

# AZ80+3%Li 鎂合金時效處理之研究

\*林泓霆<sup>1</sup> 王伯政<sup>1</sup> 林新智<sup>1</sup> 鄭達謙<sup>1</sup> 林昆明<sup>2</sup> 葉明堂<sup>3</sup>

<sup>1</sup>台灣大學材料科學與工程研究所

<sup>2</sup>逢甲大學材料科學與工程研究所

<sup>3</sup>安立材料科技股份有限公司

本實驗主要研究AZ80+3wt%Li鎂合金，針對其擠製材之基本性質進行分析，並將此AZ80+3wt%Li鎂合金進行熱處理(T6處理)，探討其析出強化行為和機械性質。實驗結果顯示，此合金的密度僅有 $1.71\text{g/cm}^3$ ，添加鋰有效降低合金的密度。在室溫下，無法固溶於母材中的鋰元素傾向和鋁結合形成AlLi相，這也使得AZ80+3wt%Li鎂合金擠製材相對於AZ80有較佳的延展性。同時，AZ80+3wt%Li鎂合金經 $450^\circ\text{C}$ 持溫24小時固溶處理之後，於 $110^\circ\text{C}$ 、 $170^\circ\text{C}$ 和 $230^\circ\text{C}$ 時效處理，亦呈現明顯的析出強化，於 $110^\circ\text{C}$ 時效32小時可以達到最高強度 $373\text{MPa}$ ，硬度也可以達到Hv115.5，此時的析出相則為AlLi相。

**關鍵字：**鎂合金、鋰、熱處理、析出強化

## 1.前言

近年來全球在結構材的選用都趨向輕量化、省能源以及符合環保需求，因此輕金屬的重要性便與日俱增。鎂合金具有高比強度、質輕比彈性係數佳等優點，再加上礦藏量豐富、再回收性佳，可取代車輛之部分構件以節省能源耗損，亦可用於自行車上以達到減重的目的。另一方面，鎂合金擁有良好的制震能、優異的散熱性及電磁遮蔽性(EMI)，在3C產品，例如：相機、筆記型電腦、手機、電視等，皆已開始大幅採用鎂合金，使其成為下一世代最環保的材料【1.2】。

鎂合金之產業發展具高度潛力，商用鎂合金又以AZ系列鎂合金為主，鎂中添加鋁元素會和鎂形成介金屬化合物 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ ，可以有效提高鎂合金的強度增加其實用性。AZ80是目前已經商業化的鍛造型鎂合金，因其具有高強度與價格便宜等優點，故應用發展上受到國內外產學研究之高度重視，並積極研發AZ80鍛造型鎂合金之相關製程與應用技術，且已獲得相當不錯的研究成果【3-7】。

AZ80鎂合金雖然已經商業化，但仍然存在有需多缺點。包括延展性不佳，增加鍛造的困難度；導熱導電性下降；銲接性不良；

密度 $1.8\text{g/cm}^3$ ，尚嫌稍高等。這些缺點預期可以藉由添加少量鋰元素而獲得改善。鋰元素的密度只有 $0.53\text{g/cm}^3$ ，少量添加可以明顯降低AZ80鎂合金的密度；鋰元素固溶於鎂合金中可以降低鎂基材的c/a ratio(晶軸比值)，增加其延展性；鋰原子擴散速率快，應該可以提高合金之導電、導熱率；鋰在高溫時有助於MgO之還原，因而可以改善其銲接性。然而，添加少量鋰元素雖然可以改善AZ80的部分缺點，但是也可能產生其他不良因子，例如，機械強度變差、抗腐蝕性下降等，這些皆需進一步的實驗與分析。

P.C.Wang【13.14】指出，於AZ80中添加2wt%鋰元素可以有效提升AZ80的延展性，而合金在 $170^\circ\text{C}$ 和 $250^\circ\text{C}$ 經過適當的熱處理之後會分別析出AlLi和 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ ，可以有效提升合金的硬度和抗拉強度。由該文獻中可以知道，在低溫析出的AlLi相尤其對於提升鎂合金的機械性質有相當正面的幫助。本實驗在鎂合金中添加3wt%的鋰元素以了解AlLi相對於鎂合金析出強化的機制與效果，並了解其對抗腐蝕性的影響；另一方面，添加2wt%鋰元素能夠有效提升合金的延展性，本實驗將探討，鋰元素的添加量增加對於延展性是否依然有線性的提升。並藉由熱

