

**ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ  
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА**

---

**ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ  
МЕН ТЕХНИКАСЫ**

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ



**НАУКА И ТЕХНИКА  
КАЗАХСТАНА**

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 2788-8770

№ 4 (2021)

---

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ**  
выходит 1 раз в квартал

---

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о постановке на переучет периодического печатного издания,  
информационного агентства и сетевого издания  
№ KZ51VPY00036165

выдано  
Министерством информации и общественного развития  
Республики Казахстан

**Тематическая направленность**

Публикация научных исследований по широкому спектру проблем  
в области металлургии, машиностроения, транспорта, строительства,  
химической и нефтегазовой инженерии, производства продуктов питания

**Подписной индекс – 76129**

<https://doi.org/10.48081/PIZZ2271>

**Импакт-фактор РИНЦ – 0,342**

---

Абишев Кайратолла Кайроллинович – к.т.н., профессор (главный редактор);  
Касенов Асылбек Жумабекович – к.т.н., профессор (заместитель главного редактора);  
Мусина Жанара Керейовна – к.т.н., профессор (ответственный секретарь);  
Шокубаева Зауреш Жанатовна – технический редактор.

**Члены редакционной коллегии:**

Калиакпаров Алтай Гиндуллинович – д.т.н., профессор (Нур-Султан, Казахстан);  
Клецель Марк Яковлевич – д.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);  
Шеров Карибек Тагаевич – д.т.н., профессор (Караганда, Казахстан);  
Богомоллов Алексей Витальевич – к.т.н., ассоц. профессор (Павлодар, Казахстан);  
Кажыбаева Галия Тулеуевна – к.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);

**Зарубежные члены редакционной коллегии:**

Waigang Sun – профессор (Пекин, Китай);  
Gabriele Comodi – PhD, профессор (Анкона, Италия);  
Jianhui Zhao – профессор (Харбин, Китай);  
Khamid Mahkamov – д.т.н., профессор (Ньюкасл, Великобритания);  
Magin Laruerta – д.т.н., профессор (СьюДад Реал, Испания);  
Mareks Mezitis – д.т.н., профессор (Рига, Латвия);  
Petr Bouchner – PhD, профессор (Прага, Чехия);  
Ronny Berndtsson – профессор (Лунд, Швеция);  
Барзов Александр Александрович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);  
Витвицкий Евгений Евгеньевич – д.т.н., профессор (Омск, Россия);  
Иванчина Эмилия Дмитриевна – д.т.н., профессор (Томск, Россия);  
Лазарев Владислав Евгеньевич – д.т.н., профессор (Челябинск, Россия);  
Мягков, Леонид Львович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);  
Янюшкин Александр Сергеевич – д.т.н., профессор (Чебоксары, Россия);  
Ребезов Максим Борисович – д.с/х.н., профессор (Москва, Россия).

---

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели  
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов  
При использовании материалов журнала ссылка на журнал «Наука и техника Казахстана» обязательна

© Торайгыров университет

**\*T. A. Ryspaev**

Hochschule Anhalt, Deutschland, Köthen

## **HERSTELLUNG VON NANOSTRUKTURIERTEN MAGNESIUMLEGIERUNGEN DURCH ECAP-PROZESS**

*Um die nanostrukturierte Magnesiumlegierungen zu entwickeln wurde der ECAP-Prozess gewählt, der zurzeit intensiv erforscht wird. Das Potential dieses Umformverfahrens wurde anhand der zwei Magnesiumlegierungen AZ91 und AE42 demonstriert. So wurden nach 8 ECAP-Durchgängen eine mittlere Korngröße von 2  $\mu\text{m}$  und 0,45  $\mu\text{m}$  jeweils in AE42 und AZ91 erzielt. Dieser Unterschied zwischen den Korngrößen in AE42 und AZ91 bestätigt noch einmal den Einfluss der Ausscheidungen auf die Korngröße, da der Aluminiumgehalt in AZ91 etwa zweimal höher ist als in AE42, was auch fast die Hälfte der Ausscheidungen  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  in AE42 bedeutet.*

*Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die ECAP-Verformung der industriellen Magnesiumlegierungen AZ91 und AE42 zur Ausbildung einer feinkörnigen Mikrostruktur führt. Deutlich ist zu sehen, dass die mittlere Korngröße der Legierung AZ91 nach jedem verwendeten ECAP-Durchgang kleiner ist als der Legierung AE42. Diese Untersuchungen bestätigen, wie auch die Ergebnisse der Strangpressen und Rundkneten dieser beiden Legierungen, dass neben den Effekten der Kornfeinung beim ECAP-Prozess auch das Vorhandensein der Ausscheidungen der zweiten Phasen einen großen Einfluss auf die Kornstruktur- bzw. Korngröße hat. Da der Aluminiumgehalt in Legierung AE42 etwa halb so groß ist wie in AZ91, was etwa die Hälfte der Ausscheidungen der  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  in AE42 bedeutet, ist die ultrafeinkörnige Mikrostruktur in AZ91 durch die bei gleichen Überalterungs- und Strangpressentemperaturen von 300 °C ausgeschiedenen Partikeln der  $\beta$ -Phase zu verdanken.*

*Schlüsselwörter: ECAP-Prozess, Magnesiumlegierungen, Struktur, Aluminiumgehalt, Metall.*

### **Einführung**

Eine Möglichkeit zur Kornfeinung des massiven Werkstoffs besteht darin, dass das Material so hoch verformt wird und somit im Material viele Versetzungen induziert werden können. Dabeikommt es zu einer Versetzungsumordnung, wodurch Subkörner- und Körner im Gefüge entstehen. Um das Material intensiv zu verformen, wurden in den letzten Jahren zahlreiche Methoden von SPD-Verfahren (Severe Plastic Deformation) entwickelt. Das bekannteste und wichtigste von diesen Verfahren ist das sogenannte Equal Channel Angular Pressing (ECAP), welches man wohl als Gleichkanalwinkelpressen bezeichnen kann [1]. Obwohl durch ECAP-Prozess in

vielen Metallen ein sehr feinkörniges Gefüge erzielt wurde, wurde dies bis jetzt ohne Berücksichtigung der Ausscheidungen der zweiten Phasen durchgeführt. Die ersten Arbeiten auf dem Gebiet des SPD-Verfahrens kommen aus den fünfziger Jahren und basieren auf der klassischen Arbeit von Bridjman [2]. Dabei wurden scheibenförmige Proben gestaucht und gleichzeitig auf Torsion belastet. Weitere Prozesse zur hochgradigen plastischen Umformung wurden im Laufe der Jahre entwickelt. Einer von meist verwendeten davon ist Equal Channel Angular Pressing (ECAP) [1–4]. Dabei wird das Werkstück durch einen gewinkelten Kanal gedrückt (Abbildung 1). Dadurch wird in der Schnittebene der beiden

Kanalhälften auf das Werkstück eine starke Scherverformung ausgeübt.

