



для основного металла и, в меньшей степени, для зоны термического влияния.

3. Прослеживается тенденция увеличения средней фрактальной размерности от 1,08 для вязкого разрушения металла сварного шва до 1,10 для основного металла и 1,11 для зоны термического влияния при квазихрупком характере разрушения.

4. Фрактальная модель хрупкой трещины позволяет оценить критический ее размер, средняя величина которого для основного металла при квазихрупком разрушении составила 5,45 мкм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Usov V.V. Fractal nature of the brittle fracture surfaces of metal / V.V. Usov, N.M. Shkatulyak // Materials Science. – 2005. – Vol. 41, No. 1, – P. 62 – 66.

2. Бородкина М.М. Рентгенографический анализ текстуры в металлах и сплавах / М.М. Бородкина, Э.Н. Спектор. – М.: Metallurgiya, 1982. – 272 с.

3. Вишняков Я.Д. Теория образования текстур в металлах и сплавах / Я.Д. Вишняков, А.А. Бабарэко, С.А. Владимиров, И.В. Эгиз. – М.: Наука, 1979. – 343 с.

4. Bunde A. Fractals and Disordered Systems / A. Bunde, S. Havlin. – Heidelberg: Springer, 1991. – 350 p.

5. Брюханов А.А. Влияние контролируемой прокатки на неоднородность кристаллографической текстуры по сечению толстолистового проката низколегированной стали / А.А. Брюханов, В.В. Усов, Н.М. Шкатуляк // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1989. - №2. - С. 73-76.

6. Усов В.В. Влияние кристаллографической текстуры на склонность к слоисто-хрупкому разрушению низколегированных малоперлитных сталей / В.В.Усов, Н.М. Шкатуляк, В.С. Гиренко и др. // Изв. АН СССР. Металлы. – 1990. – № 1. – С. 12С – 125.

7. Баррет Ч.С. Структура металлов / Ч.С. Баррет, Т.Б. Масальский. – М.: Металлургия, 1984. – 685 с.

8. Hölscher M., Rolling and recrystallization textures of bcc steels / M. Hölscher, D. Raabe, K. Lücke // Steel research. – 1991. – Vol. 62, No. 12. – P. 567 – 575.

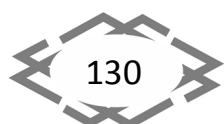
9. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. / Р. Хоникомб – М.: ИЛ, 1962. – 582 с.

УДК 669-176

## ТЕКСТУРА ДЕФОРМАЦИИ СПЛАВОВ МАГНИЯ

**Н.М. Шкатуляк<sup>1</sup>, А.И. Соколенко<sup>2</sup>, С.В. Санькова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>кандидат физико-математических наук, приват-профессор кафедры физики, Государственное высшее учебное заведение «Южно-украинский национальный педагогический университет им. К.Д. Ушинского», г. Одесса, Украина, e-mail: [shkatulyak@mail.ru](mailto:shkatulyak@mail.ru)





<sup>2</sup>кандидат физико-математических наук, профессор кафедры физики, Государственное высшее учебное заведение «Южно-украинский национальный педагогический университет им. К.Д. Ушинского», г. Одесса, Украина

<sup>3</sup>аспирантка кафедры физики, Государственное высшее учебное заведение «Южно-украинский национальный педагогический университет им. К.Д. Ушинского», г. Одесса, Украина, e-mail: [sanbkova@gmail.com](mailto:sanbkova@gmail.com)

**Аннотация.** В работе проведено исследование кристаллографической текстуры, формирующейся при различных технологиях получения листового полуфабриката сплавов магния с цинком, цирконием и редкоземельными металлами, а также бинарного сплава с гексагональной структурой системы магний-литий.

*Ключевые слова:* магниевые сплавы ZE10, Mg-Li5, прессование, экструзия, прокатка, отжиг, кристаллографическая текстура.

