference*. 1. pp. 21–26. DOI: 10.1016/b978-0-08-031642-0.50011-8.
23. Kozlov E.V., Koneva N.A., Lychagin D.V., Trishkina L.T. (2000) Role of internal stress fields at various stages of strain hardening. *Physics of Metals and Metallography*. 90(1). pp. S59–S67.
24. Koneva N.A., Lychagin D.V., Teplyakova L.A., Kozlov E.V. (1988) Parameters of dislocation structures and factors determining flow stress at stages III and IV. *Strength of Metals and Alloys. Proceedings of the 8th International Conference*. pp. 385–390. DOI: 10.1016/b978-0-08-034804-9.50057-7.

Received: September 28, 2018