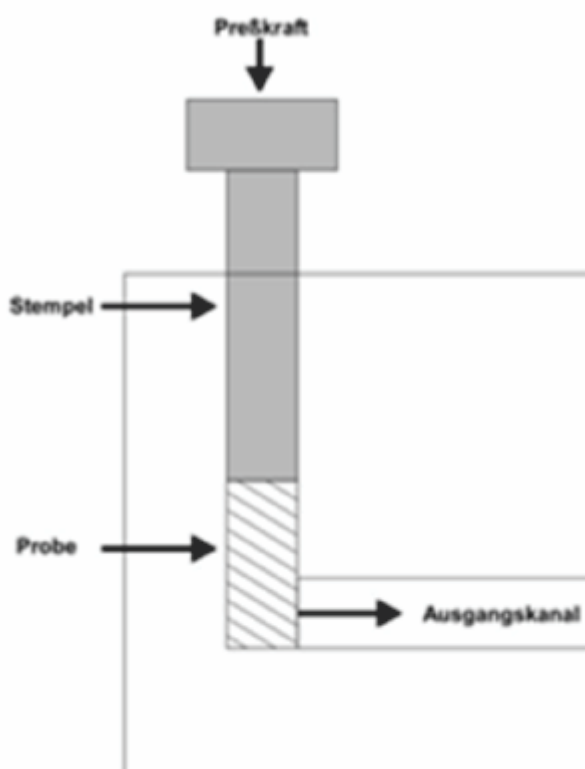


Abbildung 1 – Prinzip des ECAP Prozesses

Die Umformung eines Werkstücks kann im Falle von ECAP mehrfach wiederholt werden, da es nach dem Verlassen der Pressmatrize den gleichen Querschnitt aufweist. So kann eine extrem hohe Verformung in das Material eingebracht werden. Da die Probe zwischen den einzelnen Pressdurchgängen immer wieder neu in die Matrize eingeführt wird, ist es möglich, diese zwischen den Durchgängen zu drehen. Die vier üblichen ECAP-Prozeßrouten sind die Routen A, BA, BC und C, die in Abb. 2 dargestellt sind.

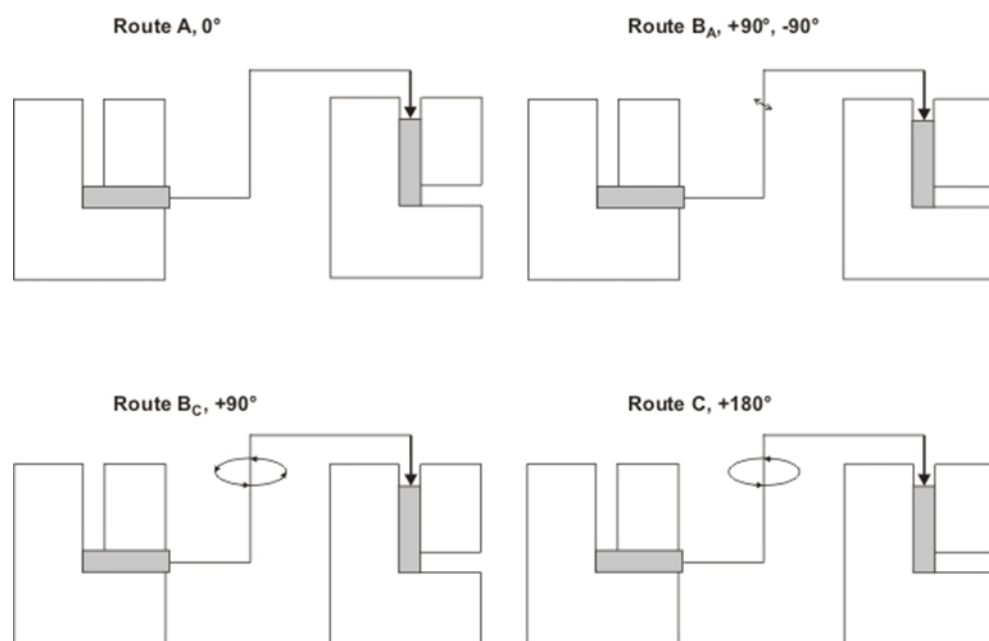


Abbildung 2 – Schematische Darstellung der vier üblichen ECAP-Prozessrouten A, BA, BC und C

Die Prozessroute A beinhaltet keine Drehung zwischen zwei aufeinanderfolgenden ECAP- Durchgängen. Bei der Route B wird die Probe um  $90^\circ$  um seine Längsachse gedreht, wobei bei der Route BA nach jedem Durchgang umgekehrt und bei Route BC konstant gehalten. Und bei der letzten Route C wird die Probe nach jedem Durchgang durch die Pressmatrize um  $180^\circ$  um ihre Längsachse gedreht.

Die Kornfeinung durch das ECAP-Verfahren lässt sich über die Evolution der Versetzungsdichte und die damit verbundenen Umorientierungen der einzelnen Versetzungen erklären. Es gibt allerdings bis heute keine plausiblen Hypothesen, die mechanischen und mikrostrukturellen Vorgänge der hochgradigen Verformung umfassend erklären können.

