

Magnezyum levha alaşımlarının üretimi ve geliştirilmesi

Özgür DUYGULU*, Onuralp YÜCEL, Ali Arslan KAYA

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Türkiye'nin ilk magnezyum alaşımı levhası, ikiz merdaneli sürekli döküm tekniği ile üretilmiştir. Magnezyum AZ31, AZ61, AZ91, AM50 ve AM60 alaşımı levhalar 4-8 mm kalınlığında, 1500 mm eninde başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Levhalar daha sonra homojenleştirme ısıl işlemlerine maruz bırakılmıştır. Levhaların mikroyapıları yüzey, en ve boy yönlerinde optik mikroskop ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Daha detaylı mikroyapı incelemeleri Geçirimsiz Elektron Mikroskobu (TEM) ile yapılmıştır. Yarı nicel ve nicel elementel analizler SEM-EDS (Enerji Dağılım Spektrometresi), TEM-EDS ve EPMA (Elektron Prob Mikro Analiz Cihazı)-WDS (Dalgaboyu Dağılım Spektrometresi) sistemleri ile yapılmıştır. X-ışınları difraksiyonu (XRD) teknikleri karakterizasyon ve yönlenme incelemeleri amaçlı olarak kullanılmıştır. Malzemelerin mekanik özellikleri çekme deneyi ve sertlik deneyleri ile ölçülmüştür. Çekme deneyleri hadde yönü, hadde yönüne 45 derece açı ve 90 derece açı olmak üzere üç farklı yönde ekstensometre yardımı ile yapılmıştır. Ayrıca numune yüzeylerinde ve farklı kesitlerde mikro Vickers ve Brinell Sertlik taramaları yapılmıştır. Elde edilen levhalar üzerinde soğuk hadde, sıcak hadde ve ısıl işlem gibi termomekanik işlemler denemeleri de gerçekleştirilmiştir. Levhalar öncelikle laboratuvar ölçeğinde sıcak hadde ile inceltmişlerdir. Daha sonra elde edilen bilgiler ışığında magnezyum AZ31 alaşımı levhalar ısıtıldıktan sonra endüstriyel ölçekli hadde sistemi ile 1 mm kalınlığa kadar inceltilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında otomotiv, savunma ve elektronik endüstrileri için uygun magnezyum levha alaşımlarının üretimi olası gözükmektedir.

Anahtar Kelimeler: Magnezyum alaşımları, levha, ikiz merdaneli sürekli döküm.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Özgür DUYGULU. ozgur.duygulu@mam.gov.tr; Tel: (262) 677 30 40.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Magnezyum levha alaşımlarının üretimi ve geliştirilmesi " adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 14.07.2009 tarihinde dergiye ulaşılmış, 03.09.2009 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.11.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Production and development of wrought magnesium alloys

Extended abstract

Magnesium alloy sheet has been produced by twin roll strip casting first time in Turkey. Magnesium AZ31, AZ61, AZ91, AM50 and AM60 alloy sheets of 4-8 mm thick, 1500 mm wide were successfully achieved. Afterwards, homogenization heat treatments were applied on the sheets. Microstructures of the sheets have been analysed by optical microscope and scanning electron microscope, SEM by plan, longitudinal and transverse views. More detailed microstructure investigation was analysed by transmission electron microscope, TEM. Semi-quantitative and quantitative elemental analyses has been performed by SEM-EDS (Energy Dispersive Spectrometer), TEM-EDS and EPMA (Electron Probe Micro Analyser)-WDS (Wavelength Dispersive Spectrometer) systems. XRD (X-ray Diffraction) techniques are used for both characterization and also texture purposes. Mechanical properties have been investigated by tensile tests and also hardness measurements. Tensile tests have been performed at three different directions: rolling direction, 45 degrees to rolling direction and transverse direction by using an extensometer. Micro Vickers and Brinell Hardness test measurements were done on plan view and different cross-section directions. In addition, produced sheets were investigated by cold rolling, hot rolling and annealing tests. From the results of this study production of wrought magnesium alloys suitable for automotive, military and electronics industries seems possible.

