

MAGNEZYUM AZ31 ALAŞIMININ
SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Recep BULUT

Yüksek Lisans Tezi

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Haziran-2009

MAGNEZYUM AZ31 ALAŞIMININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Recep BULUT

Dumlupınar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine EĞitimi Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman : Yrd.Doç. Dr. Mustafa AYDIN

Haziran-2009

KABUL ve ONAY

Recep BULUT'un YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı; Magnezyum AZ31 alaşımının sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilebilirliğinin incelenmesi başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

...15/06/2009.....
(Sınav tarihi)

Üye: Prof.Dr. Adem KURT

Üye: Doç. Dr. Rahmi ÜNAL

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa AYDIN (Danışman)

Fen Bilimleri Enstitüsün Yönetim Kurulu'nun/...../..... gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Atalay KÜÇÜKBURSA

MAGNEZYUM AZ31 ALAŞIMININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Recep BULUT

Makine Eğitimi, Yüksek Lisans Tezi, 2009

Tez Danışmanı: Yrd. Dç. Dr. Mustafa AYDIN

ÖZET

Bu çalışmada haddelenmiş AZ31 magnezyum alaşım levhalarının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebilirliği incelenmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağında 960, 1960, 2880 dev/dak dönme hızı ve 10, 20 mm/dak, ilerleme hızı seçilerek farklı parametrelerde kaynak yapılmıştır. Deneyde karıştırıcı uç ile ana metal arasında oluşan sıcaklıkların malzemenin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Deneysel çalışmanın sonunda, devir sayısının artışıyla birlikte dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgede sıcaklığın yükseldiği tespit edilmiştir. Bunun sonucu olarak dinamik olarak yeniden kristalleşmiş bölge sertliği ana malzemenin sertliğinden daha düşük ölçülmüştür. Kaynaklarda mikroyapı ise dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgede ana malzemeye göre daha ince ve homojen tane yapısı tespit edilmiştir. Çekme deneyi sonucunda kaynaklı bağlantıların mukavemeti ana malzemeye göre % 93'lük bir kaynak mukavemet değeri vermiştir. Deneyler sonucunda en iyi bağlantı 1960 dev/dak ve 20 mm/dak hızındaki yapılan kaynak numunelerinde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: AZ31, Magnezyum Alaşımı, Sürtünme Karıştırma Kaynağı, Mekanik Özellikler

THE INVESTIGATION OF WELDABILITY OF THE AZ31 MAGNESIUM ALLOYS BY FRICTION STIR WELDING

Recep BULUT

Graduate School of Applied and Natural Sciences, M.S.Thesis, 2009

Thesis Supervisor: Assist. Prof. Mustafa AYDIN

SUMMARY

In this study, the weldability of rolled AZ31 magnesium sheets has been investigated by friction stir welding. Samples have been welded at different welding parameters such as the 960, 1960 and 2880 rpm rotational speeds and 10 and 20 mm/min transverse speeds. In the experiment shown that the temperatures of between of the friction stir welding shoulder and materials affect mechanical and microstructure properties. In the recrystallization zone temperature has been increased the increase of rotational speed. According to these results, the hardness of recrystallization zone has been measured higher than base material. The microstructure of recrystallization zone, because of recrystallization has been thinner and homogenous than base material. At this results of stress strength test has been detected 93% compared with that of base material. As a result, the highest welding strength has been obtained with A22 coded sample, 1960 rpm rotational speed and 20 mm/min transverse speed.

Key Words: AZ31, Magnesium Alloy, Friction Stir Welding, Mechanical Properties.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada yol gösteren ve karşılaştığım problemlerde maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Yrd. Dç. Dr. Mustafa AYDIN'a, D.P.Ü. Makine Mühendisliği Bölümü öğretim elemanlarına, deneysel çalışmalarımın SEM, çekme ve eğme deneylerini yapmamda büyük emeği geçen Osmangazi Üniversitesi Metalürji Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Yrd. Dç. Dr. Bedri BAKSAN'a, optik resimlerin çekiminde yardımcı olan Afyonkocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine ve Metal Eğitimi Bölümü hocalarıma teşekkür ederim. Bu çalışmanın yapılması D.P.Ü. Bilimsel Araştırma Proje Başkanlığının 2008-6 nolu projenin desteğiyle tamamlanmıştır.

Beni yetiştirip bu günlere gelmemde büyük emeği olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL ONAY.....	iii
ÖZET.....	iv
SUMMARY.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1.GİRİŞ.....	1
2. MAGNEZYUM.....	2
2.1. Magnezyum elementi.....	2
2.2. Magnezyumun Doğada Bulunuş Şekli.....	2
2.3. Magnezyumun Elde Edilme Yöntemi.....	3
2.4. Magnezyum Alaşımlarının Üretim Yöntemleri	4
2.4.1. Magnezyum Döküm Alaşımları.....	4
2.4.2. Dövme Magnezyum Alaşımları.....	4
2.5. Magnezyum Alaşımları ve Standartları.....	5
2.6. Magnezyum Alaşımlarının Temel Özellikleri.....	6
2.7. Alaşım Elementlerinin Magnezyum Alaşımına Etkisi.....	7
2.7.1. Alüminyum.....	7
2.7.2. Çinko.....	8
2.7.3. DiğerElementler.....	8
2.8. Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Alanları.....	10
3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KAYNAK YÖNTEMLERİ.....	14
3.1. Magnezyum Alaşımlarının TIG Kaynağı.....	14
3.2.Dökme Parçaların Tamir Kaynağı.....	15
3.3. Magnezyum Alaşımlarının MIG Kaynağı.....	15
3.4. Magnezyum Alaşımlarının Elektron Işın Kaynağı.....	15
4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI	17
4.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Yapılışı	17

İÇİNDEKİLER(Devam)

	<u>Sayfa</u>
4.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Uç Tipleri.....	18
4.2.1. Whorl™ Serisi Pimler (Baticı Uçlar)	18
4.2.2. MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ Serisi Pimler (Baticı Uçlar) ...	19
4.2.3. Skew-Stir™ ve A-Skew™ Serisi Pimler (Baticı Uçlar).....	21
4.3. SKK’da Kaynak Metalürjisi.....	23
4.4. Kaynak Bölgesinin Mekanik Özellikleri.....	26
4.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantajları ve Dezavantajları.....	27
4.6. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulama Alanları.....	28
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	31
5.1. Kullanılan Malzeme	31
5.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması	31
5.3. Kullanılan SKK uç tipleri.....	32
5.4. SKK kullanılan takım tezgahı	32
5.5. Kaynak yapılacak malzemenin tezgaha sabitlenmesi	33
5.6. SKK parametrelerinin belirlenmesi	34
5.7. SKK kaynağının yapılışı.....	34
5.8. Mekanik ve metalografik numunelerin hazırlanması.....	35
5.9. Mekanik Testler.....	37
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR.....	39
6.1 Çekme deney sonuçları.....	39
6.2 Eğme deney sonuçları.....	45
6.3 Mikrosertlik deney sonuçları.....	51
6.4 Mikroyapı sonuçları.....	53
7. SONUÇLARVE ÖNERİLER.....	57
7.1.Sonuçlar.....	57
7.2.Öneriler.....	58

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Mg-Al denge diyagramı.....	7
2.2. Mg-Zn denge diyagramı.....	8
2.3. Otomobil üretiminde Mg alaşımından dökülmüş parçalar.....	11
2.4. AZ alaşımı döküm parçaları.....	11
2.5. AM alaşımı döküm parçaları.....	12
2.6. WE43 alaşımından dökülmüş helikopter vites kutusu.....	12
2.7. Li katkılı Mg alaşımı döküm parçaları.....	13
4.1. Sürtünme Karıştırma Kaynak Takımı Şematik Gösterimi.....	18
4.2. Çeşitli Whorl™ Konfigürasyonları.....	19
4.3. 75 mm Kalınlığındaki AA6082T6 Alaşımının Kaynağında Whorl™ Takımını Kullanılması, Kaynağın Bitmiş Hali ve Kaynak Dikişinin Görüntüsü.....	19
4.4. MX Triflute™ Pimin Esin Kaynağı Deniz Kabuklarıdır MX Triflute™ Serisi Pimin Resim ve Şematik Çalışma Şekli.....	20
4.5. MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ Dizaynları.....	20
4.6. Flared Triflute Probe ile Yapılmış Olan Bindirme Kaynağında Kaynak Ara Yüzeyinin Görünümü.....	21
4.7. Skew-Stir Metodunun Çalışma Prensipleri ve A-Skew Ucunun Resmi.....	22
4.8. Whorl™ ve MX Triflute™ Takımlarının Omuz Profilleri.....	22
4.9. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan iç yapının şematik Görünümü.....	23
4.10. Sürtünme karıştırma kaynağında batıcı ucun eğik konumda daldırılması ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesi.....	25
4.11. Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Gerçekleştirilen Birleştirmeler.....	26
4.12. Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış kaynağın kaynak bölgesinin kesiti.....	27
4.13. Alüminyum Ekstrüzyon Panellerinin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesi.....	30
4.14. Shuttle External Tank Projesi ve Marshall Space Flight Center Laboratuvarlarındaki Sürtünme Karıştırma Kaynak Sistemlerinden Görüntüler.....	30

ŞEKİLLER DİZİNİ(Devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.1. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılacak pim ve ölçüleri.....	32
5.2. SKK Kaynağında Kullanılan Freze Tezgahı.....	33
5.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağının yapılışı.....	35
5.4. EN 288-3' e göre numunelerin levhadaki dağılımı.....	36
5.5. EN 288-3' e göre numunelerin levhadaki dağılımı (kesilmeden önce).....	36
5.6. EN 288-3' e göre numunelerin levhadaki dağılımı (kesildikten sonra).....	37
5.7. Haddelenmiş AZ31 Mg alaşımının çekme deneyi.....	38
6.1. Haddelenmiş AZ31 Mg alaşımının A00 kodlu çekme deney grafiği	39
6.2. SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A11 kodlu çekme deney grafiği	40
6.3. SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A12 kodlu çekme deney grafiği	40
6.4. SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A21 kodlu çekme deney grafiği	41
6.5. SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A22 kodlu çekme deney grafiği	42
6.6. SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A31 kodlu çekme deney grafiği	43
6.7. SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A32 kodlu çekme deney grafiği	43
6.8. Farklı devir ve ilerleme hızlarında yapılan kaynakların yüzey görünümü	44
6.9. Farklı devir ve ilerleme hızlarında yapılan kaynakların yüzey görünümü; a) 960 dev/dak, 20 mm/dak (A12), b)1964 dev/dak, 20 mm/dak (A22), c) 2880 dev/dk, 20 mm/dak(A32).....	45
6.10. A2.2 çekme deney sonrası görünüşü	45
6.11. Haddelenmiş AZ31 Mg alaşımının A00 kodlu eğme deney grafiği.....	46
6.12. SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A11 kodlu eğme deney grafiği.....	46
6.13. SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A12 kodlu eğme deney grafiği.....	47
6.14. SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A21 kodlu eğme deney grafiği.....	48
6.15. SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A22 kodlu eğme deney grafiği.....	48
6.16. SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A21 kodlu eğme deney grafiği.....	49
6.17. SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A32 kodlu eğme deney grafiği.....	50
6.18. Eğme deney grafikleri.....	51
6.19. Farklı SKK parametrelerin de oluşan sıcaklık değişimleri	53
6.20. a) A2.2 SEM görüntüsü b) A1.1 SEM görüntüsü.....	55
6.21. SKK ile 2880 dv/dk ve 10mm/dk kaynak şartlarındaki birleşimi ve optik mikroyapıları.....	55
6.22. SKK kaynağı yapılan AZ31 mg alaşımının kaynaktan sonraki mikroyapıları	56

ÇİZELGE DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Alaşım elementleri ve kısaltmaları.....	5
2.2. Mg alaşımları standartları ve bileşimleri.....	6
5.1. AZ31 alaşımının kimyasal bileşimi ve oranları.....	31
5.2. SKK kaynak parametreleri.....	34
6.1. SKK kaynak parametreleri ve çekme mukavemeti	44
6.2. Farklı SKK parametrelerin de oluşan mikrosertlik değişimleri.....	52

1. GİRİŞ

Magnezyum, günümüzde uçak ve uzay endüstrisi başta olmak üzere konstrüksiyon malzemesi olarak kullanılan metalik malzemeler içinde en hafif olanıdır. Ağırlık olarak magnezyum (Mg), Alüminyum (Al)'dan % 36, Demir (Fe) ve çelikten % 78 daha hafiftir [1]. Yoğunluğu ve buharlaşma özellikleri bakımından plastiklere benzetilirken, aynı zamanda bir metalin mekanik özelliklerine de sahiptir. Yakıt verimliliği ve performans artırımı için yoğunluk, dayanım ve rijitlik avantajı bakımından aranan bir malzeme olmuştur. Ayrıca, magnezyum mühendislik plastiklerine göre çok daha katı ve çok daha fazla geri dönüşümü mümkün bir malzemedir. Düşük ağırlık kadar önemli olan geri dönüşebilirlik, dünya hammadde ve enerji kaynaklarının korunması için malzeme seçiminde etken bir faktör haline gelmiştir [2]. Magnezyum, özellikle Al ve Zn başta olmak üzere, toprak alkali metaller ve de eser miktardaki Si, Y, Ca, Sr, Ba, Sb, Sn, Pb ve Bi gibi elementlerle alaşımlandırma yapılarak, mekanik özellikleri artırılmakta ve ortaya koyduğu performansla kullanım sahası giderek artırılmaktadır. Silikon (Si) yaklaşık % 0.2 – 0.5 civarlarında alaşımın sünekliğini, yitrium (Y) elementi ise genelde % 1, maksimum ise % 2 civarlarında alaşımın sürünme direncini arttırmak amacıyla Mg – Al – Zn alaşımlarına eklenmektedir [3].

Avrupa Birliği'nin hedefi otomobillerde kullanılacak malzemelerin, 2015 yılına kadar % 95 geri dönüşebilir malzemelerden üretilmesidir. Japonya'da ise yeni otomobillerde 2015 yılına kadar % 95 geri dönüşebilir malzeme kullanımı zorunlu hale getirilmiştir. Japon taşıtlarında bugün Mg çok hızlı bir şekilde diğer metallerin yerini almaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde de otomobil üretiminde Mg kullanımı artarak gelişmektedir. Bu konudaki gelişmeler Alman otomobilleri için de geçerlidir [2]. Mg bu sektördeki gelişimi, malzemenin birleştirme ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Birleştirme yönteminin gelişimi malzeme türünün kullanım alanlarını da geliştirmektedir. Bu nedenle de en iyi birleştirme yönteminin tespit edilmesi gerekmektedir. Kaynak yöntemlerinde, ergitmeli kaynaklardaki olumsuzluklar nedeniyle ergitmesiz kaynak yöntemine yönelinmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı ergitmesiz bir kaynak yöntemi olup, günümüzde kullanımı hızla gelişmektedir.

Bu çalışmada, kullanım alanı giderek yaygınlaşan Mg alaşımlarında AZ31 alaşımı yeni bir kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma (SKK) kaynağı ile birleştirilmeye çalışılmıştır.

2. MAGNEZYUM

2.1 Magnezyum Elementi

Mg, yapısal uygulamalarda kullanılabilen en hafif metaldir [4]. Element ilk olarak Sir Humphrey Davey tarafından 1808 yılında keşfedilmiştir. Yerkabuğunun % 2.7'sinde ve Okyanusların % 0.13'ünde bulunması sebebiyle Mg, yer kabuğunda yaygın olarak bulunan ve Periyodik Tablo da IIA grubunda yer alan toprak alkali elementtir [2]. Magnezyum elementinin özelliklerini şu şekilde belirtebiliriz [3].