## DEFORMATION TEXTURE OF MAGNESIUM ALLOY

**Nataliya Shkatulyak<sup>1</sup>, Alexandra Sokolenko<sup>2</sup>, Svetlana San'kova<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>candidate of physical and mathematical sciences, private professor of Physics Department, State Higher Educational Institution "South Ukrainian National Pedagogical University named after K.D. Ushinsky", Odessa, Ukraine, e-mail: [shkatulyak@mail.ru](mailto:shkatulyak@mail.ru)

<sup>1</sup>candidate of physical and mathematical sciences, professor of Physics Department, State Higher Educational Institution "South Ukrainian National Pedagogical University named after K.D. Ushinsky", Odessa, Ukraine

<sup>2</sup>graduate student of the Department of Physics, State Higher Educational Institution "South Ukrainian National Pedagogical University named after K.D. Ushinsky", Odessa, Ukraine email: [sanbkova@gmail.com](mailto:sanbkova@gmail.com)

**Abstract.** In this paper carried out a study of crystallographic texture, which is formed by various technologies produce sheets of magnesium alloys with zinc, zirconium and rare earth metals, as well as in the binary alloy of magnesium-lithium with a hexagonal structure.

*Keywords:* magnesium alloys ZE10, Mg-Li5, compression molding, extrusion, rolling, annealing, crystallographic texture.

**Введение.** В последнее время магний и его сплавы привлекает научный и практический интерес, благодаря повышенному спросу на снижение веса в ряде таких отраслей, как автомобилестроение, аэрокосмическая промышленность. Низкая плотность и высокая удельная прочность являются основанием для такого интереса. Однако чистый магний и его обычные сплавы с алюминием и цинком типа AZ31 проявляют недостаточную способность к формоизменению при штамповке и глубокой вытяжке. Известно, что магний показывает выраженную анизотропию механических свойств после деформации. Анизотропии механических свойств возникает, в основном, за счет ярко выраженной текстуры, которая развивается при



пластической деформации, что характерно для металлов с гексагональной кристаллической структурой. Тем более что при производстве листового материала текстура может, в принципе, влиять на производственный процесс и результирующие механические свойства. Разнообразие возможных механизмов деформации, таких как базисного, призматического, пирамидального скольжения и ряда режимов двойникования существенно усложняет деформационное поведение гексагональных металлов в целом. Кроме того, активация механизмов деформации зависит от соотношения  $c/a$ . Таким образом, существует потребность в развитии новых магниевых сплавов с высокой коррозионной стойкостью и хорошими механическими свойствами.

Одним из способов управления текстурой является добавление в сплавы магния редкоземельных металлов (РЗМ), которые модифицируют и ослабляют остроту текстуры горячекатаных Mg сплавов, в результате чего повышается их пластичность и деформируемость [1].

Также было показано, что легирование магния небольшим количеством лития позволяет существенно увеличить пластичность и коррозионную стойкость даже в сплаве с гексагональной решеткой [2].

**Цель работы.** Цель данной работы состоит в исследовании влияния технологии изготовления листового полуфабриката на кристаллографическую текстуру листов сплавов магния с цинком, цирконием и небольшими добавками РЗМ, а также бинарного сплава с гексагональной структурой системы магний-литий.

**Материал и результаты исследований.** Исходным материалом послужили цилиндрические отливки сплава ZE10 (1,3 % Zn, 0,15 % Zr, 0,2 % РЗМ, в основном, церий) и сплава Mg-5 % Li длиной 120 мм после токарной обработки. Далее заготовки обрабатывали по двум различным промышленным технологическим режимам А и Б.

По режиму А литые заготовки сплавов ZE10 и Mg-Li5 после токарной обработки прессовали при 350°C и получили брусок толщиной 6 мм и шириной 60 мм. Затем прокатали вдоль заготовки до толщины 4,5 мм за два прохода. Следующая прокатка была проведена в поперечном направлении с обжатиями 10 % за проход до толщины 2 мм за 10 проходов. После каждого прохода проводили нагрев до 350°C. Далее изменяли направление прокатки на 90° и делали один проход с обжатием 10 %. Затем вновь изменяли направление прокатки на 90° и в этом направлении прокатали до толщины 1 мм.

По режиму Б обрабатывали только сплав Mg-Li5. Для обеспечения плоской деформации заготовку сплава Mg-Li5 подвергли экструзии через прямоугольную матрицу при температуре 350°C и в результате получили



брусек толщиной 6 мм и шириной 120 мм. Далее брусок прокатали за два прохода вдоль заготовки до 4,5 мм толщиной. После каждого прохода заготовку подвергали нагреву до 350°C.

Дрессировку листов проводили с обжатиями ~ 1-2 %.