Magnesium is the lightest of all structural metals with a density of 1.74 g/cm³. Aluminum is 1.5 times, titanium is 3 times and iron is 4 times of magnesium in density. Magnesium alloys have high specific strength, high specific stiffness, good castability and machinability, low heat content per unit of volume, high damping capacity, and good electro-magnetic (EMI) shielding. Magnesium is dimensionally stable, it welds easily, and it has impact and dent resistant. It is the sixth most abundant metal and eighth element on the earth's surface. Furthermore, magnesium is readily recyclable. Magnesium alloys also have effective heat dissipation.

Due to these properties, there is increasing interest in using magnesium alloys especially in electronics and transportation industries. Almost 30% of the applications are structural applications (portable electronic equipment, such as laptop computers, cellular phones and video cameras; military equipment; aircraft parts; sporting goods and hand tools.

Recently, using magnesium alloys that are lighter than aluminum alloys are being investigated for the automotive industry. Magnesium alloys are already used within the automotive interior as instrumental panel substrate, seat frame, seat riser, seat pan, console bracket, steering wheel, steering column parts; in the power train as valve cover, transmission cases; in the body as door and roof frames, sunroof panel, mirror bracket, tailgate; in the chassis as wheel, brake pedal brackets.

High flexural/buckling stiffness and bending strength are needed for automotive body components such as doors, boot, and bonnet. VW 3L Lupo bonnet is a good prototype example for future application of magnesium sheets. Other possible wrought alloy automotive applications are extruded profiles such as window frames, seat and supporting structures. Magnesium components are usually produced by the die casting process. In spite of cost effective, the die casting process is not suitable for manufacturing large flat parts, such as hood, door, and lift-gate substrates. Also, mechanical properties of the cast parts, particularly fatigue resistance, can be substandard. Parts requiring good mechanical properties and fatigue endurance strength are best produced from wrought alloys. Replacement of conventional sheet metals with magnesium can reduce the vehicle mass, thus promote energy efficient transportation. By using wrought magnesium alloys, a decrease in vehicle weight up to 100 kg and a reduction of 5 % fuel consumption can be realized.

Application of wrought magnesium alloys especially in the form of sheet is limited due to the price of conventional rolling product. However, the demand for decreasing the magnesium sheet prices is high and can be met through twin-roll casting.

Keywords: Magnesium alloys, sheet, twin roll casting.

Giriş

20. yüzyıl boyunca başarılı ve ilginç uygulamalara konu olmuş magnezyum alaşımları hızla gelişme göstermekte ve 21. yüzyılın metalik malzemeleri arasında sayılmaktadır. 1.74 gr/cm^3 özkütlesi ile alüminyumdan % 36, çelikten % 78 daha hafif olan magnezyum alaşımları, yapısal metaller arasında en hafif olanıdır (Avedesian ve Baker, 1999). Magnezyum alaşımları yüksek spesifik mukavemet, iyi dökülebilirlik, işlenebilirlik ve bükülmezlik özelliklerine sahiptir. Bunların yanı sıra elektromanyetik etkenlere karşı iyi bir kalkan olan magnezyum alaşımları, iyi sönümlenme kapasitesine sahiptir ve ısıyı çok iyi dağıtabilmektedir (Avedesian ve Baker, 1999; Aghion ve Eliezer, 2004; Beck, 1943; Duygulu vd., 2006, Emley, 1966; Kainer, 2003; Polmear, 1995; Watari vd., 2007).

Magnezyum alaşımları çok iyi dökülebilirlik özelliği göstermektedir. Magnezyum 1-1.5 mm et kalınlığına kadar (alüminyuma kıyasla yarı yarıya daha ince) dökülebilen bir metaldir (Naiyi, 2005). Magnezyum için geçerli döküm yöntemleri soğuk ve sıcak kamaralı yüksek basınçlı döküm, yarı-katı döküm yöntemleri (thixocasting, thixomolding ve rheocasting), saurma döküm, sürekli döküm ve kum dökümdür (Duygulu vd., 2006).