Simgesi	: Mg
Atom numarası	: 12
Atom ağırlığı	: 24.312
iyon değeri	: +2
Kaynama noktası	: 1107 °C
Ergime noktası	: 650 °C
Yoğunluğu	: 1.74gr/cm ³
Kristal yapısı	: hekzagonal
Atom yarıçapı	: 1.60 Å (12 koordinasyon sayılı metalik durumda)
İyon yarıçapı	: 0.65 Å (6 koordinasyon sayılı kristaldeki)
Atom hacmi	: 14.0 (atom ağırlığı/yoğunluk)
Özgül ısısı	: 0.25 cal/g °C
Isı iletkenliği	: 0.38 cal/cm ² , s.cm.°C (oda sıcaklığın da)
Erime ısısı	: 2.14 kcal/atom gram
Kaynama noktası	: 32.517 kcal/atom gram
Asid-Baz özelliği	: baz

2.2 Magnezyumun Doğada Bulunuş Şekli

Magnezyum, gümüş renkli, hafif ve parlak bir metaldir. Havada hemen mat renkli ince bir oksit tabakası ile kaplanır. Yaklaşık 500 °C 'ın üzerindeki bir sıcaklığa ısıtıldığında parlak bir alev ile yanarak MgO'e dönüşür [5]. Kolaylıkla şekil verilip ince plaka haline getirilebilir. Magnezyum elementine, refrakter malzemelerin temel niteliğini kazandıran husus oksijene olan yüksek ilgisi ve oksijen ile meydana getirmiş olduğu MgO'in 2800 °C sıcaklıklara kadar ergimeyip katılığını muhafaza edebilmesidir. Oksijen ve tabiattaki en yaygın oksijen bileşiği olan SiO₂ ile daha kolay bileşik meydana getirebilmektedir. Yüksek kimyasal reaksiyon

kabiliyetinden dolayı tabiatta saf olarak magnezyuma rastlanmamaktadır. Bu sebeple tabiattaki bilinen magnezyum minerallerinin yaklaşık 2/3 'ü silikatlardan oluşmaktadır [3].

Magnezyum elementinin doğada asıl bulunuş şekli, suda çözünmeyen bir cisim olan, dolomit $\{(Mg,Ca)CO_3\}$ ve Magnezit ($MgCO_3$) ile suda çözünen ve kaya tuzu maden ocaklarında, kaya tuzunun üzerindeki tabakaları oluşturan $MgCl_2$ ve $MgSO_4$ ve bunların potasyum bileşikleriyle yaptıkları çifte tuzlar olan Kainit ($KCl.MgSO_4.3H_2O$), Sönit $\{K_2SO_4.MgSO_4.6H_2O\}$ ve Karnalit ($MgCl_2.KCl. H_2O$)'tir. Aspest ise önemli bir magnezyum kaynağıdır. Bundan başka magnezyum karışık silikatlar sekinde Talk'ı ve Amyant'ı oluşturur. Deniz suyunda % 0.127 magnezyum metali bulunur [6].

Ekonomik olarak kazanılabilir magnezyum minerali 11 ülkede ve bu ülkelerdeki 38 önemli yatakta mevcut bulunmaktadır. Türkiye'de ise magnezit yataklarının önemli bir bölümü Konya-Kütahya-Eskişehir üçgeninde bulunmakta olup, geri kalanı Erzincan, Çankırı ve diğer illerde dir [2].

2.3 Magnezyumun Elde Edilme Yöntemi

Magnezyumun elde edilmesi; ergimiş magnezyum klorürün ($MgCl_2$) indirgenme prensibine göre elektrolizi, dolomitten kimyasal yollarla kalsinasyon, presipitasyon (çökeltme) ve klorinasyon yöntemleri ile veya doğrudan tuzlu sulardan magnezyum oksidin (MgO) termal redüksiyonu ile yapılır. $MgCl_2$ 'ün elektrolizi için 25 MJ/kg elektrik enerjisine ihtiyaç varken, elektrolitik hücre içindeki bazı etkilerden dolayı akım verimliliği sınırlanır ve gerekli enerji 40-80 MJ/kg olur. Bütün magnezyum üreticileri bu değeri en çok 40 MJ/kg veya daha altında tutmaya çalışmaktadırlar. Bir karşılaştırma yapılırsa, elektroliz yöntemi ile Al_2O_3 'den alüminyum metal üretimi için 47 MJ/kg enerji gerekmektedir. Magnezyum üretimi için gerekli toplam enerji yaklaşık 125 MJ/kg iken, hacimce düşünülüğünde magnezyum üretimi alüminyum üretiminden daha az enerji gerektirmektedir. Ancak magnezyumun bir ileri kademe daha indirgenmesi için alüminyumdan daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır [3].

Dünyada toplam üretimin % 75 'i elektroliz tesislerinde, geri kalan % 25 'i silikotermik yöntemlerle yapılmaktadır. Magnezyum, klorür redüksiyonunda metalik magnezyum ve klorürün olarak ortaya çıkar. Magnezyum döküm ingotları sekinde katı halde, klorür ise gaz halinde bulunur. Magnezyumun üretildiği başka bir metot ise magnezyum oksidin silisyum ile redüksiyonudur. Bu süreçte ferro silisyum katı halde magnezyum oksitle reaksiyona girer ve yüksek sıcaklık, düşük basınç koşullarında magnezyum gaz hale geçer. Reaktörün soğutucularında magnezyum kristalleri kondense olurlar. Bu kristaller ergitilip, ingotlar halinde

dökülürler. Ancak, magnezyum ve alaşımlarının kullanımını sınırlayıcı önemli faktör olan korozyon özellikleri, yüksek saflıkta üretilen alaşımlarla iyileştirilebilmektedir. Düşük yoğunluk ve ergitme sıcaklığı diğer alternatif metallere göre dökümde ve talaşlı imalatta önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Örneğin, magnezyumun lityum elementi ile yaptığı alaşım süper hafif bir alaşımdır (1.3 gr/cm^3). Bu kadar düşük yoğunluğa rağmen lityum içeren Mg ve Al alaşımlarının özgül elastisite modülü çeliğe göre daha yüksektir [6].

2.4 Magnezyum Alaşımlarının Üretim Yöntemleri

Magnezyum genellikle diğer metallerin üretildiği metotlarla şekillendirilir. Üretim metodunun seçiminde malzemedeki beklenen optimum özellikler dikkate alınmalıdır. Magnezyum için en uygun şekillendirme yöntemi yüksek basınçlı pres döküm ve ekstrüzyon yöntemleridir [3].

2.4.1 Magnezyum döküm alaşımları

Magnezyum alaşımları için birçok değişik döküm yöntemi uygulanmaktadır. Bu yöntemler soğuk ve sıcak kamaralı döküm, savurma döküm, sürekli döküm ve kum dökümdür. Farklı magnezyum alaşımları için farklı yöntemler uygulanmakta ve bu alaşımlar farklı mekanik özellikler göstermektedir. Genellikle magnezyum alaşımları, otomobil parçalarında, uzay endüstrisinde ve elektrik-elektronik sanayinde kullanılmak üzere pres döküm tekniği ile üretilirler. Pres döküm yönteminin genel avantajları; yüksek üretilebilirlik, yüksek hassasiyet, iyi döküm yüzeyi, ince kesitli ve karmaşık şekilli parçaların üretimi gibi üstünlükleri bulunmaktadır. Döküm yönteminin magnezyum alaşımlarının üretimindeki en önemli avantajı ise hafiflik, yüksek özgül dayanım, iyi işlenebilirlik, iyi dökülebilirlik, düşük ergime sıcaklığı ve düşük ergitme enerjisi olarak ortaya çıkmaktadır [7].

2.4.2 Dövme magnezyum alaşımları

Dövme magnezyum alaşımları haddelenmiş levha veya folyo, ekstrüzyon (çubuk, boru ve şekilli parçalar) ve yapısal uygulamalar için dövme mamuller olarak üretilir. Bu dövme magnezyum alaşımlarının en önemli avantajı düşük fiyat, yüksek mukavemet ve sünekliktir. Ayrıca döküm haline göre mekanik özellikler bakımından daha fazla alanda kullanılma özelliğine sahiptir. Dövme magnezyum alaşımlarının diğer bir üretim yöntemi ise hızlı katılaştırma [6].

2.5 Magnezyum Alaşımları ve Standartları

Mg alaşımları ASTM (A275) standart sistemi tarafından belirlenmiştir. Yöntem iki harfle birlikte iki rakamı kapsamaktadır. İki harf; iki en büyük elemanına verilmiş olan harf kısaltması; rakamlar ise bu alaşımların en yakın tam sayıya yuvarlanmış yüzdeleridir. Çizelge 2.1’de yaygın bir şekilde kullanılan alaşım elementleri tek harfle listelenmiş şekilde verilmiştir [2].

Çizelge 2.1 Alaşım elementleri ve kısaltmaları

Harf	A	B	C	D	E	H	J	K	L	M	Q	S	W	X	Z
Element	Al	Bi	Cu	Cd	RE	Tr	Sr	Zr	Li	Mn	Ag	Si	Yi	Ca	Zn

Örnek : AZ31 alaşımının açıklaması aşağıda verilmektedir.

A ⇒ Al’yi yani Mg’den sonra alaşımdaki en fazla elementi ifade eder.

Z ⇒ Zn’yi yani 2. olarak en fazla kullanılan elementi ifade eder.

3 ⇒ Alaşımdaki Al oranının yaklaşık % 2.5-3.5 arasında olacağını ifade eder.

1 ⇒ Alaşımdaki Zn oranının yaklaşık % 0.7-1.3 arasında olacağını ifade eder.

Mg alaşımları ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94 de göre standartları Çizelge 2.2’de gösterilmiştir [2].

Çizelge 2.2 Mg alaşımları standartları ve bileşimleri [2].

Alaşım Elementi	Mg Alaşımları								
	AM50	AM60	AS21	AS41	AZ31	AZ80	AZ91	ZE10	ZK60
Al	4.5-5.3	5.6-6.4	1.9-2.5	3.7-4.8	2.5-3.5	7.8-9.2	8.5-9.5	0.05 max	0.05 max
Zn	0.20 max.	0.20 max.	0.15-0.25	0.10 max.	0.7-1.3	0.2-0.8	0.45-0.90	1.0-1.5	4.8-6.2
Mn	0.28-0.50	0.26-0.50	0.20 min.	0.35-0.60	0.20 min.	0.15-0.5	0.17-0.40	0.1 max.	0.1 max.
Si	0.05 max	0.05 max	0.70-1.2	0.60-1.4	0.05 max	0.10 max	0.05 max	0.05 max	0.05 max
Fe	0.004 max	0.004 max	0.004 max	0.035 max	0.005 max	0.05 max	0.004 max	0.03 max	0.03 max
Cu	0.008 max	0.008 max	0.008 max	0.015 max	0.05 max	0.05 max	0.025 max	0.025 max	0.05 max
Ni	0.001 max	0.001 max	0.001 max	0.001 max	0.005 max	0.005 max	0.001 max	0.005 max	0.005 max
Be	-	-	-	-	-	0.002	-	0.002	0.002
Ce	-	-	-	-	-	-	-	0.12-0.25	-
Zr	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3-0.9
Diğer	0.01	0.01	0.01	0.01	-	-	0.01	-	-
Mg	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan

2.6. Magnezyum Alaşımlarının Temel Özellikleri

Magnezyum alaşımları yüksek oranda şekillendirme kabiliyeti ve darbe dayanımı; çok yüksek saflıktaki alaşımlarda çok iyi korozyon dayanımı gösterir. Magnezyum alaşımları döküm prosesinde yüksek döküm hızı, talaşlı imalatta uzun takım ömrü ve çok iyi mekanik işlenebilirlik gösterirler [6].

Magnezyumun çevre dostu bir metal olduğu belirtilmektedir. Günümüzde malzeme seçimini çevresel faktörlerin ortaya koyduğu kriterler belirlemektedir. Bu faktörler hammaddeden başlayarak üretim, işleme ve geri dönüşüm aşamalarını etkilemektedir. Malzeme üretimi ve kullanımının toplam ekolojik etkileri artık karşımıza çıkan önemli bir olgudur [3].

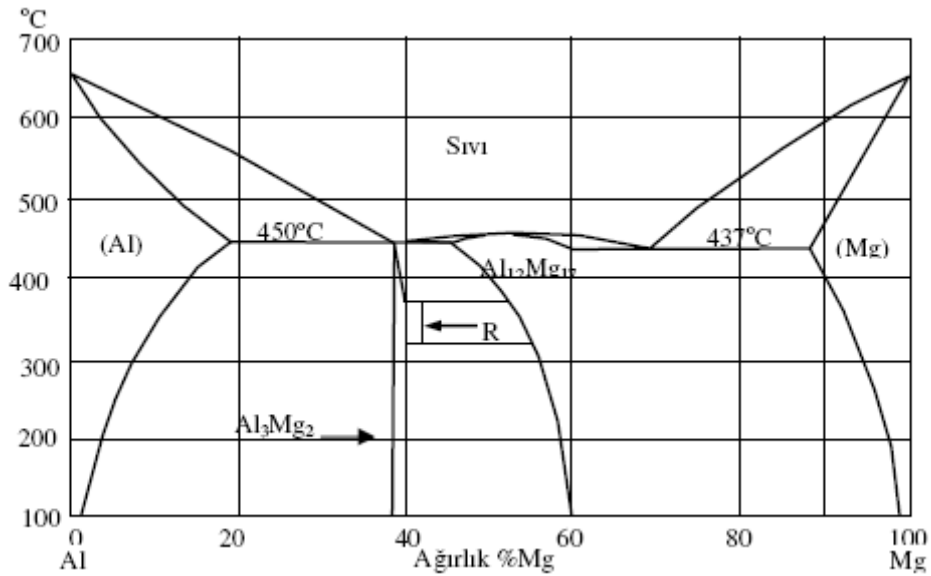
Magnezyum termoplastik özelliğe sahip plastik malzemelere bir alternatif oluşturmaktadır. Magnezyumun yüksek derecelerdeki esnekliği, çalışma koşullarındaki yüksek verimi, yapısal konstrüksiyonlarda gerekli olan dayanımı sebebi ile plastiklere göre çok daha yüksek bir avantaja sahiptir. Plastiklerin güneş ısınlarına maruz kalması ile mekanik özelliklerinde düşme, yasanma veya renk değişimi meydana gelirken, magnezyum alaşımlarının bu konudaki avantajı tartışılmaz. Bunun yanında uygun fiyat avantajı da dikkate alınmalıdır [3].

2.7 Alaşım Elementlerinin Magnezyum Alaşımına Etkisi

Magnezyum da diğer metaller gibi nadiren saf halde kullanılır. Malzemenin dayanım özelliklerinde belirli gelişmeler sağlamak için Mg'a alaşım elementleri katılarak döküm veya dövme ürünler elde edilmektedir. Mg HSP yapıya sahiptir ve sahip olduğu tane çapı da çok fazla sayıda elementle katı çözünebilirliğe müsaade eder. Mg yapısal bir malzeme olarak kullanıldığında Al, Be, Ca, Cu, Fe, Mn, Ni, Si, Ag, Sn, Zn ve Zr gibi ana elementler ile Na, K, Li alkali ve Ce, Ln, Y, Nd gibi toprak elementleri katılarak alaşımlandırılır [5]. Bu elementlerin biri veya birkaçı ile alaşımlandırıldığı zaman alaşımlar genellikle yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olur [2].