處理強合金的機械性質，以期望提升延展性的同時維持適當的強度。

## 2. 實驗方法

本實驗所使用之材料為安立公司提供。利用真空感應熔煉法 (vacuum induction melting, VIM) 配製 AZ80+3%Li 鎂合金。將欲加入的合金元素放入坩堝中，待原料完全熔融均勻後進行澆鑄，待溫度降低後便可通入氬氣以破真空進行拆模。其重量密度經量測為  $1.71\text{g/cm}^3$ ，合金利用 ICP-AES 分析之化學成份如表 1 所示，與配製之標稱成分差異不大。鑄造空冷至室溫，於  $330^\circ\text{C}$  持溫六個小時後擠製加工製成直徑 60mm 之圓棒，即為擠製材。鑄造空冷至室溫之鎂合金在  $450^\circ\text{C}$  持溫 24 小時固溶處理後，在分別經過  $110\sim 230^\circ\text{C}$ ，時效 0.5~128 小時。即為 T6 處理。最後再將試片製作成適當規格，再進行所需的相關試驗。

表一 AZ80+3%Li 之 ICP-AES 成分分析。

Element	Mg	Li	Al	Zn
Wt%	Bal.	3.13	7.56	0.71

表二 大顆粒析出之 EPMA 成分分析(wt%)。

Element	Mg	Al	Zn
wt%	62.82	36.81	0.37

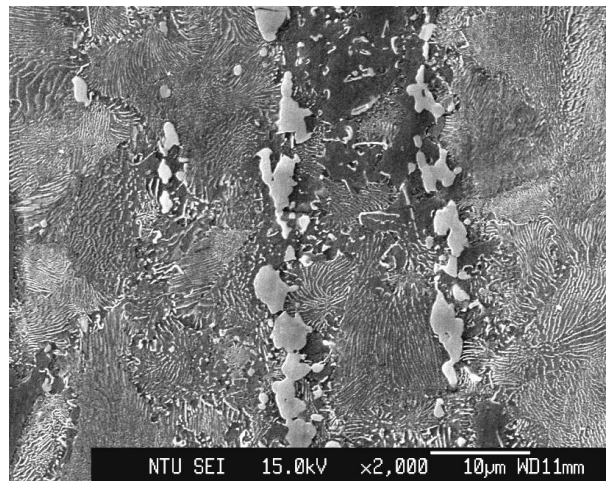
合金之微觀組織應用掃描式電子顯微鏡 (SEM) 做金相觀察。應用 X 光繞射儀 (XRD) 鑑定合金之晶體結構，XRD 之繞射源使用銅靶之  $K\alpha$  射線，其特徵波長  $\lambda=1.5406\text{\AA}$ ，操作電壓與電流分別為 40KV 與 30mA。應用拉伸試驗則用以檢測其抗拉強度與斷裂應變等機械性質，拉伸試片依 ASTM E8-01 標準規範製作【1.2】，拉伸試片之長軸係平行於擠製方向。合金之時效程序是先將合金至於真空爐中，於  $450^\circ\text{C}$  進行固溶處理與水淬，再施以  $110^\circ\text{C}\sim 230^\circ\text{C}$  之時效處理，之後再進行

相關特性之檢測和分析。本實驗之固溶處理時間為 24 小時，而時效時間為 0~128 小時。

## 3. 結果與討論

### 3.1 AZ80+3%Li 鎂合金擠製材之基本性質

圖一為 AZ80+3%Li 鎂合金擠製材之 SEM 微觀組織，圖中顯示，深色部分是  $\alpha$ -Mg 母材，淺色的部分是有析出物的地方，可分為沿擠製方向排列之大顆粒析出物(初晶  $\beta$  相， $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ )和細小的共晶組織( $\alpha$ -Mg+AlLi)兩種型式。鑄造的降溫過程中，顆粒狀的析出物會從能量較高的晶界處開始出現，隨著溫度繼續下降，形成如圖中層狀的共晶組織。合金在擠製前先於  $330^\circ\text{C}$  持溫六個小時。在這個溫度下， $\beta$  相會穩定存在並慢慢成長；共晶組織會緩慢減少但因時間不足而沒有完全消失。大顆粒狀的析出物由 EPMA 鑑定結果如表二所示，為  $\beta$  相  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 。另外，由微硬度量測得知  $\alpha$  相：Hv75.6， $\alpha$ -Mg+AlLi：Hv81.9，結果顯示  $\alpha$ -Mg+AlLi 雙相之硬度大於  $\alpha$ -Mg 之硬度值，此結果是因為 AlLi 具有比  $\alpha$  相高的硬度，其硬度值大約為 Hv78~83 左右。