#### **Material and experimental procedure**

Der ECAP-Prozess wurde in der Abteilung für Metallphysik der Karlsuniversität in Prag durchgeführt. Für die ECAP-Versuche wurden sowohl gegossene als auch stranggepresste Materialien verwendet. Die ECAP-Versuchseinrichtung besteht aus einer zweiteiligen Pressmatrize, die einen winkligen Kanal enthält, durch den die Proben hindurch gepresst werden. Dieser Vorgang erfolgt mit Hilfe eines Pressstempels, der frei von seitlichem Spiel an den Eingangskanal angepasst ist. Die beiden Teile der Form werden über die vorgesehene Gewindebohrung mit Hilfe von Imbusschrauben fest miteinander verbunden und die Form wird somit verschlossen. Eine zu pressende Probe wird in den Eingangskanal eingebracht und das anschließende Pressen der Probe in den Ausgangskanal erfolgt durch das Niederdrücken des Stempels in einer geeigneten Prüfmaschine.

Hochgradige plastische Umformungen der Magnesiumlegierungen AZ91, AE42, QE22 und ZRE1 wurden in einer Matrize bei einer Temperatur von  $220^\circ\text{C}$  durchgeführt.

Dabei wurde festgestellt, dass die Prozesstemperatur 220 °C für die hochfesten Legierungen QE22 und ZRE1 zu niedrig ist und daher wurden diese beiden Legierungen für den ECAP-Prozess nicht mehr betrachtet. Dagegen lassen sich die Legierungen AZ91 und AE42 bei dieser Temperatur ekapieren. Dadurch entsteht ein feinkörniges Gefüge in diesen Legierungen.

Abbildung 3 zeigt eine lichtmikroskopische Aufnahme der Legierung AE42 mit zwei unterschiedlichen Ausgangszuständen nach zwei ECAP-Durchgängen. Es handelt sich bei den untersuchten Bereichen der beiden Proben um einen Schnitt senkrecht zur Pressrichtung. Wie beim Strangpressen und Rundkneten spielt der Ausgangszustand des Materials eine große Rolle bei der Kornfeinung.

Die Kornstruktur im Material, welches von ohne Vorwärmebehandlung verformten Stäben ekapiert wurde, ist in Abb. 3a zu sehen. Dabei ist eine inhomogene Verteilung der Körner zu erkennen. Im Gefüge befinden sich neben sehr feinen Körnern (1-2  $\mu\text{m}$ ) auch viele große Körner (10- 20  $\mu\text{m}$ ). Der Einfluss der Wärmebehandlung auf das Vormaterial für den ECAP-Prozess, geht deutlich aus der Abbildung 3b vor. Im Vergleich zur Abb. 3a enthalten viele Bereiche feine Körner und die Homogenität der Kornstruktur nimmt zu.

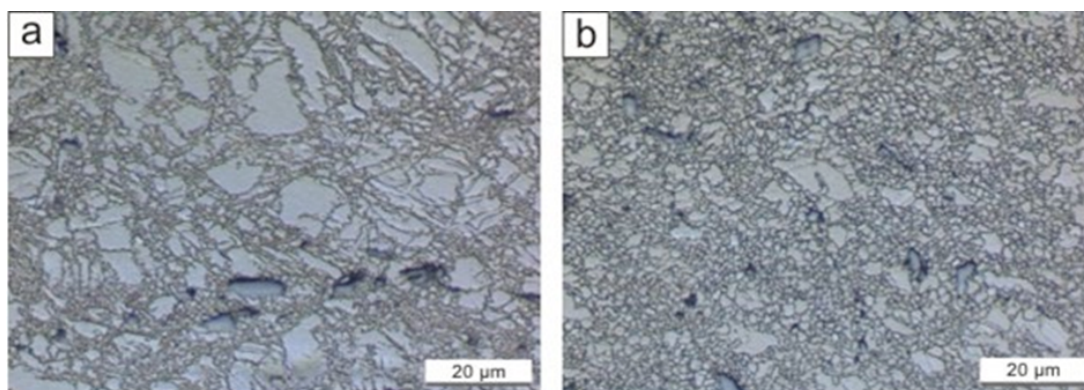


Abbildung 3 – Lichtmikroskopische Aufnahmen der Legierung AE42 nach zwei ECAP- Durchgängen (Route BC) mit zwei Ausgangszuständen: a) gegossen, b) wärmebehandelt