Кристаллографическую текстуру листов исследовали рентгеновским методом с построением обратных полюсных фигур (ОПФ) направления нормали (НН) к плоскости листов и окончательного направления прокатки (НП). В последнем случае изготавливали наборные образцы. Перед съемкой соответствующие поверхности химически полировали на глубину до 0, 2 мм. Нормировку ОПФ проводили по Моррису [3]. Эталон без текстуры изготовили из мелких рекристаллизованных опилок исследуемых сплавов.

На рис. 1 представлены ОПФ образцов исследуемого сплава магния ZE10.

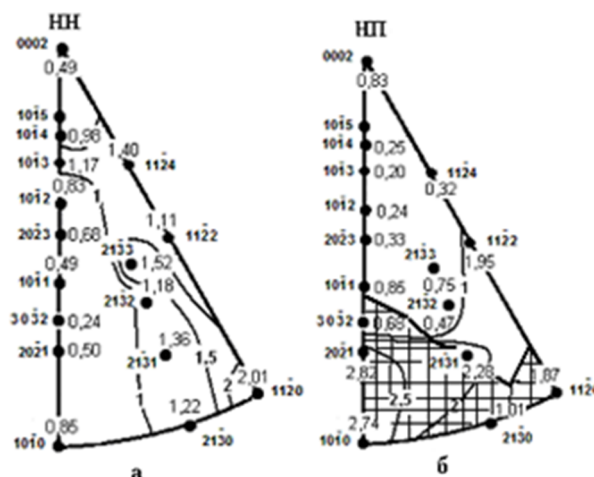


Рисунок 1. Экспериментальные обратные полюсные фигуры сплава ZE10

На ОПФ НН (рис. 1, а) абсолютный максимум полюсной плотности величиной 2,01 совпадает с полюсом  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ . На ОПФ НП максимальное значение полюсной плотности 2,82 соответствует полюсу  $\langle 20\bar{2}1 \rangle$ , а в полюсе  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  величина полюсной плотности составила 2,74. Это означает, что максимальный угол отклонения оси гексагональной призмы от НН к плоскости листа сплава в сторону НП равен 90°. При этом с НП совпадают направления  $\langle 10\bar{1}0 \rangle - \langle 20\bar{2}1 \rangle$ . В то же время на диагонали стереографического треугольника  $\langle 0002 \rangle - \langle 10\bar{1}0 \rangle$  на ОПФ НН в полюсе  $\langle 10\bar{1}3 \rangle$  наблюдается локальный максимум полюсной плотности 1,17, что соответствует наклону гексагональной призмы от НН в сторону НП на ~ 40°. Вдоль другой диагонали стереографического треугольника при этом присутствует локальный максимум 1,4 в полюсе  $\langle 11\bar{2}4 \rangle$ , что соответствует углу наклона гек-



сагональной призмы от НН в сторону ПН на  $\sim 40^\circ$ . Также наблюдается локальный максимум полюсной плотности 1,52 в полюсе  $\langle 21\bar{3}3 \rangle$ .

Таким образом, после горячей обработки текстура исходного образца характеризуется широким преимущественным рассеянием базисных плоскостей в ПН с максимальным углом отклонения  $90^\circ$  и промежуточными максимумами отклонения гексагональной призмы от НН как в сторону ПН на  $40^\circ$ , так и в сторону НП на  $40^\circ$ , в отличие от текстуры, которая обычно формируется в Ti и Zr.

Этот необычный тип текстуры, развивающейся в ходе прокатки листов сплава магния с цинком и РЗМ, отмечен в литературе [4]. Было установлено, что добавление РЗМ к сплавам Mg приводит к развитию более слабых текстур по сравнению с другими сплавами магния во время прокатки или экструзии. Для объяснения этого был предложен целый ряд различных механизмов [5 - 7].

Так, в [5] связали формирование отклоненной в ПН базисной текстуры с частичной рекристаллизацией, протекающей в процессе горячей прокатки или промежуточного отжига. В [6] предположили, что ослабление текстуры в Mg сплавах, содержащих РЗМ, обусловлено зародышеобразованием (particle-stimulated nucleation) Mg-РЗМ частиц и закреплением ими границ зерен. В [7] сделан вывод о том, что торможение подвижности высокоугловых границ легирующими добавками приводит к ослаблению текстуры, а также развитию отклоненных к ПН базисных компонентов, как это видно и в данном исследовании. Зародышеобразование в процессе деформации в полосах сдвига и, как следствие, ослабление текстуры было обсуждено в [8, 9]. Однако еще не ясно, какой из вышеупомянутых механизмов ослабления текстуры играет основную роль в процессе рекристаллизации сплавов Mg с РЗМ [9].