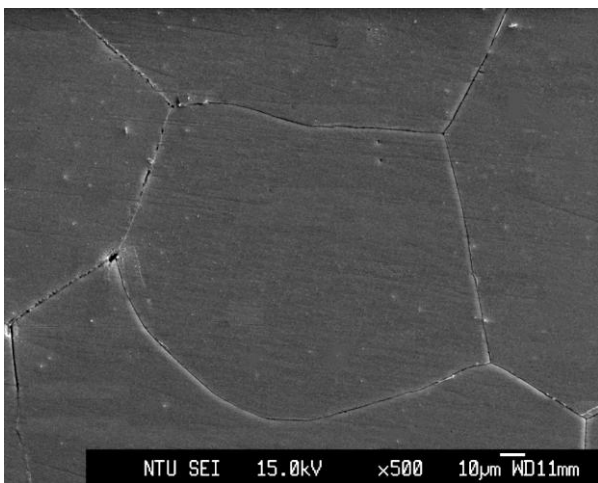


圖一 AZ80+3%Li 鎂合金擠製材之 SEM。

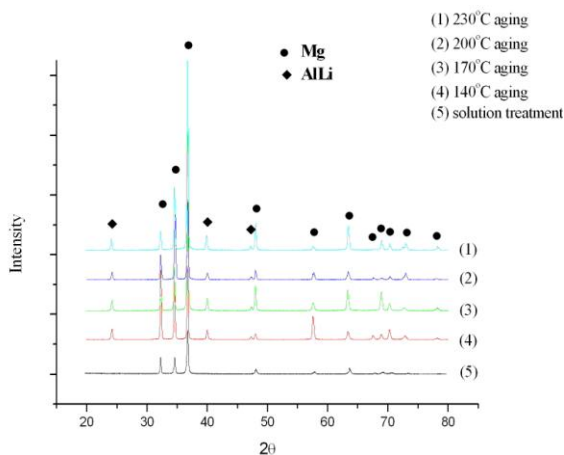
### 3.2 AZ80+3%Li 鎂合金之晶體結構分析

AZ80+3%Li 鎂合金主要含有 Al 和 Li 等合金元素，根據 Mg-Al-Li 三元相圖所示，在

室溫下 AZ 系列鎂合金中鋰的固容量只有 1.4wt% 左右，所以擠製材中合金合金主要由  $\alpha$ -Mg 基材和長條狀 AlLi 相所組成。圖二為 AZ80+3%Li 鎂合金經過 450°C 持溫 24 小時固溶處理之 SEM 圖，圖中只有單相的  $\alpha$ -Mg，鋁和鋰元素皆完全固溶於鎂基材中。圖三為此合金經過各種處理後的 XRD 結構分析圖，結果和預期相同。時效過程中無論溫度是 140°C 或 230°C 都是析出 AlLi 相。而強化則取決於析出的形貌與數量。