Um den Einfluss der ECAP-Durchgangszahl auf die Kornfeinung in den Legierungen AE42 und AZ91 zu bestimmen, wurden 2, 4 und 8 ECAP-Durchgänge verwendet. Beidiesen Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Kornfeinung durch den ECAP-Prozess in Legierung AZ91 signifikanter ist als in AE42 (Abbildung 4). Nach zwei Durchgängen ist in beiden Legierungen das Gefüge inhomogen; neben den durch eine starke Scherverformung entstandenen kleinen Körnern sind noch einige grobkörnige Bereiche zu sehen. Diese Inhomogenität der Kornstruktur nimmt mit der Anzahl der ECAP-Durchgänge ab und nach acht Durchgängen mit einer mittleren Korngröße von 2  $\mu\text{m}$  in AE42 und 0,45  $\mu\text{m}$  in AZ91 ist das Gefüge homogen.

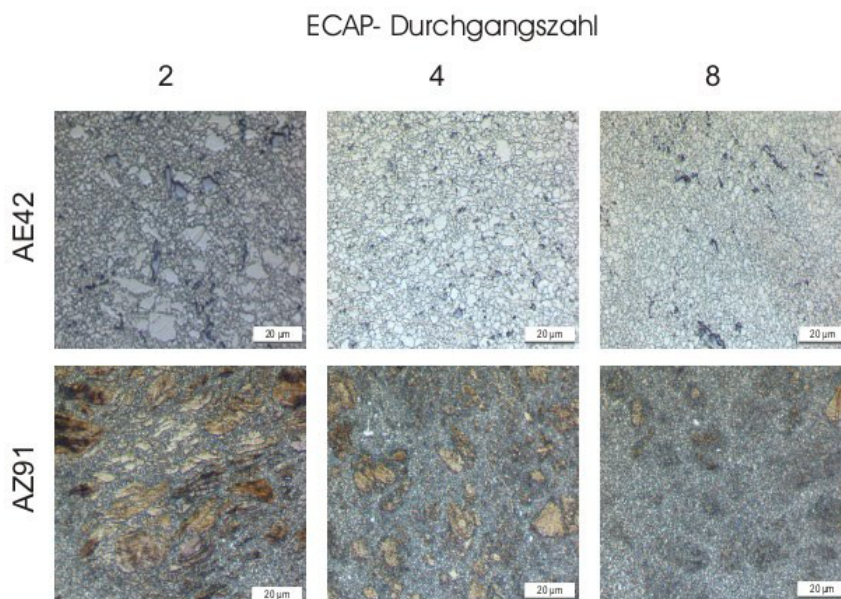


Abbildung 4 – Lichtmikroskopische Aufnahmen der Legierungen AE42 und AZ91 nach 2, 4 und 8 ECAP-Durchgängen (Route BC)

Abbildung 5 zeigt die Abhängigkeit der mittleren Korngröße in Legierungen AE42 und AZ91 von der ECAP-Durchgangszahl. Mit der Vergrößerung der ECAP-Durchgangszahl hat sich die mittlere Korngröße in beiden Legierungen reduziert. Nach 8 Durchgängen wiesen die Legierungen AE42 und AZ91 jeweils eine mittlere Korngröße 2 und 0,45 µm auf.