2.7.1 Alüminyum

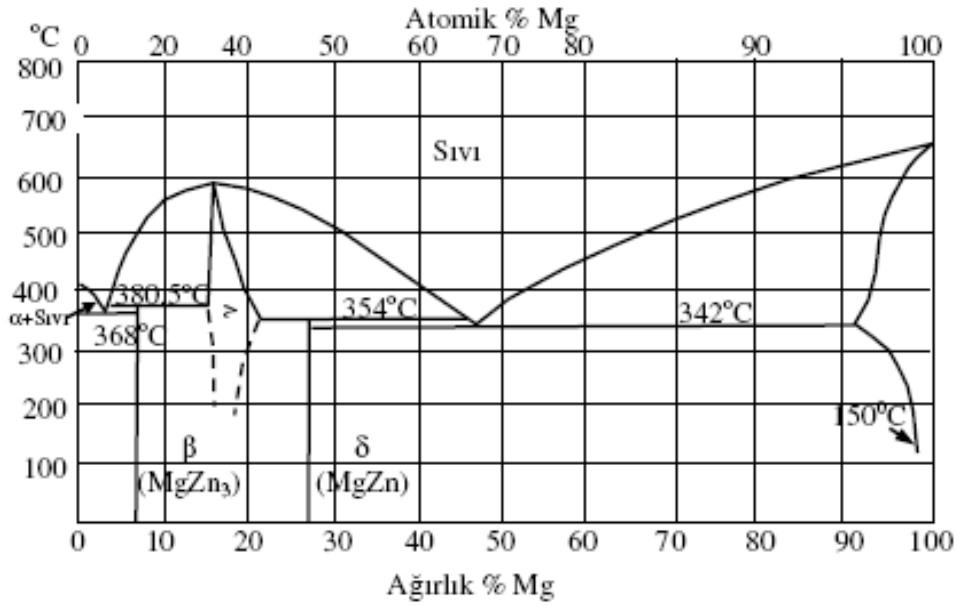
Mg esaslı alaşımlarda Al, en fazla kullanılan alaşım elementidir. Al katkısı alaşımın çekme dayanımını, sertliğini ve katılaşıma zamanını artırmakta, fakat sünekliğini ve darbe dayanımını azaltmaktadır. Ergiyiğin dökülebilirliğini geliştirmesinin yanı sıra Mg'un katı çökelti dayanımını ve döküm alaşımlarının mikro gözeneklerini azaltır. Alaşıma eklenen Al miktarı % 6'yı aştığında, alaşımın ısı işlem kabiliyeti artar. Katı eriyik sertleşmesi ve çökelti sertleşmesi ile oluşan $Mg_{17}Al_{12}$ intermetaligi düşük sıcaklıklarda ($-120\text{ }^{\circ}\text{C}$) oluşarak alaşımın dayanımını geliştirir [2].



Şekil 2.1 Mg-Al denge diyagramı [2]

2.7.2 Çinko

Zn, tane sınırlardaki ötektik miktarını artırarak, alaşımın katılaştırma sıcaklığını düşürmektedir. Korozyon özelliklerinde Cu'nun kötü etkisini yok etmek için Zn ilave edilmektedir. Zn, çökelti sertleşmesi sayesinde ortam sıcaklıklarında sertliği, dayanımı ve aynı zamanda ergiyiğin akıcılığını artırmakla birlikte, tane sınırlarına çökmesi ile sıcak yırtılma oluşturduğu için %2 ile sınırlıdır. Ayrıca Zn alaşımın çekme mukavemetini artırır [2].



Şekil 2.2 Mg-Zn denge diyagramı [2]

2.7.3 Diğer Elementler

Alaşıma ilave edilen Mn daha çok korozyon direncini artırmak için % 0.1-0.5 arasında kullanılır. Mn'nin Mg alaşımlarında korozyon direncine etkisi fazladır. Fe-Mn çökeltlerinde, Fe'in kontrolü için Mn kullanılır. Mn, Mg alaşımlarının sürünme direncini geliştirir ve Fe'in etkisini azalttığı için korozyonu engeller fakat Mg alaşımlarının dayanımında Mn'in etkisi azdır [8].

Mg'a ilave edilen Sn, alaşımın sünekliliğini artırır, sıcak işlem sırasında da alaşımın çatlama eğilimini azalttığı için aynı zamanda alaşımın işlenebilirliğini de artırmaktadır. Sn içeren alaşımda Mg₂Sn intermetalik faz oluşumu soğuma hızına bağlıdır. Yüksek soğuma hızlarında çubuk tipi Mg₂Sn partiküllerin gözlenmesi Mg matrisi ile birlikte olur [2].

Alaşıma ilave edilen Pb iyi bir çözünürlüğe sahip olduğundan, yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 460 °C) % 45'e kadar Pb çözünmekte ve ayrı faz olarak ortaya çıkmamasının yanı sıra $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazını da inceltmektedir [2].

Mg alaşımlarına eklenen Si, alaşımın yüksek sıcaklıklarda dayanımını artırmaktadır. Eğer alaşımda Fe de varsa Si, Mg alaşımlarının korozyona karşı direncini azaltır. Si atomları Mg matrisi içerisinde, oda sıcaklığında katı halde Mg_2Si intermetalik fazını oluşturur. Kuma dökümlerde oluşan Mg_2Si fazı basınçlı dökümlerde oluşana göre yavaş soğumadan dolayı kabadır ve bu da alaşımı kırılgan yapmaktadır. Alaşıma ilave edilen Ti, az da olsa tane inceltici görevi yapar ve Mg içinde çok az çözünürlüğe sahiptir. Hızlı katılaşma ile Mg alaşımları üretilirse Ti'un çözünürlük miktarı artırılabilir. Alaşıma ilave edilen Zr, Mg alaşımlarında tane inceltici olarak kullanılır. Zr, oda sıcaklığında mekanik özellikleri geliştirir. Zr, toprak elementleriyle birlikte kullanıldığında dökülebilirliği geliştirir [2].

Ca'un, Mg içerisinde maksimum çözünebilirliği 565 °C'de % 1.34, 200 °C'de ise yaklaşık % 0'dır. intermetalik bileşim olan Mg_2Ca 'un ergime noktası 715 °C'ye ulaşır (Şekil 2.17). Mg'da Ca sınırlı çözünebilirliği ile katı eriyik sertleşmesine etkisi sınırlıdır. Mg alaşımlarına %1 oranında katılan Ca alaşımın sürünme direncini geliştirmesinin yanı sıra sıcak yırtılmalara karşı olan eğilimi artırır. Ayrıca, az da olsa eriyik metalin oksidasyonunu azaltmaktadır. Mg'un çelik kalıplarla kuvvetli reaksiyona girmesini artırır [2].

Cu, dökülebilirliği iyileştirir. Mg alaşımlarında Cu miktarı % 0.05'i aştığında korozyon özelliklerine zararlı olmaktadır. Bununla birlikte Cu alaşımın yüksek sıcaklıklara dayanımını artırır. Yitriyum, Mg alaşımlarının dayanımını artırır. Diğer toprak elementleriyle birlikte kullanıldığında 300 °C sıcaklıklara kadar gerilme ve sürünme özelliklerini geliştirir. Ayrıca Y, Mg'da yüksek çözünürlüğe sahiptir (% 12.5) ve azalan sıcaklıkla birlikte çözünürlük de azalmakta ve çökelti sertleşmesi oluşmasına sebep olmaktadır. Ag elementi katkısı Mg alaşımlarının sertliğini geliştirir, ancak Ag'un pahalı oluşundan dolayı kullanımı sınırlıdır. Sr'un mikro gözeneklerin dağılmasında etkisi vardır ve Mg alaşımlarının porozite eğilimini azaltır. Mg alaşımına % 2 Sr ilavesi ile alaşımın mekanik özellikleri ve korozyona direnci artmaktadır [2].

Alaşıma ilave edilen Th, Y'da olduğu gibi, 300 °C sıcaklıklara kadar gerilme ve sürünme özelliklerini geliştirir. Dökülebilirliği iyileştirir, mikroporozite eğilimini azaltır ve Zn ile birlikte kullanıldığında kaynak edilebilme kabiliyetini geliştirir [2].

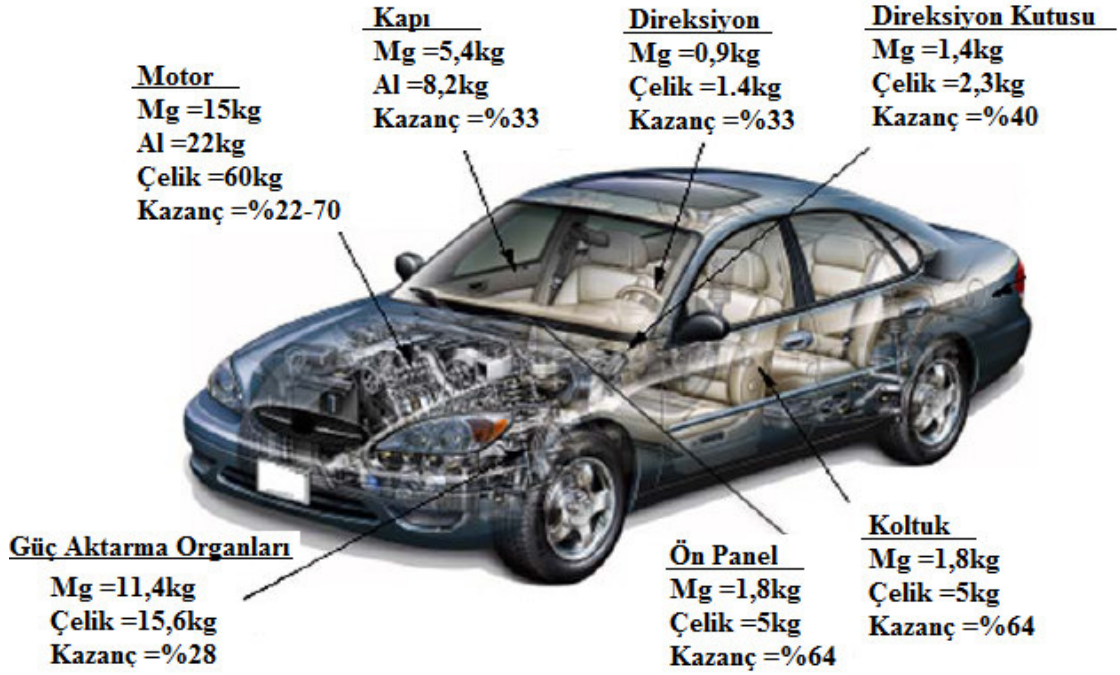
RE elementlerinin yüksek ısı dayanımını ve sürünme direncini artırdığı ve döküm porozitesini azalttığı araştırmalar sonucunda bilinmektedir. RE elementleri dökülebilirliği iyileştirir ve Mg alaşımlarında mikroporoziteyi azaltır [2].

2.8. Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

Magnezyum metalinin saf halde kullanılması çoğu diğer metallerde olduğu gibi dayanımının düşük olmasından dolayı mümkün değildir. Bu durum, değişik alaşımların üretilmesini gerektirmiştir. Mg alaşımlarının da en önemli özelliği hafifliktir. Bu açıdan bazı Mg alaşımlarının özgül çekme dayanımı, Al ve çeliğin özgül çekme dayanımından daha büyüktür. Bundan dolayı bugün elektronik, savunma, havacılık ve uzay sanayinde yaygın olarak Mg alaşımları kullanılmaktadır [8].

Otomotiv ve uzay-uçak sanayilerindeki ağırlık tasarrufuna yönelik arayışlarda Mg metali düşük yoğunluğu ile mühendislik uygulamaları açısından en hafif yapısal metal olarak ön plana çıkar. Günümüzde de Mg alaşımlarına olan en büyük ilgi otomotiv sektöründen gelmektedir. Bunun başlıca nedeni, hafif Mg alaşımlarının kullanımı ile araç ağırlığında yapılan azalmanın yakıt ekonomisi sağlaması ve bunun sonucu olarak gaz emisyonlarının da azaltılabilecek olmasıdır. Özellikle otomotivde hafif metalik malzemelere yönelik sadece günümüzün otomobilleri ile ilgili değildir. Güneş enerjisi, elektrik veya hidrojen gibi alternatif enerji kaynakları ile çalışacağı öngörülen geleceğin otomobillerinde hafiflik bugünküne kıyasla çok daha önemli bir gereksinimdir. Önümüzdeki yıllarda binek otomobillerde ulaşılması planlanan yakıt tüketimi 3 litre/100 Km gibi zorlu bir hedeftir ve bunun için otomobil ağırlığında yaklaşık %30'luk bir azalma gerekmektedir [2].

Mg'un Al ve çelikle karşılaştırıldığında yüksek fiyatlı olmasına rağmen, net şekle yakın döküm parçalar üretildiğinden otomobillerde kullanımı giderek artmaktadır [3].



Şekil 2.3 Otomobil üretiminde Mg alaşımından dökülmüş parçalar [2].

AZ serisi alaşımlar otomobil, havacılık, bilgisayar, kamera ve mobil telefonlarda kullanılır.



Şekil 2.4 AZ alaşımı döküm parçaları [2].

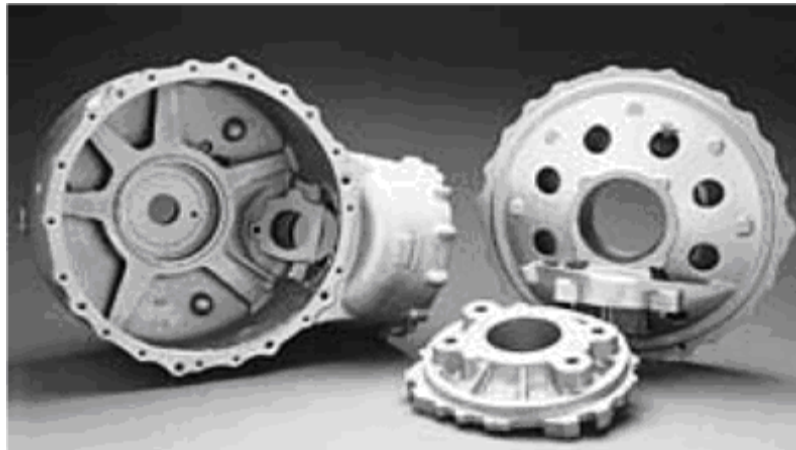
Mg alaşımlarından AM serisi alaşımlar yüksek toklukları ve enerji absorblama özellikleri

bakımından özellikle direksiyon, tekerlek, otomobil koltuk iskeleti yapımında kullanılır [10].



Şekil 2.5 AM alaşımı döküm parçaları [10]

AE42 alaşımları 200 °C'nin üzerindeki servis koşullarında, transmisyon elemanı ve motorlarda kullanılır [2].



Şekil 2.6 WE43 alaşımından dökülmüş helikopter vites kutusu [2]

Süper hafif Mg-Li esaslı alaşımlar bilgisayar elemanı olarak plastik ve diğer benzer malzemelerin yerine kullanılabilir [2].



Kamera kutusu



Cep telefonu kutusu

Şekil 2.7 Li katkılı Mg alaşımı döküm parçaları [2].

3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KAYNAK YÖNTEMLERİ

3.1 Magnezyum Alaşımının TIG Kaynağı

0.8 mm den az kalınlıkları kaynak etmek kolay değildir; buna karşılık, üst sınır yok gibidir. Bununla birlikte 10 mm den itibaren MIG yöntemi daha ekonomik olduğu sebebiyle tercih edilir. Magnezyum dökme alaşımları genellikle sadece tamir için kaynaklanır [7].

Arkın stabilize edilmesi için normal kaynak akımına bindirilmiş yüksek frekans akımlı alternatif akım (AA) makineleri ile sürekli amperaj kontrollü doğru akım (DA) makineleri bu iş için kullanılır. İnce saçlarda hem AA, hem de doğru akım ters kutup akımı kullanılır. 5 mm' den yukarı kalınlıkta malzemede daha derin nüfuziyeti sağladığından AA tercih edilir. Doğru akım doğru kutup, Mg alaşımlarında, arkın katodik temizleme etkisinden yoksun olması dolayısıyla nadiren kullanılır [7].

Mg alaşımlarının TIG kaynağı için saf tungesten, zirkonyumlu ve toryumlu elektrotlar kullanılır. Bunların çapı 0.25 ile 6.5 mm arasında değişir.