圖二 AZ80+3%Li 450°C 24hr 固溶處理之 SEM 圖。



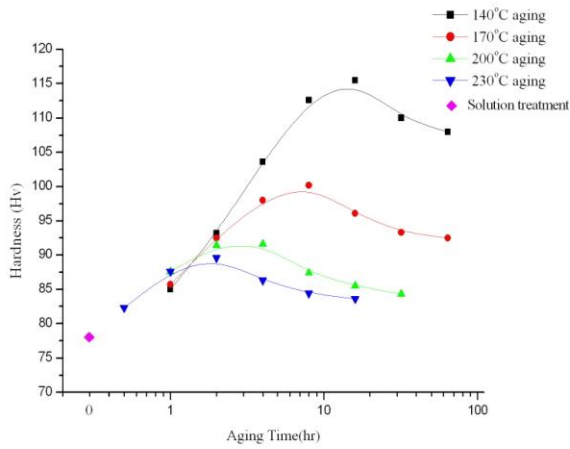
圖三 AZ80+3%Li 鎂合金 T6 處理之 XRD 結構分析。

### 3.3 AZ80+3%Li 鎂合金之析出強化行為

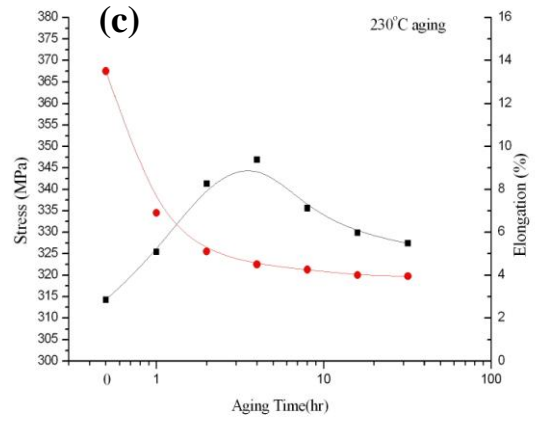
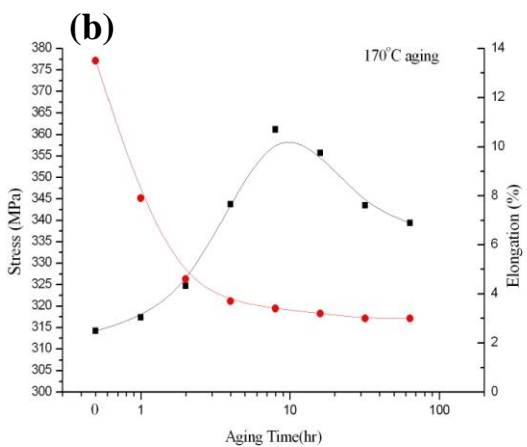
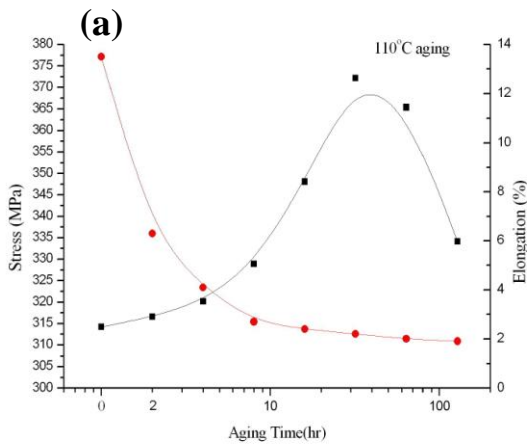
圖四為 AZ80+3%Li 鎂合金於 140°C、

170°C、200°C、230°C，T6 處理，其微硬度與時效的時間關係圖。由圖中可以知道，當合金進行固溶處理之後，微硬度值為 Hv76.5 左右。在經過 140°C，16hr 時效處理之後，硬度大幅上升至 Hv115.5 達到最大值。這是因為 AlLi 相隨著時間增加，大量析出的效應。和固溶狀態相比硬化率達到 50% 左右，效果非常顯著。而且因為鋰原子的擴散非常快速，AlLi 相析出所需花費的時間不長，在實務上有一定的價值。隨著時效的時間繼續增加，AlLi 相繼續成長而產生過時效的現象，使得硬度值微幅下降。經過 64 小時時效後，硬度降至 Hv108 而約略達到定值，過時效軟化的程度不算嚴重。140°C 時效可能最高硬度 Hv115.5，隨著時效溫度的提升，最高的硬度值也跟著往下掉，從 170°C 的 Hv99.2 降至 200°C 的 Hv91.3 和 230°C 的 Hv89.6。再提高溫度雖然可以繼續降低時效所需的時間，但是會使合金和擠製材的 Hv81.9 太過接近而失去價值。圖五(a-c)為 AZ80+3%Li 鎂合金於 110°C、170°C、230°C T6 處理，其抗拉強度與時效時間的關係圖。由圖所示，其析出強化的效果非常明顯。在時效初期，抗拉強度上升較緩慢，原因和析出硬化的結果相同，都是因為析出物由晶界析出，緩慢往晶粒內部延伸的關係。接著強度上升而達到最大值，持續持溫之後因為過時效而使得強度下降，是典型的析出強化曲線。在 110°C 時效 32 的小時的抗拉強度可以從 314MPa 提升到 373MPa，強化效果達到接近 20%。170°C 和 230°C 時效也可以達到 361MPa 和 347MPa，皆高於擠製材的 324MPa，達到析出強化的效果。在析出的過程中，延展性大幅下降，當達到一個定值後就約略達到定值而不隨時效時間的持續拉長而改變。圖六(a-c)為個別時效溫度時效 16 小時的 SEM 顯微組織，由圖中可以發現，110°C 時效的析出物間距只有 0.07 $\mu$ m 左右，比 170°C 和 230°C 的析出物間距 0.11 $\mu$ m 左右明顯窄了許多。因為鋁元素在合金中擴散的速度有限，當時效溫度較低