Magnezyum yoğurma (wrought) alaşımları hadde ürünleri (plaka, levha ve folyo), ekstrüzyon (çubuk, boru ve profil) ve dövme mamullerdir. Yoğurma alaşımları döküm alaşımlarına göre daha iyi mekanik özellikler göstermektedir. Mukavemetleri ve süneklikleri döküm alaşımlarına göre ve hatta rakip malzemelere göre daha yüksektir. Yüksek eğme dayancısı ve bükülmezlik gerektiren kapı, kaput ve bagaj kapağı gibi geniş dış panel saclarında magnezyum alaşımlarının kullanımı çeliğe göre % 50, alüminyuma göre % 20 ağırlık kazancı sağlayabilecektir (Avedesian ve Baker, 1999; Aghion ve Eliezer, 2004; Beck, 1943; Emley, 1966; Kainer, 2003; Polmear, 1995).

Magnezyum yoğurma (wrought) alaşımlarının mekanik özellikleri otomotivdeki birçok uygulamaya elverişlidir. Yeni alaşım bileşimleri ge-

liştirmek ve farklı şekillendirme yöntemlerinin potansiyelini ortaya koymak amacıyla yoğurma alaşımları üzerinde çok kapsamlı araştırmalar sürmektedir. Bu alandaki en önemli cephe, çift merdaneli döküm sistemleri ile direkt levha döküm çalışmalarıdır (Ding vd., 2007).

Konvansiyonel külçe haddesi ile levha üretimi, ergitme → külçe → homojenleştirme ısı işlemi → haddeleme → ısıtma → sıcak haddeleme (tekrarlı) → ılık haddeleme (tekrarlı) → soğuk haddeleme → yaşlandırma tavı gibi oldukça fazla işlem adımından oluşmaktadır. Fazla sayıda işlem içeren bu döküm tekniğinde zaman ve enerji tüketimi oldukça yüksektir (Ding vd., 2007).

Sürekli döküm tekniği, döküm ve sıcak haddelemenin tek bir adımda gerçekleştiği bir işlem olup, magnezyum alaşımı levha dökümü için alternatif bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Ekonomik bir yöntem olmasının yanı sıra yapıdaki segregasyon oranının azaltılması, inklüzyon boyut dağılımının ve mikroyapısal homojenliğin iyileştirilmesi gibi mikroyapı üzerinde oldukça faydalı etkileri vardır (Ding vd., 2007).

Dünya üzerindeki pek çok endüstriyel kurum, üniversite ve araştırma kurumu magnezyum alaşımları için sürekli döküm teknolojisi ile ilgili laboratuvar ve pilot çaplı veya endüstriyel ölçekli denemeler gerçekleştirmişlerdir. Başta Kore olmak üzere (POSCO, RIST, University of Seoul) Çin (Chongqing University, Northeast University ve General Research Institute of Nonferrous Metals), Almanya (Thyssen Krupp MgF Magnesium Flachprodukte GmbH), Avustralya (CSIRO), Kanada (McGill University) ve Japonya'daki bazı enstitü ve fabrikalarda çift merdaneli ince kesit sürekli döküm incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar kapsamında şimdiye dek; Kore'de POSCO firması 530 mm genişliğinde 0.4-4.3 mm kalınlığında AZ31 levha, Almanya, Thyssen Krupp MgF Magnesium Flachprodukte GmbH firması bünyesinde 5-6 mm kalınlığında magnezyum alaşımı bilet ve 4-7 mm kalınlığında ve 700 mm genişliğinde AZ31 levha, Çin, Luoyang Copper Co. firması bünyesinde 6-8 mm kalınlığında ve 600 mm ge-

nişliğinde AZ31 levha, Japonya'da AZ31, AM60, AZ61 ve AZ91 alaşımları levhalar ve Avustralya, CSRIO bünyesinde ise 2.3-5 mm kalınlığında ve 100-600 mm genişliğinde AZ31, AZ61, AM60 ve AZ91 alaşımı levhalar üretilmiştir (Ding vd., 2007; Park vd., 2004; Kang vd., 2008; Kawalla vd. 2008; Watari vd., 2006; Watari vd., 2007; Liang ve Cowley, 2004).

Bu çalışma ile çeşitli döküm denemeleri sonrası magnezyum AZ31, AZ61, AZ91, AM50 ve AM60 alaşımı levhalar 4-8 mm kalınlığında, 1500 mm eninde ve bu metotla dünyada en geniş olmak üzere üretilmiştir (Kaya vd., 2008; Duygulu vd., 2009).