В работе [9] установлено, что отклонению базисных полюсов в ПН способствует активизация небазисного, в частности, призматического скольжения при прокатке. Было показано [10], что небольшие добавки Се в Mg способствует активации призматического скольжения вследствие увеличения энергии дефектов упаковки, которое, несмотря на высокое значение критического напряжения, дает существенный вклад в общую деформацию магниевых листов даже при комнатной температуре. Процессы двойникования также играют определенную роль в формировании наблюдаемой текстуры. В чистом магнии двойникование при комнатной температуре обычно происходит по плоскостям  $\{10\bar{1}2\}$ , хотя в ранней работе [11] наблюдали иглоподобные двойники  $\{30\bar{3}4\}$ . В работе [12] после горячей прокатки чистого магния из слитка обнаружены двойники растяжения  $\{10\bar{1}2\}\{10\bar{1}1\}$  и двойники сжатия  $\{10\bar{1}1\}\{10\bar{1}2\}$ .





Легирование и деформация при повышенных температурах могут изменять механизмы деформации и двойникования в сплавах магния [13]. Например, в [14] наблюдали образование двойных двойниковых структур  $\{10\bar{1}1\} - \{10\bar{1}2\}$ . На ОПФ НП (рис. 1) сплава ZE10 абсолютный максимум 2,82 наблюдается в полюсе  $\langle 20\bar{2}1 \rangle$ . Повышенная полюсная плотность занимает широкую область. Она включает полюса  $\langle 20\bar{2}1 \rangle$ ,  $\langle 11\bar{2}2 \rangle$ ,  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ ,  $\langle 21\bar{3}0 \rangle$ , попадающие в заштрихованную область на рис. 1, б. Интересно, что согласно [14], эта область соответствует ориентациям вторичных двойников после первичного двойникования по плоскостям  $\{10\bar{1}1\}$ . Ранее было показано, что в сплаве ZE10 после прокатки по режиму А наблюдаются как широкие и острые на концах двойники, что характерно для двойников  $\{10\bar{1}2\}$ , так и (в меньшем количестве) более тонкие и спаренные двойники  $\{10\bar{1}1\}$  [15].

Экспериментальные ОПФ сплава Mg-Li5 представлены на рис. 2.

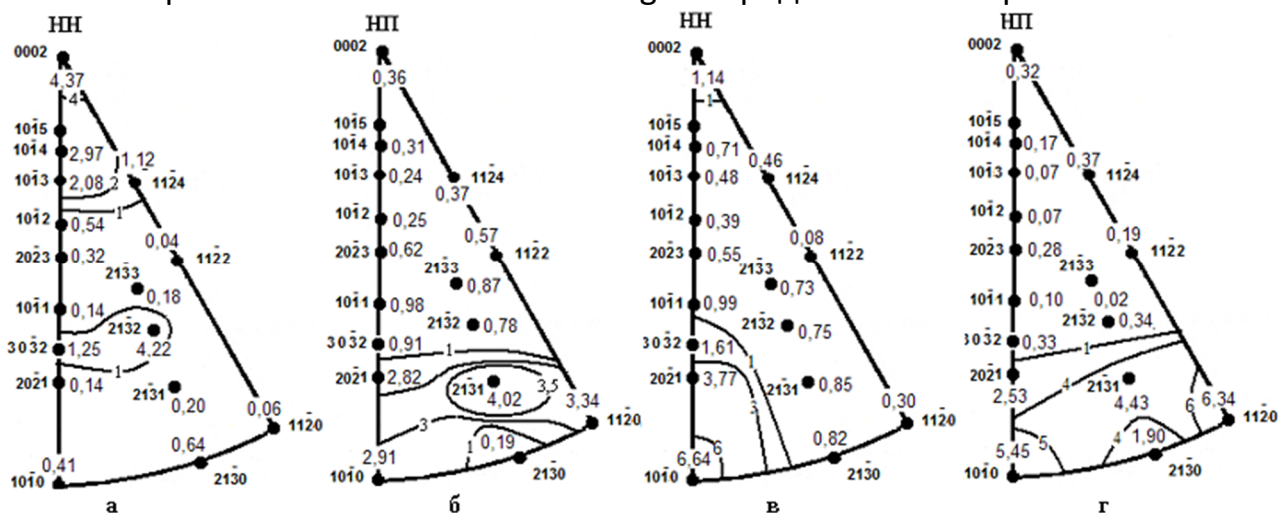


Рисунок 2. ОПФ сплава Mg-Li5, обработанного по режиму А (а, б) и по режиму Б (в, г)