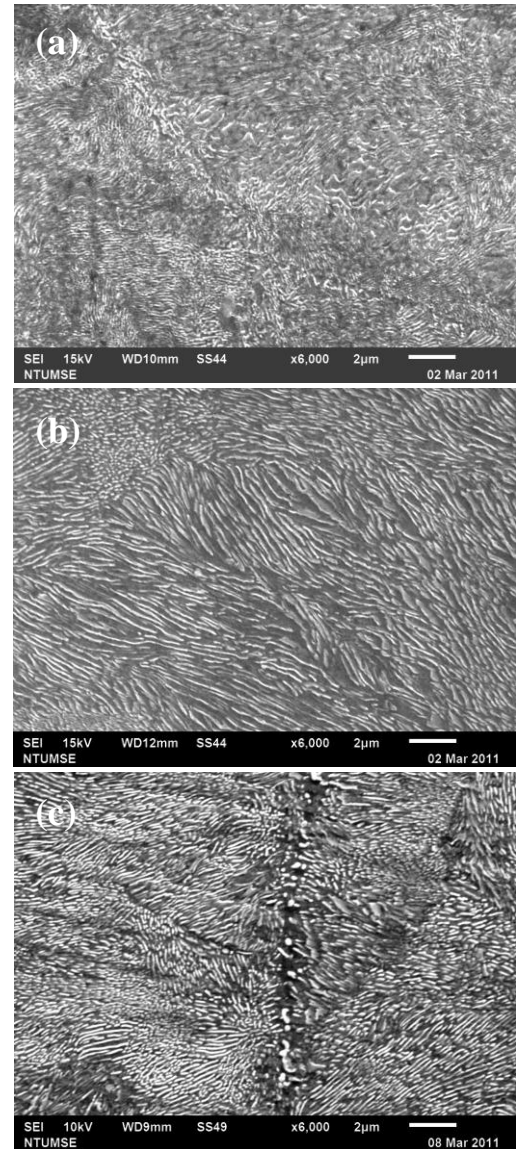
時，鋁元素無法有效擴散而在鄰近的空孔處和鋰元素析出形成 AlLi 析出物。隨著溫度提高，鋁元素的擴散速度較快才有足夠時間形成較大、較少的顆粒。



圖四 AZ80+3%Li 鎂合金之微硬度與時效時間關係圖。



圖五 AZ80+3%Li 鎂合金 T6 處理抗拉強度與時效時間圖 (a)110°C (b) 170°C (c) 230°C。



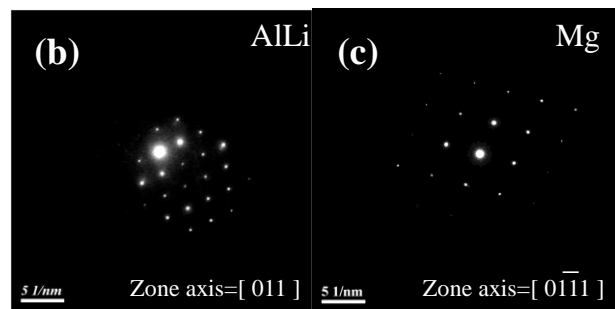
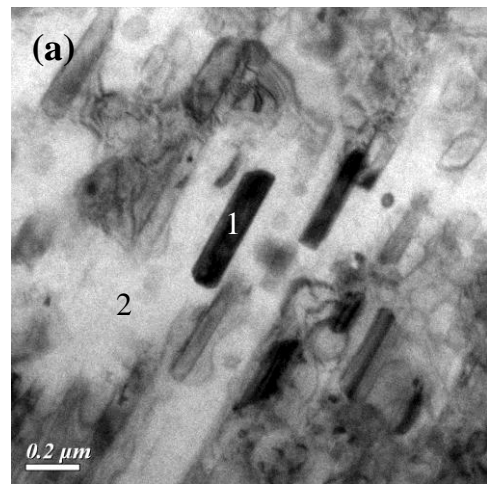
圖六 AZ80+3%Li 鎂合金於 T6 處理之 SEM 顯微組織(a)110°C 時效 16hr (b) 170°C 時效 16hr (c) 230°C 時效 16hr。