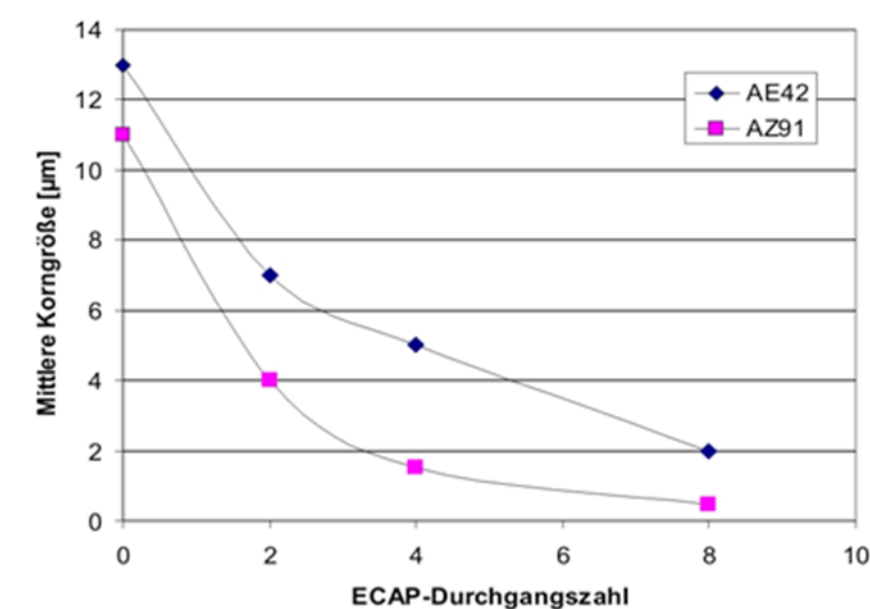


Abbildung 5 – Einfluss der ECAP-Durchgänge auf die mittlere Korngröße in Legierungen AE42 und AZ91

Die Härte im stranggepressten Ausgangszustand betrug für AE42 etwa 56 HV und 72 HV für AZ91. Die Vickers-Härte der beiden Legierungen AE42 und AZ91 nahm mit steigender ECAP- Verformung zu. Nach 8 ECAP-Durchgängen hat die Härte deutlich zugenommen auf etwa 88 HV für AE42 und auf 109 HV für AZ91, die Härte lag dabei bei 88 HV für AE42 und 109 HV für AZ91 (Abbildung 6).

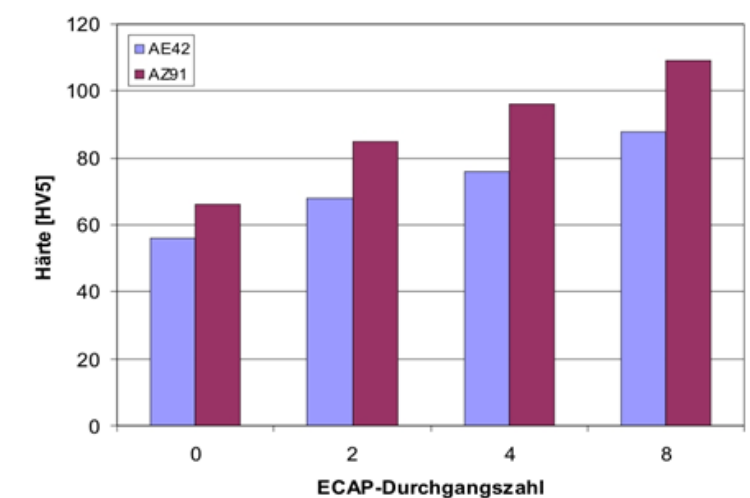


Abbildung 6 – Abhängigkeit der Härte (HV5) der Legierungen AE42 und AZ91 von ECAP- Durchgängen

### Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die ECAP-Verformung der industriellen Magnesiumlegierungen AZ91 und AE42 zur Ausbildung einer feinkörnigen Mikrostruktur führt. Deutlich ist zu sehen, dass die mittlere Korngröße der Legierung AZ91 nach jedem verwendeten ECAP-Durchgang kleiner ist als der Legierung AE42. Diese Untersuchungen bestätigen, wie auch die Ergebnisse der Strangpressen und Rundkneten dieser beiden Legierungen, dass neben den Effekten der Kornfeinung beim ECAP-Prozess auch das Vorhandensein der Ausscheidungen der zweiten Phasen einen großen Einfluss auf die Kornstruktur- bzw. Korngröße hat. Da der Aluminiumgehalt in Legierung AE42 etwa halb so groß ist wie in AZ91, was etwa die Hälfte der Ausscheidungen der Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> in AE42 bedeutet, ist die ultrafeinkörnige Mikrostruktur in AZ91 durch die bei gleichen Überalterungs- und Strangpressentemperaturen von 300 °C ausgeschiedenen Partikeln der  $\beta$ -Phase zu verdanken [5–9].