Bu çalışmanın amacı ise konvansiyonel döküme alternatif olan çift merdaneli sürekli döküm tekniği ile Türkiye'de ilk kez yapılacak AZ31 alaşımı levha dökümünü gerçekleştirmek, üretilen levhanın mekanik özellikler bakımından geliştirilmesi ve irdelenmesi ve nihayet ülke sanayisine yeni ve öncü bir güç kazandırmaktır. Yapılan endüstriyel ölçekli çalışma bizzat yerli endüstri ile işbirliği içinde gerçekleştirilmiş ve ticarileştirilmiştir.

Materyal ve yöntem

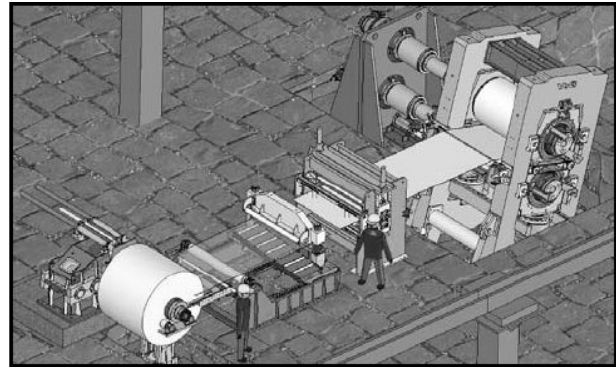
Çift merdaneli sürekli döküm tekniği ile magnezyum levha dökümü denemeleri magnezyum AZ31, AZ61, AZ91, AM50 ve AM60 alaşımı levhalar 4-8 mm kalınlığında, 1500 mm eninde levhalar onlarca metre uzunluğunda başarı ile döküldükten sonra döküm işlemi durdurulmuştur (Kaya vd., 2008; Duygulu vd., 2009).

Konvansiyonel külçe haddesi ile levha üretimi son derece pahalı bir yöntem olduğu için magnezyumun üstün özelliklerine rağmen Mg-levha halen geniş çaplı bir endüstriyel tüketime sahip değildir. Çift merdaneli direkt levha dökümü ise haddeleme kademelerini minimuma indirecek ve ekonomik sağlayacak yegâne yöntemdir (Ding vd., 2007).

Sistem sıvı metalin homojen bir sıcaklık dağılımı ile katılaşmanın gerçekleşeceği merdane yüzeylerine taşınması ve burada bir taraftan sürekli olarak katılaştırılması ve diğer taraftan levhanın sarıma girmesi (veya istenilen boylarda periyodik olarak

kesilmesi) esasına dayanır. Merdaneler su soğutmalıdır ve işlem süresince belirli bir hızda dönmektedir. Sıvı metal sıcaklığı, ergitilen alaşım bileşimi, sıvı metali merdaneler üzerine akıtan seramik 'ağız (tip)' dizaynı, seramik ağzın dudaklarının minimum merdane açıklığına olan mesafesi, merdane sıcaklığı ve döküm hızı (merdane dönüş hızı), merdane açıklığı gibi çoklu ve birbirine bağımlı parametrelerin kontrolünü gerektiren bir döküm prosesidir. Buradan direkt olarak levha elde edildiği için külçe haddelemesine dayanan geleneksel levha üretim teknolojisine kıyasla çok daha ekonomik üretim yapılabilir (Ding vd., 2007).

Mikroyapı olarak daha iyi ve deformasyona izin veren malzeme elde edilebildiğinden bu yöntemle üretilen kalınlıkların altındaki levha ürünlere az sayıdaki konvansiyonel hadde kademelerine başvurarak gidilebilmekte ve yine daha ekonomik üretim yapılabilir (Ding vd., 2007). Şekil 1'de çift merdaneli döküm sistemi şematik olarak verilmektedir. Şekil 2'de ise üretim esnasında görüntülenen magnezyum levhaya ait fotoğraf verilmektedir.