Видно, что нормаль к плоскости листа, полученному по технологическому режиму А совпадает, в основном, с направлением нормали к плоскости базиса, так как максимум полюсной плотности 4,37 находится в полюсе  $\langle 0002 \rangle$  с рассеянием почти до полюсов  $\langle 10\bar{1}2 \rangle$  и  $\langle 11\bar{2}4 \rangle$ . Второй более слабый максимум полюсной плотности 4,22 находится около полюса  $\langle 21\bar{3}2 \rangle$  (что соответствует отклонению гексагональной призмы в ПН на  $\sim 60^\circ$ ) с рассеянием до полюса  $\langle 30\bar{3}2 \rangle$ . Направление прокатки такого листа (рис. 1б) характеризуется значительным рассеянием от кристаллографического направления  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  до  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  с максимумом полюсной плотности в полюсе  $\langle 21\bar{3}2 \rangle$ , вероятно, вследствие перекрытия областей рассеяния вышеуказанных кристаллографических направлений.



Текстура листа, полученного по режиму Б (рис. 1 в, г), существенно отличается от вышеописанной. Текстура такого листа характеризуется наличием относительно слабого базисного компонента (полюсная плотность 1,14 на рис. 1б) и очень сильным компонентом ( $10\bar{1}0$ ) (полюсная плотность 6,64 на рис. 1б). Это соответствует текстуре отклоненного на  $90^\circ$  в ПН базисного типа. При этом направление прокатки такого листа совпадает, в основном, с кристаллографическими направлениями  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  и  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  с рассеянием.

Добавка лития к магнию изменяет баланс механизмов деформации, что в свою очередь влияет на текстуру. Легирование магния литием способствует уменьшению отношения осей  $c/a$  и тем самым активизирует небазисные механизмы скольжения. В частности, при повышенных температурах роль призматического  $\langle a \rangle$  скольжения  $\{10\bar{1}0\}\langle 21\bar{1}0 \rangle$  дислокаций в Mg-Li сплавах может быть значительной [3]. Формированию компонентов текстуры отклоненного в ПН базисного типа, вероятно, способствует активизация призматического  $\langle a \rangle$  скольжения.

**Вывод.** Текстура сплава магния ZE10 с цинком цирконием и редкоземельными металлами после обработки по режиму А, включающему пресование при  $350^\circ\text{C}$ , прокатку с изменением направления на  $90^\circ$  и промежуточным нагревом до  $350^\circ$  после каждого прохода, представляет собой комбинацию двойниковых ориентаций и текстуры двойного отклоненного в ПН базисного типа с максимальным углом отклонения  $90^\circ$  и промежуточными максимумами наклона гексагональной призмы как в ПН на  $40^\circ$ , так и в НП на  $40^\circ$  с рассеянием.

Обработка сплава Mg-Li5 по режиму А способствует развитию базисной текстуры в листах за счет базисного скольжения. При этом формируются также компоненты двойного отклоненного на  $60^\circ$  в ПН базисного типа.

Обработка сплава Mg-Li5 по режиму Б, включающему экструзию при температуре  $350^\circ\text{C}$  и дальнейшую прокатку в одном направлении с промежуточным нагревом до  $350^\circ$  после каждого прохода способствует формированию текстуры, при которой гексагональная призма отклонена на  $90^\circ$  в ПН за счет активизации небазисных механизмов скольжения, в частности, призматического  $\langle a \rangle$  скольжения  $\{10\bar{1}0\}\langle 21\bar{1}0 \rangle$  дислокаций.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Chino Y. Texture and Stretch Formability of Mg-1.5 mass % Zn-0.2 mass % Ce Alloy Rolled at Different Rolling Temperatures / Y. Chino, K. Sassa, M. Mabuchi // Materials Transactions. – 2008. – Vol. 49, No. 12. – P. 2916-2918.