### 3.4 AZ80+3%Li鎂合金之析出強化行為

由鎂-鋁-鋰三元相圖可以發現，在 T6 處理當中，當時效溫度越低時析出物會傾向更高比例的 AlLi 相，而相反的在高溫析出則有機會出現  $\beta$  相  $Mg_{17}Al_{12}$ ，為了確定在整個析出強化的研究當中析出物都是相同的相，我們需要做更進一步的鑑定與分析。圖七(a)為 T6 處理於  $230^{\circ}C$  時效 16 個小時之後的 TEM 影像。由圖中知道，電子束較容易穿透母材，呈現較淺的灰白色；而析出物會和電子束產生較強烈的繞射而呈較暗的黑灰色，為長條形的黑色圓棒狀。析出物相當細小，大約只有  $0.1\mu m * 0.5\mu m$ 。圖七(b)為析出物的繞射圖形(diffraction pattern)，Zone axis 為  $[011]$  方向，可以計算出析出物結構之晶格常數  $a=6.67 \text{ \AA}$  約等於理論值  $6.37 \text{ \AA}$ ，誤差值約為 4.7%，可以確定析出物為 FCC 結構之 AlLi 相。而圖七(c)是母材的繞射圖形，確定為 HCP 結構的  $\alpha$ -Mg，Zone axis 為  $[0\bar{1}\bar{1}1]$  方向。

### 4. 結論

1. 根據相圖，在室溫下鋰元素於 AZ 系列鎂合金的固容量只有 1.4wt% 左右，其他無法固溶於鎂基材中的鋰會傾向和鋁形成 AlLi 相。其擠製材晶粒只有  $20\mu m$  左右， $\beta$  相和 AlLi 析出會沿著擠製方向整齊排列。擠製材之密度僅有  $1.71g/cm^3$ ，抗拉強度也可維持  $324.6MPa$ 。
2. AZ80+3wt%Li 鎂合金經  $450^{\circ}C$  持溫 24 小時固溶處理之後，於  $110^{\circ}C$  到  $230^{\circ}C$  時效處理，皆呈現明顯的析出強化。於  $140^{\circ}C$  時效 16 小時可以達到最高硬度 Hv115.5，而在  $110^{\circ}C$ 、 $170^{\circ}C$  和  $230^{\circ}C$  分別時效 32 小時、8 小時和 4 小時，分別可以達到強度  $373MPa$ 、 $361MPa$  和  $347MPa$ ，但是合金之延展性會下降至 2~4%，此時的析出相則為 AlLi 相。



圖七 AZ80+3%Li 鎂合金 T6 處理  $230^{\circ}C$  16 小時之 TEM 圖(a)image(b)1-析出物之繞射圖形 (c)2-母材之繞射圖形。

### 致謝

感謝 國科會 之 經費 支助  
(NSC97-2221-E-002-034-MY3)

### 參考文獻：

1. 黃雨順，冶金熱處理，(1981) 354。
2. 楊智超，鎂合金材料特性及新製程發展，工業材料，152 (1999) 72。
3. P. Zhang and J. Lindemann, Scripta Materialia, Influence of shot peening on high cycle fatigue properties of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80, 52 (2005) 485.
4. P. Zhang and J. Lindemann, Scripta Materialia, Effect of roller burnishing on the high cycle fatigue performance of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80, 52 (2005) 1011.

5. F. Andreatta, I. Apachitei, A.A. Kodentsov, J. Dzwonczyk, J. Duszczyk, *Electrochimica Acta*, Volta potential of second phase particles in extruded AZ80 magnesium alloy, 51 (2006) 3551.
6. J. Swiostek, D. Letzing, and K. U. Kainer, *Hydrostaying, Metal Science and Heat Treatment*, extrusion at 100°C and its effect on the grain size and mechanical properties of magnesium alloys, 48 (2006) 11.
7. Y. Uematsu, K. Tokaji, M. Kamakura, K. Uchida, H. Shibata and N. Bekku, *Mater. Materials Science and Engineering A. A*, Effect of extrusion conditions on grain refinement and fatigue behaviour in magnesium alloys , 434 (2006) 131.
8. P.C. Wang, C.C. Lin, T.Y. Huang, H.C. Lin Y.H. Lee, M.T. Yeh and J.Y. Wang, Effects of 2 mass% Li addition on the AZ80 Mg alloy, *Materials Transactions* 49 (2008) 913-917
9. P.C. Wang, M.C. Lin, H.C. Lin, K.M. Lin, M.T. Yeh, C.Y. Lin, Effects of aging treatment on microstructure and mechanical property of an AZ80N Magnesium alloy, *Material Science and Engineering A*, 527 (2010) 4076-4081.
10. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, Designation: E 8M-01.