Şekil 1. Çift merdaneli döküm sisteminin şematik gösterimi

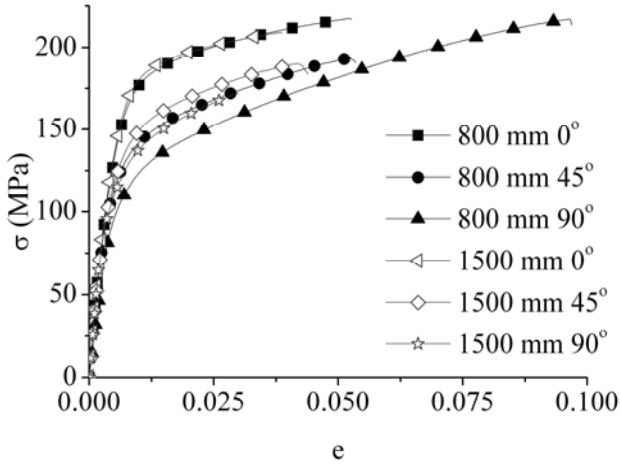
Deneyisel çalışma sonuçları

Elde edilen 800 mm ve 1500 mm enindeki magnezyum AZ31 alaşımı levhaların hadde yönünde (0°), hadde yönüne 45° ve hadde yönüne 90° açılarda hazırlanmış numunelerin mühendislik çekme testi diyagramları Şekil 3'te, sıcak hadde ve ılık hadde denemelerinden elde edilen mühendislik çekme testi diyagramları ise Şekil 4'te verilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere işlem görmemiş levhaların ortalama çekme mu-

kavemetleri 200 MPa iken bu değer sıcak haddelenmiş 1500 mm'lik levha için 270 MPa ve ılık haddelenmiş 1500 mm'lik levha için 250 MPa seviyelerine ulaşmıştır. Aynı şekilde, % uzama değerleri hadde sonrası maksimum % 5'lerden % 13'e çıkmıştır.

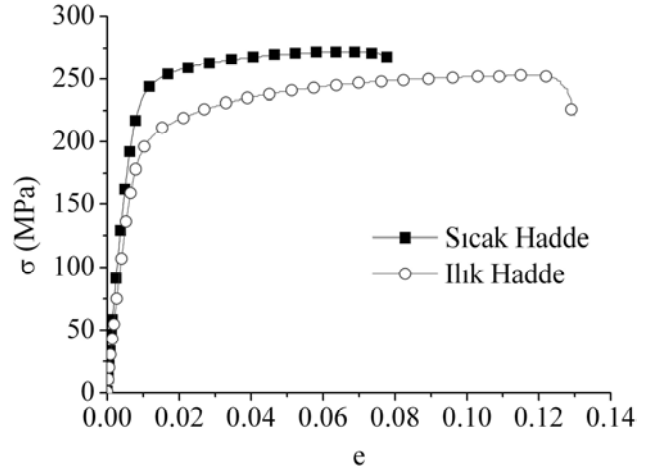


Şekil 2. Üretim esnasında görüntülenenen magnezyum levhaya ait fotoğraf



Şekil 3. Elde edilen 800 mm ve 1500 mm enindeki magnezyum AZ31 alaşımı levhaların hadde yönünde (0°), hadde yönüne 45° ve hadde yönüne 90° açılarda hazırlanmış numunelerin mühendislik çekme testi diyagramları

Ayrıca 200 g yük ile yapılan mikro-Vickers sertlik deneyleri sonuçlarına göre işlem görmemiş levhaların sertlik değeri ortalama 75 HV olarak ölçülürken haddelenmiş levhalarda 80 HV'e kadar değerler elde edilmiştir. Tüm bu mekanik değerler literatürden elde edilen değerler seviyesindedir (Kang vd., 2008).