Die Rolle der durch die Überalterung erzielten Ausscheidungen zur Kornfeinung beim ECAP-Prozess wird deutlicher beim Vergleich der Korngrößen in AZ91 in dieser Arbeit mit den Literaturangaben. In [10] wurde die Legierung AZ91 nur einer Homogenisierungsglühung bei einer Temperatur von 413 °C, 18 h unterzogen und wurde weiter ohne Überalterung ekapiert. Nach acht Durchgängen betrug die mittlere Korngröße 1,2  $\mu\text{m}$ , welche etwa zweimal größer ist als in Abbildung 4.



## LITERATUR

- 1 **V. M. Segal, V. I. Reznikov, A. E. Drobyshevsky, V. I. Kopylov** «Plastic working of metals by simple shear». – Russian Metall (Metally) 1. –1981. – P. 99–105.
- 2 **P. W. Bridjman** «Studies in Large Plastic Flow and Fracture». – McGraw-Hill : New York – 1952.
- 3 **R. J. Helmig** «Hochgradige plastische Umformung durch Equal Channel Angular Pressing (ECAP)». – Habilitationsschrift, TU Clausthal. – 2008.
- 4 **R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov** «Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation». – Prog. Mater. Sci. 45 – 2000.– P. 103–189.
- 5 **Talant Ryspaev, Miloš Janeček, Robert Král, Lothar Wagner** «Processing, Superplastic Properties and Friction Stir Welding of Fine-Grained AZ31, AZ91, AE42 and QE22 «Magnesium Alloys». – Materials Science Forum. – January, 2016. – P. 220–224; P. 838–839. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.838-839.220.
- 6 **Talant Ryspaev, Miloš Janeček, Peter Minárik, Volker Wesling** «Grain Renement after Various Thermo-Mechanical Treatments in AZ80 and ZK60 Magnesium Alloys» – Acta Physica Polonica Series a 122(3). September 2012. – DOI:10.12693/APhysPolA.122.622.
- 7 **Talant Ryspaev, Z. Trojanova, Oksana Padalka, Volker Wesling** «Microstructure of superplastic QE22 and EZ33 magnesium alloys». Materials Letters. – 62(24). – September 2008. – P. 4041–4043. – DOI: 10.1016/j.matlet.2008.05.063.
- 8 **Volker Wesling, Talant Ryspaev, A. Schram.** «Effect of overageing temperature on the superplastic behaviour in magnesium alloys». – Materials Science and Engineering A 462(1). – July 2007. – P. 144–148. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.03.152.
- 9 **Z. Száraz, Z. Trojanova, Talant Ryspaev, Volker Wesling** «Superplasticity of an AZ91 Magnesium Alloy». – January, 2008. – Materials Science Forum P 567-568:365–368. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.567-568.365.
- 10 **K. Mathis, J. Gubicza, N.H. Nam** Journal of Alloys and Compounds . – 395 (2005). – 194 p.

Material received on 17.12.21

*\*Т. А. Рыспаев*

Университет прикладных наук Анхальта,  
Германия, г. Кётен  
Материал поступил в редакцию 17.12.21.

## ПРОИЗВОДСТВО НАНОСТРУКТУРНЫХ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПО РКУП-ПРОЦЕССУ

*Интенсивно изучаемый в настоящее время процесс РКУП был выбран для создания наноструктурированных магниевых сплавов. Потенциал данного процесса формования был продемонстрирован двумя сплавами магния AZ91 и AE42. После 8 проходов РКУП в AE42 и AZ91 был достигнут средний размер*

зерна 2 мкм и 0,45 мкм соответственно. Эта разница между размерами гранул АЕ42 и АЗ91 еще раз подтверждает влияние выпадения в осадок на размер частиц, поскольку содержание алюминия в АЗ91 примерно в два раза выше, чем в АЕ42, что также составляет около половины выпадений Mg17Al12 в АЕ42.