Elle kaynak 1.0 mm den 12.5 mm kalınlığa kadar Mg alaşımlarının TIG alın birleştirilmeleri için akım ayarı, elektrod çapı, koruma gazı debisi ve ilave metal sarfiyatı, aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. En iyi sonuçlar elektrodun iş parçasına yakın tutulması, yaklaşık 0.8 mm uzunlukta ark oluşturulması halinde elde edilir. Kaynak düz çizgi halinde uniform hızda yapılır. Salıntı veya dairesel hareket sadece köşe kaynaklarında kullanılır. Durma gerektiğinde, kaynağa kaynak metali üzerinde, önceki kaynağın sonundan yaklaşık 12 mm mesafeden yeniden başlanır [7].

Otomatik kaynak; Mg alaşımlarının otomatik TIG kaynağı, elle kaynaktaki gibi olup bunda sadece daha yüksek akım şiddetleriyle kaynak hızları kullanılır. AA en iyisidir; fakat doğru akım ters kutup yönteminde kullanılabilir. Bir dengeli dalgalı AA makinesi ya da dalga dengelenmesi için akü bataryasıyla donatılmış bir klasik AA makinesi kullanılacaktır.

Elektrot ve ilave metalin sürekli hızda tutulmalı otomatik kaynaktaki önemlidir. İlave metal arkin içine, iş parçası üzerine yatık olarak sürülür, şöyle ki ilave metal çubuğu elektrodun hemen önündeki kaynak yüzeyine temas eder. İnce saçlarda dakikada 2.5 mm'ye kadar ilerleme hızları kullanılabilirse de 0.60 ila 0.90 m/dak hızlar mutattır [7].

3.2 Dökme parçaların tamir kaynağı

Mg alaşımı dökme parçalar üzerinde yapılan kaynağın toplam sayısının önemli bölümü tamir kaynağı olmaktadır. Dökümlerde kusurların yer ve boyutu o denli değişkendir ki her tamir işinin kendi sorunları ortaya çıkar, süreçler standartlaştırılmaz. Fakat tamirlerin çoğu aşağıdaki genel süreçlere tabi olurlar:

1. Döküm boyadan ve krom dekopaj etkilerinden, yukarda anlatıldığı gibi mekanik yollarla arındırılacaktır.
2. Hata yerinde kaynak ağzı açılacaktır.
3. Gerekğinde, ön ısıtma, tavsiye edilmiş sıcaklıklarda yapılacaktır. Bir üfleçle yerel ısıtma da yapılabilir. Fırın ısıtması sırasında, 375 °C'ın üstünde sıcaklıklarda bir koruyucu atmosfer kullanımı oksitlenme olanağı azaltacaktır.
4. Kaynağa, ön ısıtmadan hemen sonra başlanacaktır. Dökümün sıcaklığı kaynak sırasında önemli ölçüde düşecek olursa yeniden ısıtma gerekebilir.
5. Kaynak, orta genişlikte dikişlerle, kırığın ortasından başlayıp dış kenarlara doğru ilerleyecektir. Kaynak çatlağı oluşabileceğinden ark, herhangi bir noktada fazla uzun süre kalmayacaktır.
6. Ark kesilmelerinden ileri gelen ısıl darbeyi asgariye indirmek üzere arkı tedrici olarak söndüren bir ayak kontrolü kullanılacaktır. Isıl darbe, çatlama neden olabilir [7].

3.3 Magnezyum alaşımların MIG kaynağı

Mg alaşımlarının MIG kaynağında DAEP kullanılır. Kısa devre kaynağında sabit voltaj makinesi olup bu makine genellikle püskürtme ark kaynağında tercih edilir. Sabit akım şiddetli (düşen volt-amper çıkışı) makineleri püskürtme metal geçişi için asgari akım şiddeti düzeyine yakın şiddetle kaynağa avantajlı olurlar. Akım çıkışını darbelemek için özel sabit voltajlı makineler, darbeli ark kaynağında kullanılır [7].

3.4 Magnezyum alaşımların elektron ışın kaynağı

Elektron ışın (EI) kaynağı, % 1'den az çinko içeren ticari şekillendirilmiş ve dökme Mg alaşımlarında sınırlı ölçüde, başlıca tamir için kullanılır. Alaşımların EL kaynağına uygunlukları genellikle ark kaynağı için olduğu gibidir. Mutat olarak kaynak edilen metallerin en alçak kaynama noktasını (1107 °C) magnezyumun yüksek buhar basıncı dolayısıyla kaynağın kökünde boşluklar ve gözenekleri önlemek üzere özel teknikler ve kaynak parametrelerinin

yakın kontrolü gereklidir. Bu güçlük ayrıca, daha da düşük kaynama noktasını (906 °C) çinkonun varlığıyla artmaktadır. Pratikte % 1'den fazla Zn içeren Mg alaşımlarının EB kaynağı mümkün görülmemektedir. İyi sonuçlar alınarak EB kaynağı uygulanmış alaşımlar arasında AZ91C-T6 dökme alaşımı ile AZ80A-T5 şekillendirilen alaşım vardır [7].

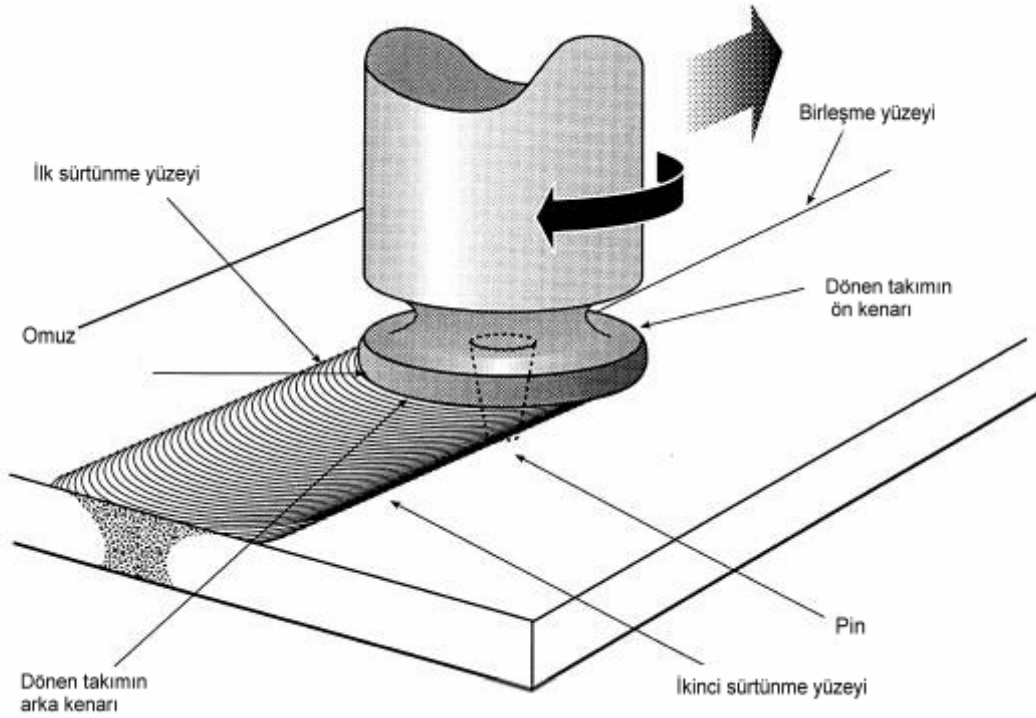
4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

Sürtünme karıştırma kaynak metodu geniş uygulama alanlarına yayılmış ve farklı geometrilerde kaynak olanağı sağlayan 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsü'nde (TWI), W.Thomas tarafından geliştirilen, patenti alınan ve halen geliştirilmeye devam edilen bir katı faz kaynak yöntemidir [14]. Birçok kuruluş sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) alanında pilot kuruluş olarak metodun geliştirilmesi için projelerine devam etmektedir. Kaynak metodunun dayandığı temel, aşınmaya dayanıklı dönel bir uç sayesinde alüminyum, magnezyum, bakır ve kurşun gibi malzemelerin birleştirilmesinin sağlanmasıdır [11]. Laboratuvar koşullarında ana metal olan alüminyum kompozitler, magnezyum alaşımlar, çinko, titanyum alaşımları ve çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağı ile başarılı bir şekilde kaynaklı imalatları yapılmıştır. Kaynak katı fazda, ergime noktasının altında gerçekleşir. Ergimenin olmamasına ve ısı girdisinin az olmasına rağmen, sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen malzemeler çok iyi mekanik özellikler ve korozyon dayanımı göstermektedir. Bu kaynak katı fazda gerçekleştiği için ısı girdisi ile kaynağı yapılamayan malzemelerin kaynağının yapılmasında oldukça işlevseldir. Ayrıca sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan kaynaklarda enerji sarfiyatının az olması, işlemin hızlı gerçekleşmesi, imalatın ucuzluğu ve seri üretimde avantajlı olması bu kaynak metodunun önemini oldukça artırmaktadır [9-12].

4.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağının Yapılışı

Katı hal kaynak yöntemi olan SKK yönteminde dönel hareket yapan takım belirli bir geometrik yapıya sahiptir. Şekil 2.2.'de görüldüğü gibi omuz ve pim'den oluşan kaynak takımı, sürtünme karıştırma sonucunda kaynak işlemini gerçekleştiren bir elemandır. Kaynak edilecek malzeme cinsine bağlı olarak bunların özellikleri de değiştirilebilir. Kaynak edilecek malzemelerin geometrik yapısına göre takım kendi etrafında sabit hızla döndürülür. Malzemelere ise ilerleme hareketi yaptırılır veya takıma hem ilerleme hem de öteleme hareketi yaptırılabilir. Takımın omuz kısmı kaynatılacak yüzeylerin dış yüzeyi ile sürtünme hareketi yaparken, pim kısmı ise iki parça arasında dönel hareket yaparak malzemenin plastik olarak deformasyona uğramasını sağlar [17]. Sürtünme ve karıştırma hareketleri esnasında sürtünme ısısi ortaya çıkar ve malzemelerin de daha kolay akışı elde edilir. Gerekli ısı, işlem anında takım etrafında ortaya çıkmaktadır. Omuz, sürtünme ısısi oluşturmak ve ısı neticesinde yumuşak bir metal elde etmek için iş parçası üzerine bastırılır. Pim'in de sürtünme ısısına katkısı olmakla beraber, plastikleşen malzeme akışının, omuzdan malzemeye doğru akmasını sağlar [13].

Pim üzerine vida dişi açılmıştır. Bu vida dişinin amacı, plastik deformasyona uğramış iş parçasının malzeme kaybına sebep olmadan pim çevresinde tam ve düzgün bir şekilde dağılmasını sağlamaktır. Kaynak kök kısmının tam kaynamasını sağlamak için, pim ucunun malzeme (plaka veya boru) arkasına çok yakın geçmesi gerekmektedir [14].



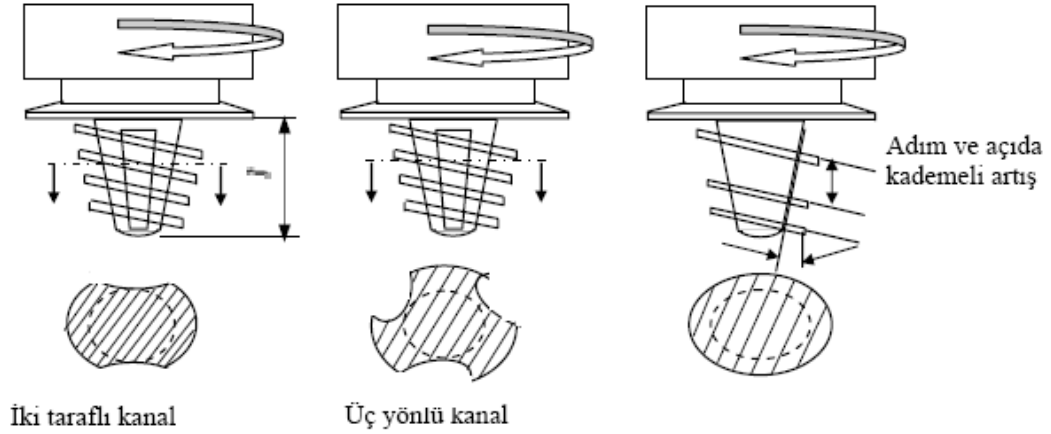
Şekil 4.1 Sürtünme karıştırma kaynak takımı şematik gösterimi

4.2.Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Uç Tipleri

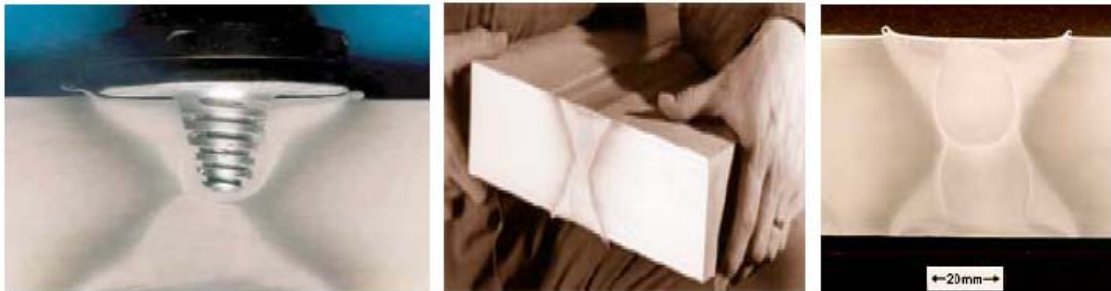
4.2.1 Whorl™ Serisi Pimler (Baticı Uçlar)

Denemeler sonunda, Whorl™ konfigürasyonları belirlenmiştir (Şekil 4.2). Kesik koni şeklindeki Whorl™ pim (probe), plastik akışa uğrayan metali aşağıya doğru yönlendirmek için helisel sırtlı profiller ihtiva etmektedir. Yani bir tür ekstrüzyon olayı gerçekleşmektedir. Whorl™ tipi dairesel olmayan pim kesitleri sağlar. Bu nedenle, malzemenin daha kolay akmasına imkân vermek için pimin yer değiştirme miktarı, dönme miktarından daha az olması gerekmektedir [12]. Şekil 4.3.'de 75 mm kalınlığındaki AA 6082-T6 alaşımının içine geçmiş Whorl™ serisi pim görülmektedir ve buradan da kaynak kesiti görüntüsü ile takım profilinin ilişkisi açıkça görülmektedir. Pim etrafındaki malzemenin daha etkili akması için her bir helisel

sırt arasındaki uzaklığın sırt kalınlığından daha büyük olması gerekir. Pimin ucunun helisel sırtlarla paralel olması kritik bir özellik değildir [14].