Şekil 4. 1500 mm enindeki levhanın sıcak hadde ve ılık hadde denemelerinden elde edilen mühendislik çekme testi diyagramları

Sonuçlar

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Magnezyum elastisite modülü nispeten düşük ve dolayısıyla pek (stiff) bir metal olmasının yanı sıra yapısal metaller arasında en yüksek mukavemet/ağırlık (spesifik mukavemet) oranına sahiptir. Yapısal metallerin en hafifi olması, tamamen geri dönüşebilir olması, yüksek şekillendirme kabiliyeti, ses ve titreşim soğurma ve yüksek göçüklenme direnci özellikleri ile otomotiv endüstrisi için oldukça avantajlı olan magnezyum alaşımlarının sürekli dökümünün oldukça zor olduğu bilinmektedir.
- TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü tarafından çeşitli döküm denemeleri sonrasında magnezyum AZ31, AZ61, AZ91, AM50 ve AM60 alaşımı levhalar 4-8 mm kalınlığında, 1500 mm eninde üretilmiş ve tesis ve bilgi olarak endüstriyel uygulamaya aktarılmıştır.
- Üretilen magnezyum AZ31 alaşımı levhalar sıcak hadde ile 1 mm kalınlığa kadar inceltilebilmiştir.

Semboller

- HV : Mikro-Vickers sertlik birimi
 MPa : Mega Pascal (Mukavemet birimi)
 σ : Gerilme (MPa)
 e : Gerinim

Kaynaklar

- Aghion, E. ve Eliezer, D., (2004). *Magnesium alloys, science, technology and applications*, Hafnia, Israel.
- Avedesian, M.M. ve Baker, H., (1999). *Magnesium and magnesium alloys*, ASM Specialty Handbook, ASM International, Ohio.
- Beck, E., (1943). *The technology of magnesium and its alloys*, London, Hughes, F.A. and Co. Limited.
- Emley, E.F., (1966). *Principles of magnesium technology*, Pergamon, Oxford.
- Ding, P., Jiang, B., Wang, J. ve Pan, F., (2007). Status and development of magnesium alloy thin strip casting, *Materials Science Forum*, **546-549**, 361-364.
- Duygulu, Ö., Oktay, G. ve Kaya, A.A., (2006). *Magnezyum alaşımlarının otomotiv sanayisinde kullanımı*, OTEKON'06 Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa, TÜRKİYE, 24-28.
- Duygulu, Ö., Üçüncüođlu, S., Oktay, G., Temur, D.S., Yücel, O. ve Kaya, A.A., (2009). Development of 1500mm wide wrought magnesium alloys by twin roll strip casting technique in Turkey, *Magnesium Technology 2009*, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), San Francisco, CA, USA, 385-390.
- Liang, D. ve Cowley, C.B., (2004). The twin roll strip casting of magnesium, *Journal of Materials Processing Technology*, **56**, 5, 26-28.
- Naiyi, L., (2005). Magnesium advances and applications in North America automotive industry, *Materials Science Forum*, **488-489**, 931-935.
- Kainer, K.U., (2003). *Magnesium alloys and technology*, Wiley-VCH.
- Kang, S.B., Chen, H., Kim, H.W. ve Cho, J.H., (2008). Effect of reheating and warm rolling on microstructure and mechanical properties of twin roll strip cast Mg-4.5Al-1.0Zn-0.4Mn-0.3Ca alloy sheet, *Magnesium Technology 2008*, TMS 2008, USA, 147-152.
- Kaya, A.A., Duygulu, Ö., Üçüncüođlu, S., Oktay, G., Temur, D.S. ve Yücel, O., (2008). Production of 150cm wide AZ31 Magnesium sheet by twin roll casting, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **18**, 185-188.
- Kawalla, R., Oswald, M., Schmidt, C., Ullmann, M., Vogt, H.P. ve Cuong, N.D., (2008). Development of a strip-rolling technology for mg alloys based on the twin-roll-casting process, *Magnesium Technology 2008*, TMS 2008, USA, 177-182.
- Park, S.S., Lee, J.G., Lee, H.C. ve Kim, N.J. (2004). Development of wrought Mg Alloys via strip casting, *Magnesium Technology 2004*, TMS 2004, Charlotte, North Carolina, U.S.A. 14-182.
- Polmear, I.J., (1995). *Light Alloys, metallurgy of the light elements*, Arnold, London.
- Watari, H., Haga, T., Davey, K., Koga, N. ve Yamazaki, T., (2006). Effects of production parameters on characteristics of magnesium alloy sheets manufactured by twin-roll casting, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, **16**, 1-2, 171-176.
- Watari, H., Haga, T., Koga, N. ve Davey, K., (2007). Feasibility study of twin roll casting process for magnesium alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, **192-193**, 300-305.