Таким образом, РКУП-деформация промышленных магниевых сплавов АЗ91 и АЕ42 приводит к формированию мелкозернистой микроструктуры. Хорошо видно, что средний размер зерна сплава АЗ91 меньше, чем у сплава АЕ42 после каждого использованного прохода РКУП. Эти исследования, а также результаты экструзии и ротационной штамповки этих двух сплавов, подтверждают что, помимо эффектов измельчения зерна в процессе РКУП, наличие выделений вторых фаз также оказывает большое влияние на структуру зерна и размер зерна. Поскольку содержание алюминия в сплаве АЕ42 примерно вдвое меньше, чем в АЗ91, что составляет примерно половину выделений Mg17Al12 в АЕ42, ультрамелкозернистая микроструктура в АЗ91 усилена частицами  $\beta$ -фазы, выделенными при тех же температурах перестаривания и экструзии 300 °С.

Ключевые слова: процесс РКУП, магниевые сплавы, структура, состав алюминия, металл.

**Т. А. Рыспаев**

Анхальт қолданбалы ғылымдар университеті,  
Германия, Котен қ.  
Материал баспаға 17.12.21 түсті.

### РКУП-ПРОЦЕСС БОЙЫНША НАНОҚҰРЫЛЫМДЫ МАГНИЙ ҚОРЫТПАЛАРЫН ӨНДІРУ

Қазіргі уақытта қарқынды зерттелген РКУП процесі наноқұрылымды магний қорытпаларын жасау үшін таңдалды. Бұл қалыптау процесінің потенциалы магнийдің екі АЗ91 және АЕ42 қорытпаларымен көрсетілді. АЕ42 және АЗ91-де 8 РКУП өткеннен кейін астықтың орташа мөлшері сәйкесінше 2 мкм және 0,45 мкм-ге жетті. АЕ42 және АЗ91 түйіршіктерінің өлшемдері арасындағы бұл айырмашылық жауын-шашынның бөліктердің мөлшеріне әсерін тағы бір рет растайды, өйткені АЗ91 алюминий мөлшері АЕ42-ге қарағанда екі есе жоғары, бұл АЕ42-де Mg17Al12 түсуінің жартысына жуығын құрайды.

Осылайша, РКУП АЗ91 және АЕ42 өнеркәсіптік магний қорытпаларының деформациясы ұсақ түйіршікті микроқұрылымның пайда болуына әкеледі. АЗ91 қорытпа дәнінің орташа мөлшері әрбір пайдаланылған РКУП өткеннен кейін АЕ42 қорытпасынан аз екендігі айқын көрінеді. Бұл зерттеулер осы екі қорытпаны экструзиялау және айналмалы штамптау нәтижелерін растайды, бұл РКУП процесінде астықты ұсақтау әсерінен басқа, екінші фазалық разрядтардың болуы да астық құрылымы мен астық мөлшеріне үлкен әсер етеді. АЕ42 қорытпасындағы алюминий мөлшері АЗ91-ге қарағанда шамамен жартысына тең болғандықтан, АЕ42-де Mg17Al12 шығарындыларының жартысына жуығы болғандықтан, АЗ91-дегі ультра-түйіршікті микроқұрылым бірдей температурада және 300 °С экструзияда шығарылған  $\beta$ -фазалық бөліктермен күшейтіледі.

Кілтті сөздер: РКУП процесі, магний қорытпалары, құрылымы, алюминий құрамы, металл.

Теруге 17.12.21 ж. жіберілді. Басуға 27.12.21 ж. қол қойылды.  
Электрондық баспа  
5,07 Mb RAM  
Шартты баспа табағы 9,15 Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.  
Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан  
Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 3875

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған  
Торайғыров университеті  
140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы  
Торайғыров университеті  
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.  
67-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz  
nitk.tou.edu.kz