Şekil 4.2 Çeşitli whorl™ konfigürasyonları [14]



Şekil 4.3 75 mm kalınlığındaki AA6082 T6 alaşımının kaynağında whorl™ takımının kullanılması, kaynağın bitmiş hali ve kaynak dikişinin görüntüsü [14]

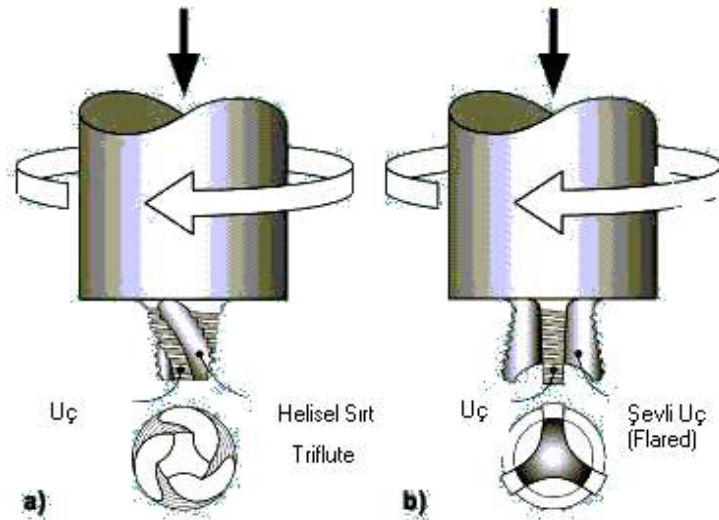
4.2.2 MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ Serisi Pimler (Baticı Uçlar)

Multi-Helix takımların (MX Triflute™) yivlerinin çevresinde helisel sırtların bulunması takımın hacmini düşürmekle beraber malzeme akışına yardım eder ve yüzeydeki oksitleri dağıtır. Alın kaynağında kullanılan, Whorl™ ve Triflute™ uçları kesik piramit şeklindedir ve yüzeylerinde aşağıya doğru delme etkisini kolaylaştırmak amacıyla kaba işlenmiş helisel sırtlar ve oluklar bulunmaktadır. Bu girintili köşe şekilleri, ucun hacmini azaltır ve statik hacim oranı için uygun olan karıştırma hacmini sağlar. Daha iyi bir hacim oranı ile malzemenin akış yolu daha iyi olur ve böylece uç daha etkili çalışır. Ayrıca özellikle ucun etrafındaki kaba

işlenmiş helisel sırtlarda bulunan girintili köşe özellikleri kaynak bölgesindeki yüzey oksitlerinin parçalanmasına ve dağıtılmasına yardımcı olur [11].



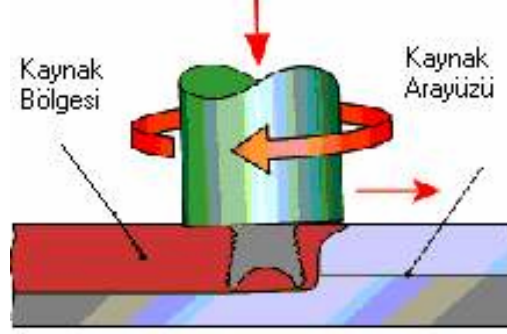
Şekil 4.4 MX Triflute™ pimin esin kaynağı deniz kabuklarıdır, MX Triflute™ serisi pimin resim ve şematik çalışma şekli [11]



Şekil 4.5 MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ dizaynları [11]

Bindirme kaynağında ise uç, daha geniş kaynak bölgesi sağlamak ve kaynak yapılan ara yüzeylerde daha büyük levha kalınlıklarından dolayı oluşabilecek problemleri önlemek amacıyla daha farklı tasarlanmıştır (Şekil 4.5). Bindirme kaynağında pim yüzeyi kaynak ara

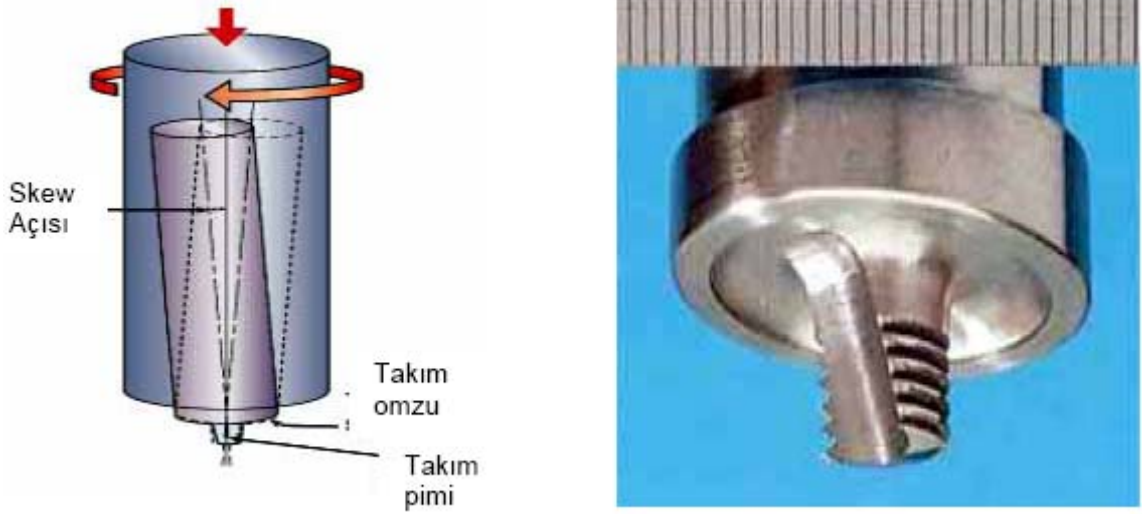
yüzeyine zorunlu olarak diktir ve alttaki levhaya yeteri kadar nüfuz edebilmesi ana amaçtır. Kaynak ara yüzeyinin üst yüzeyden mesafesi ve ucun girintilerinin kaynağın kenarıyla kesiştiği açı çok önemlidir. Bu özellik, yorulma ile doğrudan bağlantılıdır. Ucun karakteristiği, süpürme hacmi ile statik hacim arasındaki farkın artırmasıyla ucun etrafındaki ve aşağısındaki akış yolunun büyümesidir [15].



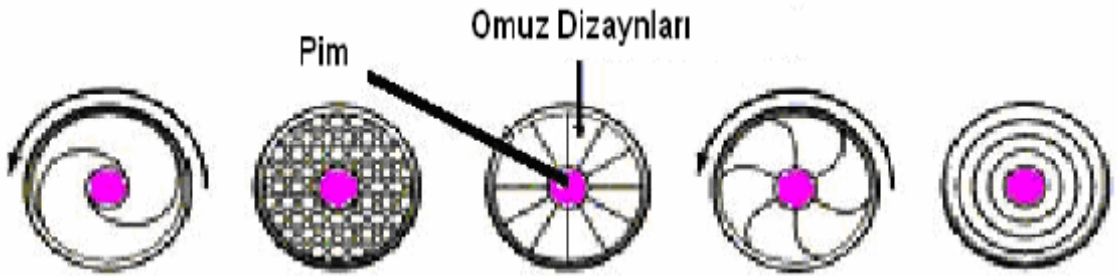
Şekil 4.6 Flared Triflute Probe ile yapılmış olan bindirme kaynağında kaynak ara yüzeyinin görünümü [15]

4.2.3 Skew-Stir™ ve A-Skew™ Serisi Pimler (Batıcı Uçlar)

Sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması için geliştirilen Skew-Stir™ serisi pim, pim ekseninin iş mili eksenine göre biraz eğim verilmesi ile diğer pimlerden ayrılır. Skew-Stir™ serisi pimler, dinamik süpürme hacmi ile statik hacim arasındaki oranı pimin eğik hareketi ile arttırabilmektedirler. Bu oran, boşluk oluşumunu gidermede veya azaltmada ve işlem verimliliğini yükseltmede önemli bir faktördür. Şekil 4.7.'de görüleceği üzere, omuz yüzeyi, eğik takım eksenine belirli bir eğim oluşturmaktadır [15]. Omuz yüzeyi ise, plakanın üst kısmına bağlı olarak sabit durmaktadır. Omuz, iş parçası üzerinde iken dairesel hareket yapar. Takımın odak noktası, iş parçası yüzeyine veya iş parçasının herhangi bir noktası üzerine geldiğinde, omuzun temas yüzeyi eksen dışı bir yörüngede hareket eder. Ayrıca, omuzun bu yörünge hareketi, omuzun eğrilik açısına ve odak noktası ile levhanın üst yüzeyi arasındaki mesafeye bağlıdır. Eğrilik açısı ve aradaki mesafe arttıkça, omuzun hareket sahası da artacaktır. Whorl™ ve MX Triflute™ takımlarının omuzları (shoulder) da özel profillere sahiptir. Omuz profilleri, omuz ile iş parçası arasında daha iyi bir temas yüzeyi sağlamak amacıyla kullanılır. Sürtünme teması ile akan malzemenin kaynak bölgesinden ayrılması önlenmektedir (Şekil 4.8) [14].



Şekil 4.7 Skew-Stir metodunun çalışma prensibi ve A-Skew ucunun resmi [14]

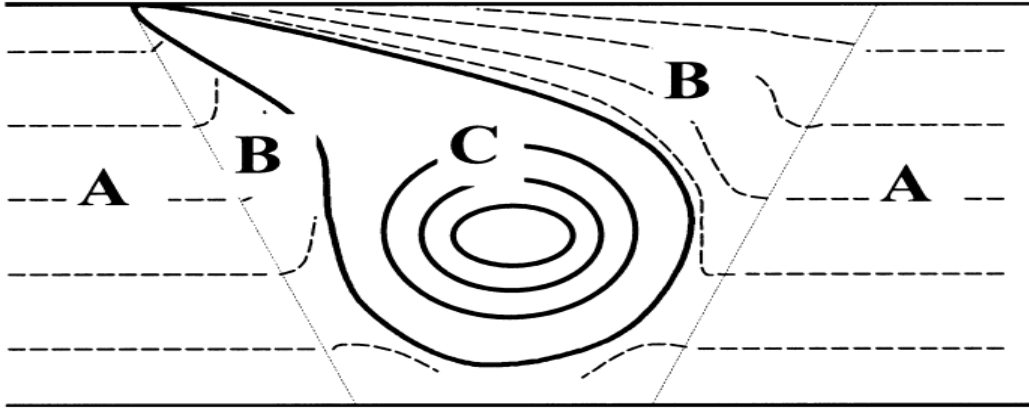


Şekil 4.8 Whorl™ ve MX Triflute™ takımlarının omuz profilleri [14]

Kaynak sonunda parça üzerinde genellikle küçük delikler kalabilmektedir. Pim, iki parça arasında kaynak bağı oluşturmak için yavaşça daldırılır ve yüksek hızda döndürülür. Kaynak sonunda tek parçalı pim takımı geri çekilir ve delikten uzaklaştırılır. Bunlardan bazılarında yani tamburlar, borular ve stok tanklarında da böyle bir kaynak kabul edilemez. Diğer bir geri çekme, değişen kalınlıklarındaki malzemeler kaynatıldığında farklı uzunlukta pim takımları gereklidir. Bu geri çekme problemi çözümlenebilmek için NASA Marshall Uzay Uçuş Merkezi kaynak mühendisleri otomatik olarak geri çekilebilir pim takımı tasarımı yapmışlardır. Kaynak sonrasındaki deliği önlemek için takım omuzu içerisindeki pim bilgisayar destekli şekilde otomatik geri çekilebilir olarak kullanılmaktadır. Bu tasarım piminin açılma ayarına ve malzeme kalınlıklarına göre pim boyunda ayarlamaya imkân sağlar ve kaynak sonunda uygun bir kapalı delik ortaya çıkarır [14].

4.3 SKK' da Kaynak Metalürjisi

Şekil 4.9. da sürtünme karıştırma kaynağında oluşan simetrik olmayan kaynak dikişinin kesitindeki tipik bir iç yapı şematik olarak gösterilmiştir [9]. Tipik olarak soğan halkaları veya ağaçlardaki yaş halkaları gibi pek çok konsantrik halkalar oluşmaktadır. Kaynak bölgesindeki iç yapı tipik olarak üç farklı bölgeden oluşur. Bu bölgeler, A: ark kaynağındaki ITAB'a benzer dikişten uzakta ısının tesiri altındaki bölge (ITAB), B: dikişe bitişik termo-mekanik olarak etkilenmiş bölge (TEB) ve C: dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) olarak adlandırılmaktadır. Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgenin dinamik toparlanma (dynamic recovery) sonucu oluştuğu kabul edilmektedir [14].

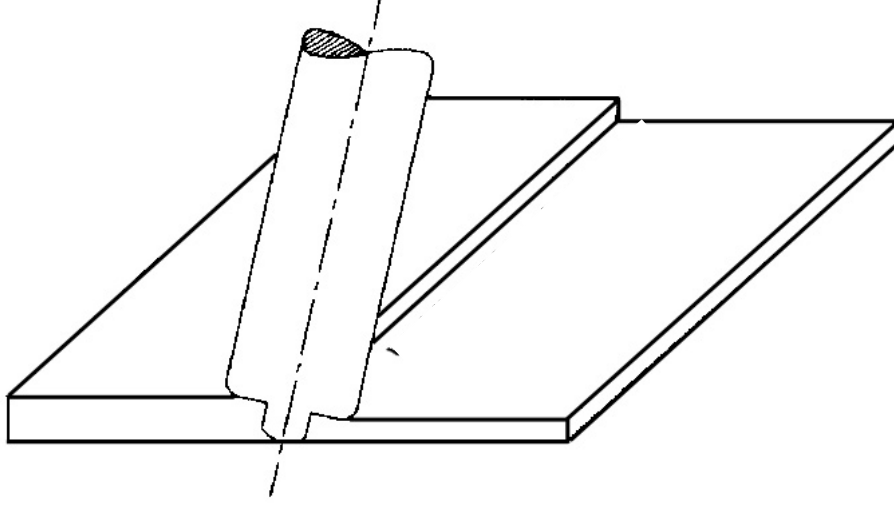


Şekil 4.9 Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan iç yapının şematik görünümü. A: ısının tesiri altındaki bölge (ITAB), B: termodinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (TEB), C: dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) [14]

Belirli bir takım geometrisi kullanılarak yapılan sürtünme karıştırma kaynağında elde edilen birleştirme karakteristiklerini belirleyen üç temel parametre vardır. Bunlar, takımın devir hızı, ilerleme hızı ve batma derinliğidir. Bunlardan ilk ikisi, devir ve ilerleme hızları kontrol edilebilir ve sabit takım geometrisi ile yapılan kaynaklarda kaynak sırasında önemli oranda değişmezler. Fakat, takımın batma derinliği kritik ve kontrol edilmesi güç bir parametredir. Batma derinliğinin kaynak işlemi süresince sabit kalması gerekmektedir. Fakat özellikle uzun levhaların birleştirme işlemlerinde yüzeylerin çok düzgün olmaması durumunda bunu sağlamak mümkün olmayabilir. Bu yüzden kaynak öncesi yüzey hazırlama oldukça kritik olup, bu hususta özen gösterilmesi gerekmektedir. Kaynak işleminde iyi bir nüfuziyet elde etmek için, takım ucunun arka yüzeye yaklaşık olarak 0,508 mm mesafede sabit tutulması gerektiği deneysel

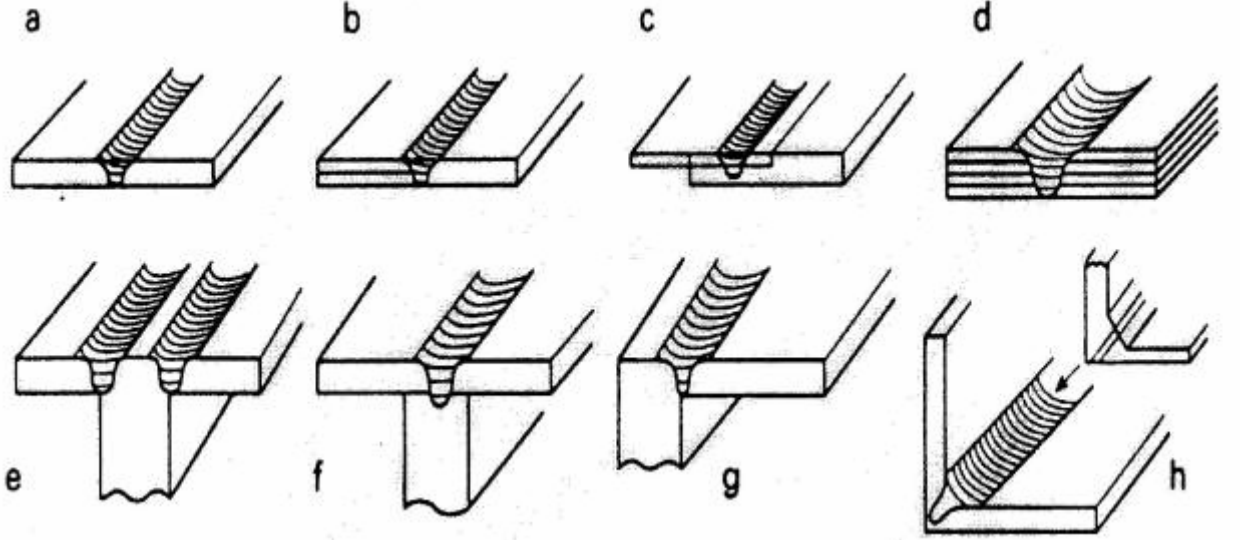
olarak gösterilmiştir. Takımın ucu ile iş parçasının arka yüzeyi arasındaki mesafe “nüfuz etme mesafesi” olarak bilinmektedir. Bundan dolayı sürtünme karıştırma kaynağında, yüzey hazırlama klasik ve lineer sürtünme kaynaklarındakinden daha kritiktir. Kaynak işlemi süresince nüfuz etme mesafesini sabit tutmak için malzeme kalınlığındaki değişimler minimum düzeyde olmalıdır. Takım ölçüsü, düşük ısı girdisi ve küçük kaynak dikişi sağladığı ve dolayısıyla büzülmeyi azalttığı için mümkün olduğunca küçük tutulmalıdır [15].

Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken diğer önemli bir husus, yeterli hidrostatik basınç elde edilemez ise, kaynaklanan levhaların tabana yakın kısmında soğuk birleşme (yetersiz nüfuziyet) oluşumudur. Bu sorun yukarı doğru hareket etme eğilimindeki çamur kıvamındaki malzemenin aşağıya doğru hareketini kolaylaştırıp kaynak dikişinde kalmasını sağlayabilecek optimum batıcı uç ve omuz dizaynı yapılması, devir hızının artırılması gibi önlemler ile ortadan kaldırılabılır. Bu bağlamda, karıştırıcı uç üzerine verilen profiller (spiral dişler) sayesinde aşağı doğru itme hareketi sağlanarak malzemenin yukarı doğru akması önlenir. Bu önlemler aynı zamanda kaynak bölgesindeki malzemenin omuz altından kaybı sonucu kaynak dikişi içerisinde oluşan tünel şeklinde boşluk (porozite) probleminin de giderilmesini sağlar. Sürtünme karıştırma kaynağı, otomatik çekilebilir takımların geliştirilmesiyle batıcı ucun işlem sonunda levhadan geri çekildiği yerde delik oluşmaması sonucu dairesel (çevresel) kaynak işlemlerinde ve takımın eğik daldırılması sonucu farklı kalınlıklardaki levhaların kaynak işlemlerinde de kullanılabilir. Farklı kalınlıklardaki Al-Li alaşımı 2195 levhaların birleştirme işlemlerinde eğik takım daldırma yöntemi ile umut verici sonuçlar elde edilmiştir [9]. Eğik takım daldırma yöntemi şekil 2.11’ de Şematik olarak gösterilmektedir. Son yıllarda otomotiv endüstrisinde konstrüksiyona hazır levhaların (tailored blanks) kaynak işleminde sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin kullanılması büyük bir ilgi çekmektedir. Pimin farklı kalınlıklardaki levhalara açılı daldırılması ile lazer kaynağında elde edilenden daha düzgün bir yüzey elde edilebilmektedir [9].



Şekil 4.10 Sürtünme karıştırma kaynağında batıcı ucun eğik konumda daldırılması ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesi [9]

Takım omuzu özellikle ince levhalarda sürtünme işlemini dolayısıyla gerekli ısının büyük bir kısmını sağlar. Takım omuzları önceleri 1-2 derece eğik yapılırken, daha sonraları omuz profilleri, yani yüzeylerinde yivler (kanallar) bulunan omuzlu takımlar geliştirilmiştir. Omuz yüzeyindeki bu kanallar kaynak sırasında dışarı kaçmaya çalışan malzemeyi engeller, ayrıca takım ucundaki sıkıştırmayı (hidrostatik basıncı) artırır. Dolayısıyla, omuz profili bulunan takımlar kullanılarak daha yüksek hızda kaynak işlemi gerçekleştirilebilir [11].



Şekil 4.11 Sürtünme karıştırma kaynağı ile gerçekleştirilen birleştirmeler, a) Küt alın birleştirme, b) Birleştirilmiş ek ve bindirme birleştirme, c) Bindirme, d) Çoklu bindirme, e) İki pasolu T- köşe birleştirme, f) Tek pasolu T- köşe birleştirme, g) Dış köşe birleştirme, h) İç köşe birleştirme [11]

4.4 Kaynak Bölgesinin Mekanik Özellikleri

Ergitme esaslı kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında, sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan birleştirmeler daha ideal bir kaynak profili ve daha pürüzsüz bir yüzey kalitesi gösterirler [17]. Kaynak işleminin uygun yapılması ve optimum kaynak parametrelerinin kullanılması ile kusursuz kaynak elde etmek mümkündür. Batıcı ucun istikrarsız hareketi ve parametrelerin uygun olmaması durumunda sırasıyla yüzey pürüzlülüğü ve daha önce bahsedildiği gibi kaynak dikişinin tabana yakın kısmında soğuk birleşme gibi sorunlarla karşılaşılabilir. Bu yöntemde oluşabilecek bir başka kaynak hatası da kaynak dikişinde tünel şeklinde boşluk (porozite) kalmasıdır. Bu hatanın nedeni takım tasarımındaki hatadan dolayı çamur kıvamına gelen malzemenin omuz altından dışarı taşmasıdır. Karıştırıcı uç üzerine ve omuz üzerine uygun profillerin işlenmesi ile bu sorun ortadan kaldırılabilir. Takım omzunun dönmesi sonucu, bu metot ile elde edilen kaynağın üst yüzeyleri makine ile işlenmiş gibidir ki bu da yorulma ömrünü arttırmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı ile yukarıda bahsedilen hususlar dikkate alınarak Al-alaşımında hatasız kaynak dikişi elde edilebilir [15]. Şekil 2.13'e bu yöntem ile elde edilmiş hata içermeyen bir Al-alaşımında kaynak dikişinin kesiti gösterilmektedir. Bu kaynak yöntemi ile kaynak edilmiş Al-alaşımında elde edilen kaynağın tipik özelliği, özellikle yaşlandırma sertleşmesi yapılmış alaşımlarda, kaynak bölgesinde sertlik

ve mukavemet düşüştür (strength undermatching). Fakat, kaynak bölgesinde mukavemet kaybı tüm ergitme kaynak yöntemlerinde bu yöntemden daha fazladır [9].



Şekil 4.12 Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış kaynağın kaynak bölgesinin kesiti [9]

4.5 Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantajları ve Dezavantajları

Mevcut uygulamaları oldukça yaygınlaşan bu yöntemin çeşitli avantajları vardır.

Bu avantajlar aşağıda sıralanmaktadır:

1. Ergitme kaynağı zor olan 2XXX ve 7XXX serisi Al-Alaşımları ve Al-Li alaşımları kaynak edilebilir [9].
2. Kaynak esnasındaki toplam ısı girdisi düşüktür, dolayısıyla mekanik özelliklerdeki kayıp minimumdur [13].
3. Özellikle ince levhalarda büzülme, distorsiyon ve kalıntı gerilmeler çok düşüktür.
4. Kaynak öncesi yüzey hazırlama aşırı kritik değildir, yüzeyde ince oksit filmleri tolere edilebilir.
5. Katı hal kaynağı olduğu için çatlak ve porozite oluşumu gibi ergitme kaynaklarında karşılaşılan problemler söz konusu değildir.
6. Kaynak sonrası kaynak yüzeyi talaş alınmış gibi düzgündür ve yüzey işleme gerektirmez.
7. Alın ve bindirme kaynağı yapılabilir.
8. Kaynaktan hemen sonra oksit tabakasının kaldırılmasına gerek yoktur.
9. Yöntemin doğası gereği ark, kıvılcım, gaz ve toz söz konusu olmadığından çok temiz ve çevreci bir kaynak yöntemidir [16].
10. Enerji verimliliği yüksek bir kaynak yöntemidir.
11. Otomasyona ve robotik uygulamaya çok uygundur.
12. Kaynak bölgesinde mukavemet nispeten yüksektir (yüksek kaynak performansı).
13. İlave tel ve koruyucu gaza ihtiyaç duyulmaz.
14. Hassas kaynak ağzı hazırlığına gerek yoktur.

15. Çeşitli metaller ve alüminyumların (Al-ekstrüzyon ve Al-döküm) bir çok pozisyonda birleştirilebilmesi mümkündür.

16. Yatırım maliyeti lazer ve elektron kaynağı cihazlarından düşüktür.

Yöntemin dezavantajları ise:

1. Kaynaklanacak parçaların çok sıkı bağlanmaları şarttır.
2. Tek parçalı karıştırıcı uç kullanıldığında kaynak sonunda delik kalır.
3. Özellikle kalın levhaların kaynağı için çok güçlü tezgahlara ihtiyaç vardır.
4. Kaynaklama hızı malzeme cinsi ve levha kalınlığına bağlı olarak 50-1000 mm/dak arasındadır. (Bu değerler, perçinleme gibi mukavemetsiz birleştirme yöntemlerine göre oldukça düşük, benzer mukavemetli ark kaynağı ile eş değerdir) Pim dizaynındaki hızlı gelişmeler ile kaynak hızının daha da arttırılması beklenmektedir.
5. Her kaynak sonunda takımın piminin girdiği delik kapatılmalıdır [14].

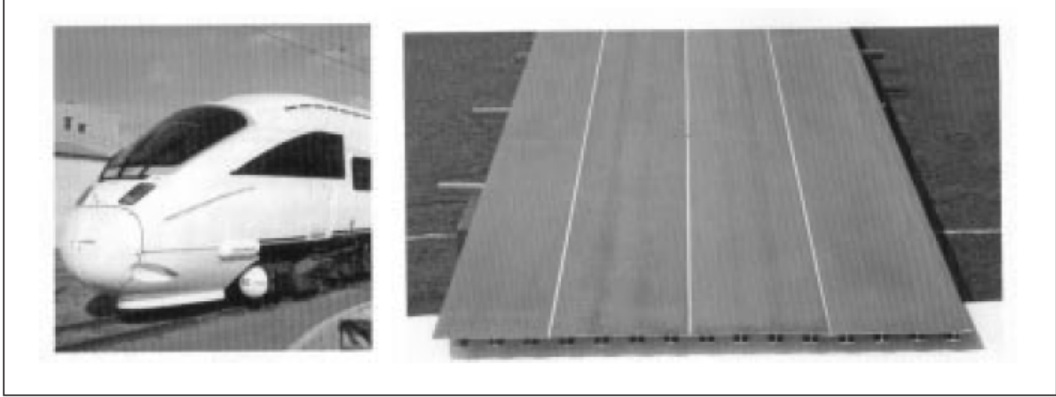
4.6 Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulama Alanları

Bu yöntem gemi inşaatı ve denizcilik, havacılık, demir yolu, otomotiv, inşaat, elektronik endüstrilerinde ve diğer birçok endüstri kuruluşunda kullanılmaktadır. Kullanım alanlarından bazıları aşağıda verilmiştir.

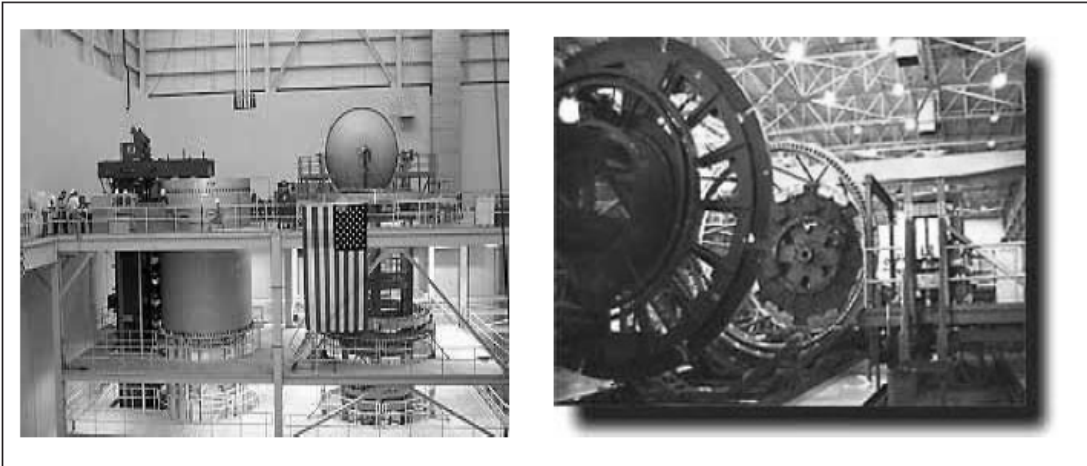
- Güverte, kenar, bölme ve döşeme panelleri
- Alüminyum ekstrüzyonları
- Tekne elemanları
- Helikopter platformu
- İç kısımdaki yatacak yerler
- Deniz üssü yapılar
- Gemi direkleri
- Soğuk hava tesisleri
- Kanatlar, uçak gövdeleri, kuyruk takımı
- Taşıtlar için yakıt tanklarını soğutma ünitesi
- Uçuş yakıt tankları
- Askeri uçaklar için dıştaki atım tankları
- Askeri ve araştırma roketleri
- Hatalı MIG kaynaklarının tamiri
- Yüksek hızlı trenler
- Tren yolunun mevcut yokuşlu yerleri, pis altyapı, tramvaylar
- Demiryolu tankerleri ve vagonlar

- Konteynır grupları
- Alüminyum köprüler
- Alüminyum, kurşun veya titanyumdan yapılmış ön cephe panelleri
- Cam çerçeveleri
- Alüminyum nakil boruları
- Güç fabrikaları kimya endüstrisi için alüminyum reaktörler
- Sıcaklık değişimleri ve hava şartlandırıcıları
- Boru üretimi
- Elektrik motorları
- Motor dağıtma çubukları
- Elektrik kondüktörleri
- Motor ve şasi kızakları
- Hidroform olan tüplerin bağlanan parçaları
- Kamyon gövdesi
- Mobil vinçler
- Zırhlı taşıtlar
- Yakıt tankları
- Karavanlar
- Otobüs ve hava taşımacılığı taşıtları
- Motosiklet ve bisiklet yapıları
- Asansörler
- Alüminyum arabaların tamiri
- Magnezyum ve magnezyum/alüminyum eklemleri
- Buzdolabı panelleri
- Pişirme ekipmanları ve mutfaklar
- Beyaz eşyalar
- Gaz tankları ve gaz merdivenleri

Bazı uygulama alanlarından resimler şekil 4.13, 4.14 de verilmiştir [9].



Şekil 4.13 Alüminyum ekstrüzyon panellerinin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi [9].



Şekil 4.14 Shuttle External tank projesi ve marshall space flight center laboratuarlarındaki sürtünme karıştırma kaynak sistemlerinden görüntüler [9]

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada AZ31 magnezyum alaşımının bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynak edilebilirliği araştırılmıştır. AZ31 magnezyum levhalardan 100x150 mm ebatlarında hazırlanan malzeme çiftleri 960 dev/dak, 1960 dev/dak, 2880 dev/dak ve 10 mm/dak, 20 mm/dak ilerleme hızlarında sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile freze tezgahında birleştirilmiştir.

Karıştırıcı uç olarak 2344 sıcak iş takım çeliğinden Şekil 5.1'deki verilen ölçülerde imal edilmiştir. İmal edilen ve vakum altında ısıl işlem yapılarak sertliği 57 HRC ye getirilmiştir. Bu uçlar kullanılarak yapılan SKK işlemi esnasında her bir cm'de kaynak boyunca sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Kaynak numunelerinin SKK işlemi sonrasında, kaynak dikişi dış yüzeylerinin görünüşleri, çekme ve eğme deneyleri, kaynak kesitindeki farklı bölgelerin mikro-yapıları incelenmiş ve bu bölgelerden mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır.