2. Hafekamp H. Development, proceeding and application range of magnesium lithium alloys / H. Hafecamp, M. Niemeier, R. Bohem, U. Holzkamp, C. Jaschik, V. Kaese // *Material Science Forum*. – 2000. – Vols. 350-351. – P. 31-42.
3. Вишняков Я.Д. Теория образования текстур в металлах и сплавах / Я.Д. Вишняков, А.А. Бабарэко, С.А. Владимиров, В.В. Эгиз. – М.: Наука, 1979. – 343 с.
4. Bohlen J., The texture and anisotropy of magnesium-zinc-rare earth alloy sheets / J. Bohlen, M.R., Nürnberg, J.W. Senn, D. Letzig, S.R. Agnew // *Acta Materialia*. – 2007. – Vol. 55, No. 6. – P. 2101–2112.
5. Mishra R.K. Influence of cerium on the texture and ductility of magnesium extrusions / R.K. Mishra, A.K. Gupta, P.R. Rao, A.K. Sachdev, A.M. Kumar, A.A. Luo // *Scripta Materialia*. – 2008. – Vol. 59, No. 5. – P. 562–565.
6. Mackenzie L.W.F. The recrystallization and texture of magnesium–zinc–cerium alloys / L.W.F. Mackenzie, M.O. Pekguleryuz // *Scripta Materialia*. – 2008. – Vol. 59. – P. 665–668.
7. Stanford N. Effect of composition on the texture and deformation behavior of wrought Mg alloys / N. Stanford, M. Barnett // *Scripta Materialia*. – 2008. – Vol. 58, No. 3. – P. 179–1829.
8. Stanford N. Effect of particles on the formation of deformation twins in a magnesium-based alloy / N. Stanford, M.R. Barnett // *Materials Science and Engineering: A*. – 2009. – Vol. 516, No. 1–2. – P. 226–234.
9. Bohlen J., Yi S., Letzig D., Kainer K.U. Effect of rare earth elements on the microstructure and texture development in magnesium manganese alloys during extrusion / J. Bohlen, S. Yi, D. Letzig, K.U. Kainer // *Materials Science and Engineering A*. – 2010. – Vol. 527. – P. 7092–7098.
10. Chino Y. Tensile Properties and Stretch Formability of Mg-1.5 mass %-0.2 mass % Ce Sheet Rolled at 723K / Y. Chino, K. Sassa, M. Mabuchi // *Materials Transactions*. – 2008. – Vol. 49, No. 7. – P. 1710–1712.
11. Couling S.L. New Twinning systems in magnesium / S.L. Couling, C.S. Roberts // *Acta Crystallographica* – 1956. – Vol. 9. – P. 972 – 973.
12. Sangbong Yi., Twinning-related microstructural evolution during hot rolling and subsequent annealing of pure magnesium / Yi. Sangbong, I. Schestakow, S. Zaefferer // *Materials Science and Engineering A*. – 2009. – Vol. 516. – P. 58–64.
13. Koike J. Strain Accommodation Twins and Fracture Initiation Twins in Magnesium Alloys. / J. Koike, D. Ando. – URL: <http://www.magnet.ubc.ca/news/images/MagNET%20Workshop%20Abstracts.pdf>.
14. Barnett M.R.; Keshavar Z., Beer A.G., Ma X. Non-Schmid behavior during secondary twinning a polycrystalline magnesium alloy / M.R. Barnett, Z. Keshavar, A.G. Beer, X. Ma // *Acta Materialia*. – 2008. – Vol. 56, No. 1. – P. 5–15.
15. Shkatulyak N.M. Effect of Reverse Bending on Texture, Structure, and Mechanical Properties of Sheets of Magnesium Alloys with Zinc and Zirconium / N.M. Shkatulyak, V.V. Usov, N.A. Volchok, A.A. Bryukhanov, S.V. San'kova, M. Rodman, M. Shaper, C. Klose // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2014. – Vol. 115, No. 6. – P. 609–616.
16. Al-Samman T. Comparative study of the deformation behavior of hexagonal magnesium–lithium alloys and a conventional magnesium AZ31 alloy / T. Al-Samman // *Acta Materialia*. – 2009. – Vol. 57. – P. 2229–2242.