5.1 Kullanılan Malzeme

AZ31 magnezyum alaşım levhalar 4 mm kalınlığında haddeleme yöntemiyle üretilmiştir. Çekme mukavemeti max 283 MPa, uzaması % 10'dur. Çizelge 5.1 AZ31 alaşımının kimyasal bileşimi ve oranları verilmiştir.

Çizelge 5.1 AZ31 alaşımının kimyasal bileşimi

AZ31	Al	Mn min.	Zn	Co max.	Si max.	Cu max.	Ni max.	Fe max.	Diğer max.
%	2.5-3.5	0.20	0.6-1.4	0.04	0.10	0.05	0.005	0.005	0.30

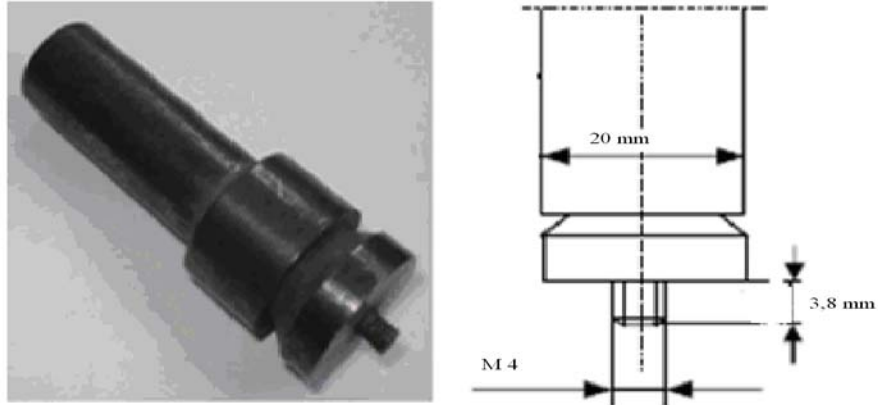
5.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması

1000X1500 mm ebatlarında 4 mm kalınlığında Kütahya Organize Sanayinde VİG Makine ltd.şti. tarafından üretilen levhalar kaynak işlemi için, levhaların tablaya bağlanabilmesi ve kaynak işleminden sonra çekme, eğme ve mikro yapıların incelenebilmesi ve deney numunelerinin uygun ölçüde çıkartılabilmesi için giyotin makası ile 120X150 mm ebatlarında kesilmiştir.

5.3 Kullanılan SKK uç tipleri

Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan olan uç 2344 sıcak iş takım çeliğinden yapılmıştır. Bu uçun frezeyle bağlanan kısmın çapı 20 mm, boyu 80 mm'dir. Karıştırıcı uç (pim) malzemesi, ergime derecesi magnezyum malzemenin yaklaşık üç katı olan 2344 sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiştir. Bunun için 2344 sıcak iş takım çeliğinden pim istenilen ölçüde kesilerek; daha sonra tornada belirlenen ölçülerde işlenmiştir. İstenilen ölçülere getirilen pimin vida uçları M4 paftası ile dış açılmıştır. Uçlar aşağıda belirtilen şartlarda ısıl işleme tabi tutulmuştur. Sürtünen elamanın dış açılan uç kısmı fırın içerisine konulmadan önce refrakter çamur ile kaplanıp ısıl işlemin yapılması sağlanmıştır.

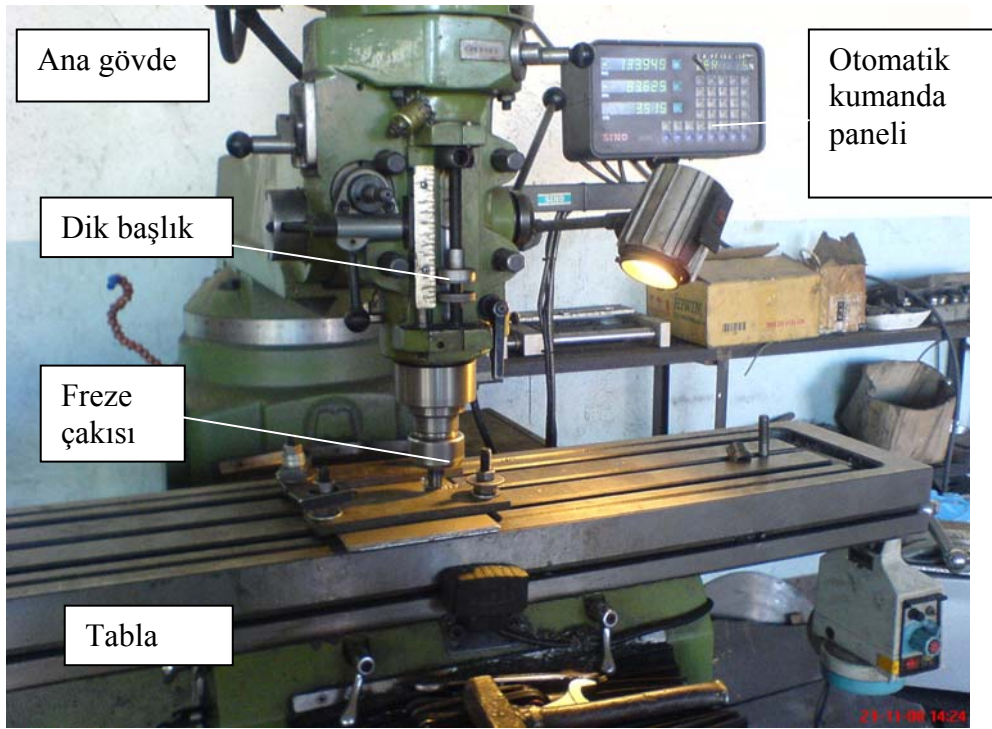
Hazırlanacak karıştırıcı uca (pim) sırasıyla; 1100 °C'de 45 dakika tavlansak; yağda hızlı soğutma yapılmış, 1200 °C'de 2 saat temperleme yapılmıştır. Sonuç olarak elde edilen karıştırıcı ucun (pim) sertlik değeri HRC 55-57 Rockwell olması sağlanmıştır.



Şekil 5.1 Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan pim ölçüleri

5.4 SKK kullanılan takım tezgahı

Şekil 5.2.'de görüldüğü gibi kullanılan tezgah dik başlı freze takım tezgahıdır. Bu tezgahın seçiminde ki en büyük etken otomatik ilerleme ve devir sayısını ayarlanabiliyor olmasıdır. Bu tezgâhlarda, freze çakısının takıldığı başlık ve konumu dik durumdadır. Ayrıca başlığı çeşitli açılarda dönebilir ve açılı işlemler yapmak mümkün olmaktadır. Başlığın dönmesiyle yatay ve düşey konumdaki bütün işlemler yapılabilir. Tezgâhın tablası yatay frezede olduğu gibi hareket ettirilir.



Şekil 5.2 SKK kaynağında kullanılan freze tezgahı

5.5 Kaynak yapılacak malzemenin tezgaha sabitlenmesi

Kaynak yapılacak malzemelerin kaynak yüzeyleri temizlendikten sonra alın altına getirilmiştir. Alın altına getirilen levhalar özel olarak yapılmış tablaya konulmuş ve freze tablanın ilerleme doğrultusunda levhaların kaynak çizgisi paralel olarak ayarlanmıştır. Bağlama pabuçlarıyla sıkılmıştır. Bağlama pabuçlarının arka tarafına dengelemek için parça konulmuştur. Levhalar bağlama pabuçlarına takılan vida ve somunlarla sıkı bir şekilde tablaya montaj edilmiştir. Kaynak yapılacak levhaların kenarları pim merkezini ayarlayarak sıfırlamıştır. Frezede ayarlar sıfırlanmış ve kaynak yapmaya hazır konuma getirilmiştir.

5.6 SKK parametrelerinin belirlenmesi

Literatürde ve ön çalışmadan elde edilen değerler, kaynak parametrelerini belirlemede kullanılmıştır. Kullanılan bu değerler çizelge 5.2.'de verilmiştir. Çizelgedeki kodlama A11, A12, A21,.. şeklinde yapılmıştır. A1 kodu kaynak yapacak olan pim devir sayısını, ikinci rakam ise ilerleme hızını göstermektedir. Örneğin A22 ; 1960 dv/dk, 20 mm/dk dir.

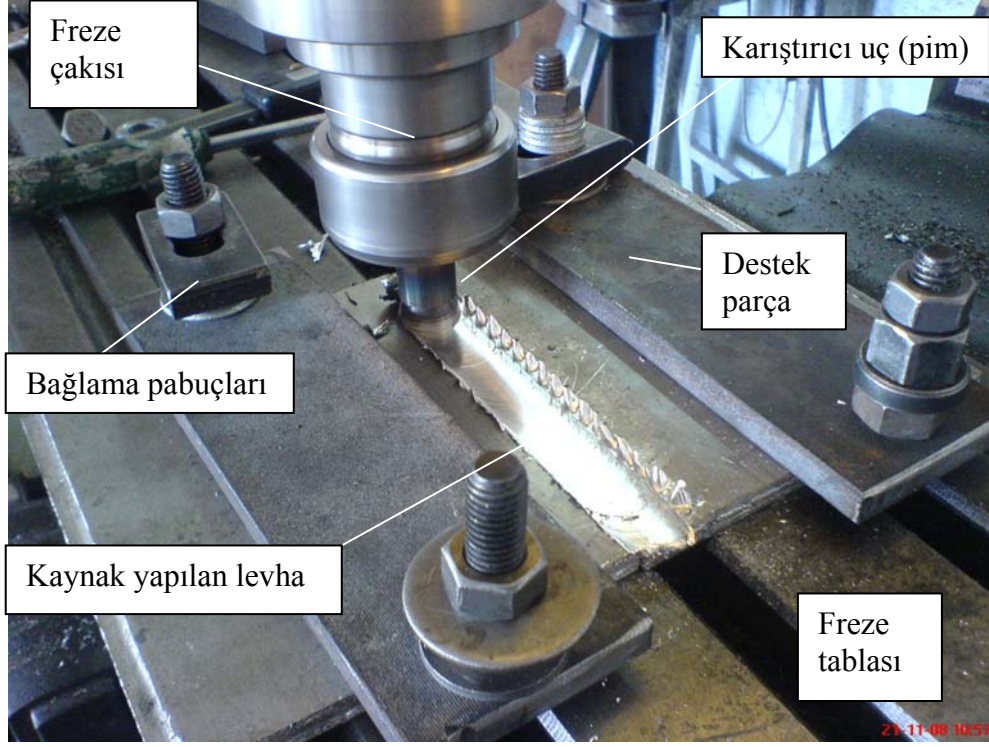
Çizelge 5.2 SKK kaynak parametreleri

Devir sayısı	İlerleme hızı	
	10 mm/dak	20 mm/dak
960 dev/dak	A11	A12
1960dev/dak	A21	A22
2880dev/dak	A31	A32

5.7 SKK kaynağının yapılışı

Freze tablasının 120X150 mm boyutlarında kesilerek hazırlanan numunelerin alın yüzeyleri kaynak işleminden önce kaba zımpara ile temizlenmiştir. Tabla üzerine yerleştirilen levhalar üstten ve yanlardan bastırılarak pabuçlar ve bağlama aparatlarıyla sıkı bir şekilde tezgah tablasına sabitleştirilmiştir.

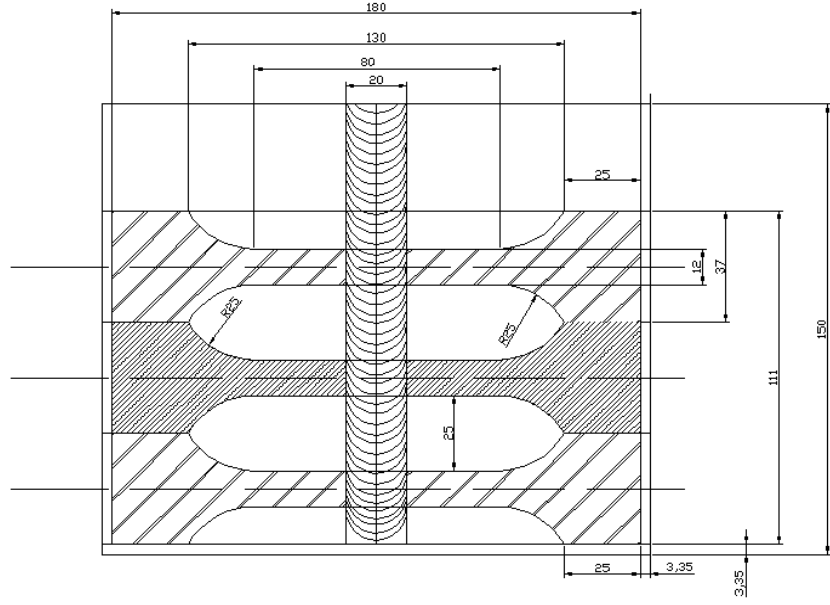
Tezgahın devir ve ilerleme hız ayarlandıktan sonra kaynak yapılacak sac malzemeye SKK ucu temas ettirilerek sıfırlanmıştır. Levha malzemenin yüzeyinden 3,8 mm karıştırıcı uç boyu kadar girerek kaynak işlemine başlanmıştır. Isı oluştuktan sonra ilerleme hızı sabit bir şekilde otomatik olarak verilmiştir. Bu esnada sıcaklık değişimi K tipi (Cr-Ni) termokopul ve infrared termometre ile sürekli olarak ölçülmüştür. Kaynak yapılırken ortam şartları aynı tutulmaya çalışılmıştır. Deneylerde kaynak işlemi esnasında kullanılan freze pensi, SKK ucu, bağlama aparatları ve kaynak işleminin yapılışı fotoğraf olarak Şekil 5.3.'de verilmiştir.



Şekil 5.3 Sürtünme karıştırma kaynağının yapılışı

5.8 Mekanik test ve metalografik numunelerin hazırlanması

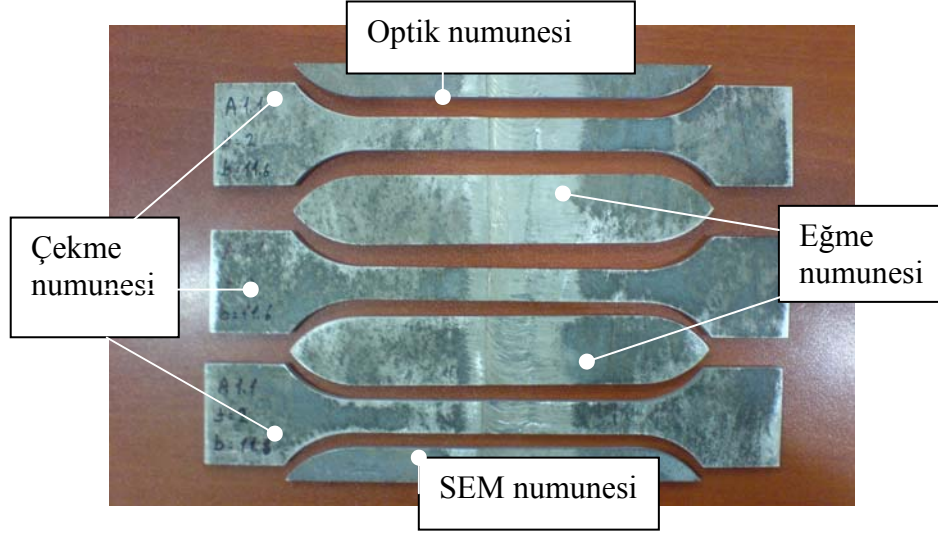
Farklı parametrelerde kaynak yapılan levhalar mekanik test numunelerinin ve metalografik numunelerin hazırlanması için kaynak yapıldıktan sonra parçada kaynak sırasında oluşan çapaklar bir keski yardımıyla temizlenmiştir. Kaynak yapılan ve 240X150 mm boyutlarına gelen kaynaklı numunelerden mekanik test ve metalografik deney numunelerinin çıkartılması amacıyla tel erezyon yöntemi kullanılmıştır. Kaynaklı numuneler için TS 287 standartlarına göre hazırlanan boyutlar çizilmiştir (Şekil 5.4) ve tel erezyonda kesilmeye hazır hale getirilmiştir (Şekil 5.5)



Şekil 5.4 Kaynaklı numunelerin TS 287'ye göre levhadaki dağılımı



Şekil 5.5 Kaynaklı numunelerin levhadaki dağılımı (kesilmeden önce)



Şekil 5.6 Kaynaklı numunelerin levhadaki dağılımı (kesildikten sonra)

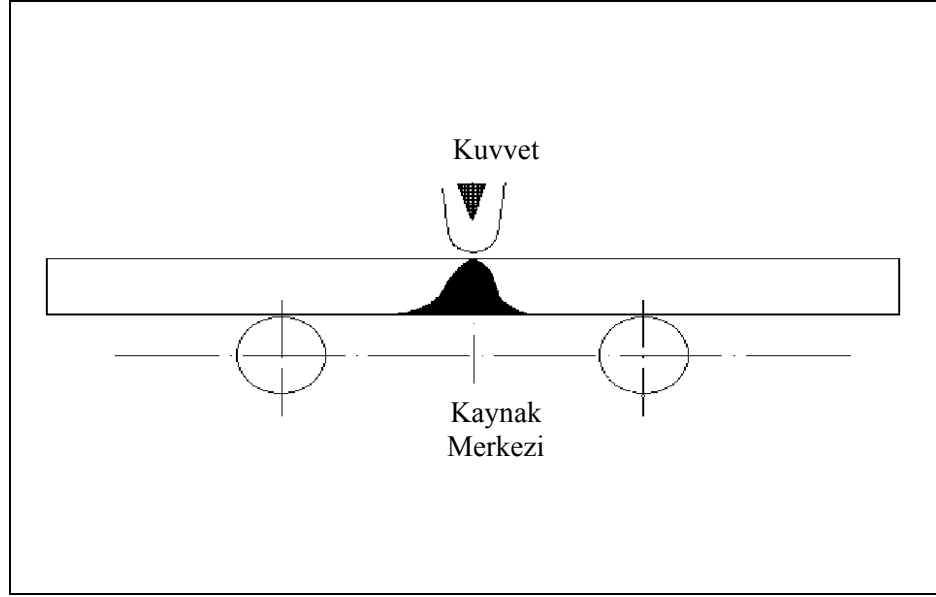
Tel erezyon cihazında numuneler kesilerek çekme, eğme, optik, SEM ve mikrosertlik numuneleri çıkartılmıştır (Şekil 5.6).

5.9 Mekanik testler

Mekanik testler içerisinde en yaygın olanı çekme deneyidir. Bunun nedeni de çekme deneyinden hem malzemelerin mekanik davranışlarıyla ilgili sonuçlar elde edilmesi hem de elde edilen sonuçların mühendislik hesaplamalarında doğrudan kullanılmasıdır. Bu nedenle kaynak numunelerine TS 287 ye uygun olarak çekme deneyi yapılmıştır. Çekme deneyi numunesi Şekil 5.7’de ve deneyin yapılışı da Şekil 5.7 ’de gösterilmiştir.

Telerezyonda kesilen çekme deney numunelerinin üzerine % uzamayı cihazın üzerindeki kameralarla hesaplayabilmek için çizgi ile işaret konulmuştur. Çekme deneyi kameralı sistem ile çalışan Shimadzu AG-IS 250KN cihazı ile 4mm/dak hızlarda yapılmıştır.

Eğme deneyi 4 mm/dak çekme hızları kullanılarak Shimadzu AG-IS 250KN cihaz ile yapılmıştır. Eğme deneyi, deney numunelerinin kaynak bölgesine ters taraftan kopana kadar kuvvet uygulanmıştır. Eğme deneyinin yapılışı Şematik olarak Şekil 5.8’de verilmiştir. Malzemede çatlama görüldüğü an deneye son verilmiştir ve grafikler yer değiştirme dikkate alınarak çizilmiştir.



Şekil 5.7 Haddelenmiş AZ31 Mg alaşımının eğme deneyi

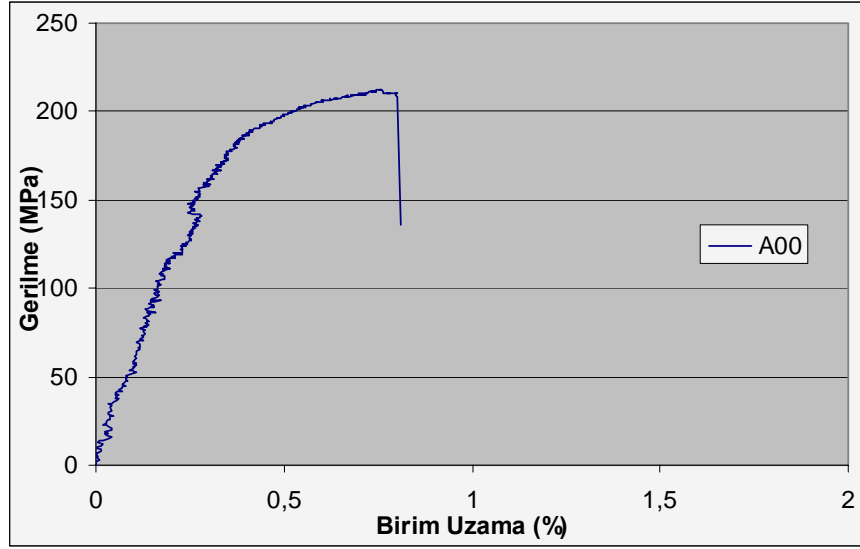
Mikrosertlik deneyi digital microhardness tester HVL 1000 cihazı ile 200 gr yük ve 10 saniye sürede yapılmıştır. Sertlik işlemi kaynak bölgesinin orta noktasından 12 mm sıvama yönünde ve ters yönde bir mm aralıklarla ölçüm yapılmıştır.

Tel erozyon ile kesilen numunelerin kaynak kesitine dik olacak şekilde optik ve SEM numuneleri alındıktan sonra mekanik zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmıştır. Son parlatma disk parlatma makinesi ile 0.03 μm elmas pasta kullanılarak parlatılmıştır. Daha sonra numuneler 5 g pikrik asit, 5 ml asetik asit, 10 ml su ve 100 ml etanol ile 5 saniye bekletilerek dağlanmıştır [17]. Mikroyapısal analizler Shimadzu 2000 HMVL ışık mikroskobu ve JEOL JSM 6060 SEM cihazı kullanılarak yapılmıştır.

6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR

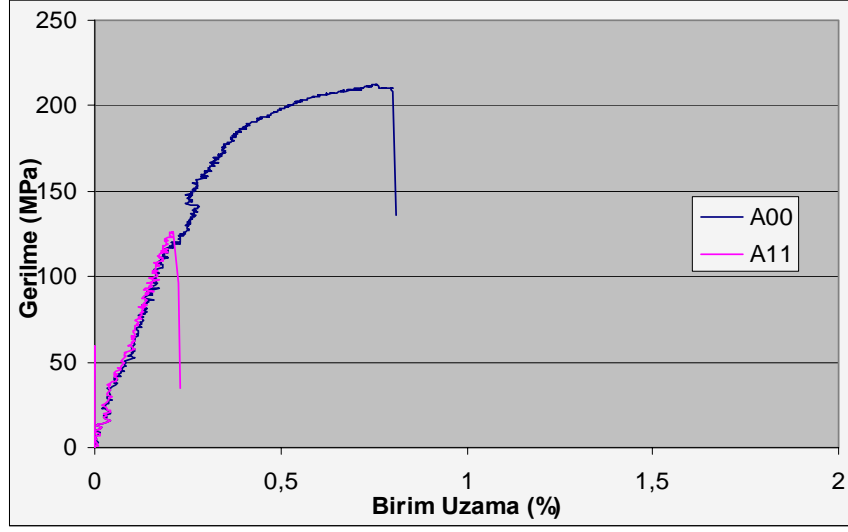
6.1 Çekme deney sonuçları

Kaynaklı birleştirmelerin çekme mukavemetini esas metal ile mukayese etmek amacı ile AZ31 Mg alaşımından çekme numunesi hazırlanarak çekme mukavemeti ölçülmüştür. Orijinal AZ31 Mg alaşımından tel erezyonla çıkartılan ve A00 olarak kodlanan deney numunesinin çekme deney grafiği Şekil 6.1.'de verilmiştir. A00 deney numunesinin max. çekme mukavemeti 210 MPa olarak ölçülmüştür.



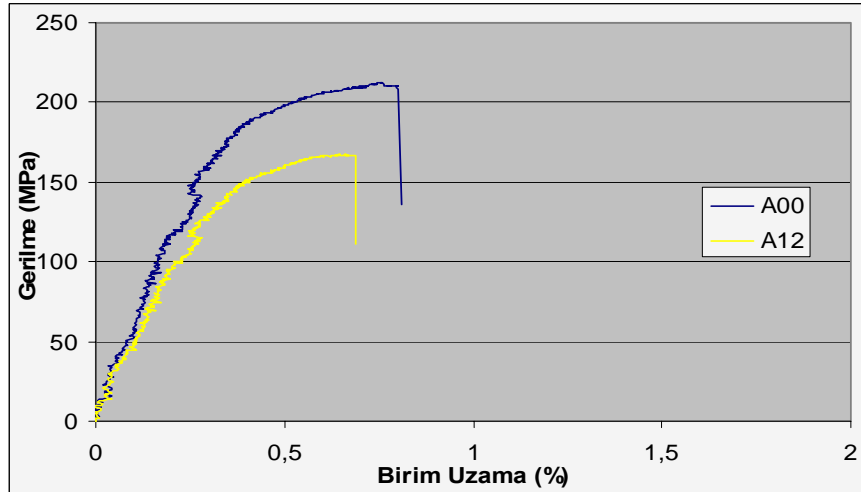
Şekil 6.1 Haddelenmiş AZ31 Mg alaşımının A00 kodlu çekme deney grafiği

Deneylerde 960 dev/dak ve 10 mm/dak ilerleme hızlarında birbirlerinden ve A11 ile kodlanan numunenin çekme deneyi grafiği şekil 6.2'de verilmiştir. Grafikten kaynaklı birleştirmenin gevrek bir kırılma sergilediği açıkça görülmektedir. Bu numunenin maksimum çekme mukavemeti değeri olan 126 MPa, orijinal ana malzemenin çekme mukavemetine göre (210 MPa) % 60'lık bir değer göstermiştir. Buda kaynaklı bir çekme mukavemeti açısından oldukça düşüktür. Dolayısıyla 960 dev/dak ve 10 mm/dak sürtünme karıştırma kaynak şartlarında iyi bir birleşme sağlanamadığı tespit edilmiştir. Bunun nedeninin ise bu şartlarda mekanik karıştırma işlemi için gerekli olan ısının elde edilemediğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu ise ileride verilecek sıcaklık grafiği ile teyit edilmiştir.



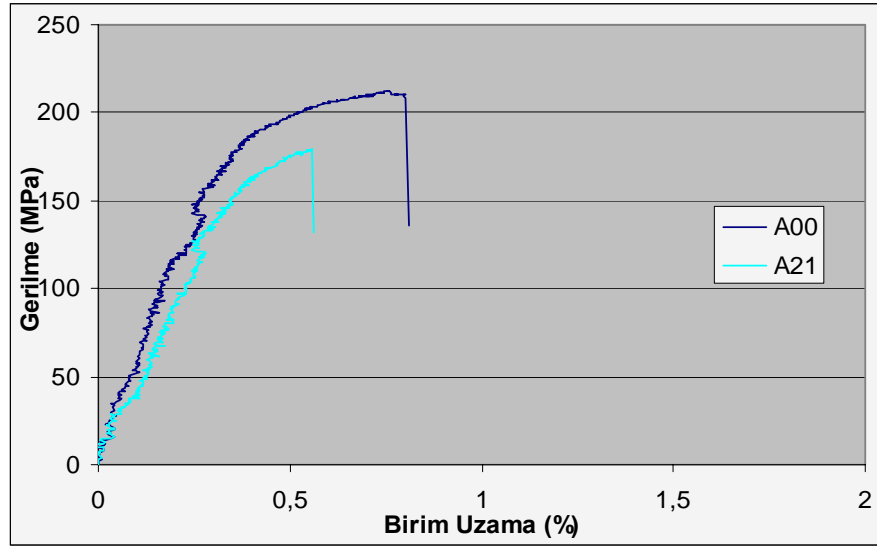
Şekil 6.2 SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A11 kodlu çekme deney grafiği

A12 Deney numunesinin çekme deney grafiği Şekil 6.3.'de verilmiştir. A12 kodlu numune 960 dev/dak'da ve 20 mm/dak'da yapılan kaynağın en yüksek çekme mukavemeti 166 MPa olarak ölçülmüştür. Birleşme mukavemeti ana malzemeye göre % 79 olarak ölçülmüştür. İlerleme hızı arttığından birim alana gelen ısı azaldığından malzemenin mukavemeti artmaktadır. Aynı devirde, ilerleme hızına göre Şekil 6.3 'de görüldüğü gibi ilerleme hızı arttıkça mukavemette artmıştır.



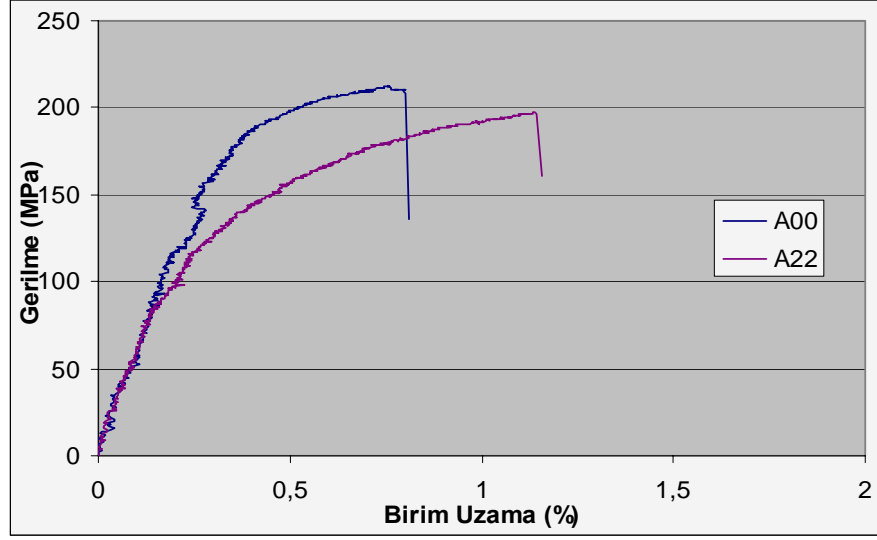
Şekil 6.3 SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A12 kodlu çekme deney grafiği

A21 Deney numunesinin çekme deney grafiği Şekil 6.4'de verilmiştir. A21 kodlu numune 1960 dev/dak'da ve 10mm/dak'de yapılan SKK max. çekme mukavemeti 179 MPa olarak ölçülmüştür. A11 numunesine benzer şekilde gevrek kırılma görülmüştür. İlerleme hızının düşük olması nedeniyle birim alana birim zamanda giren ısı miktarı arttığından malzemenin mukavemeti A11 (126 MPa) numunesine göre bir miktar artış göstermesine rağmen orjinal malzemenin % 83 kadar çekme mukavemeti değeri vermiştir.



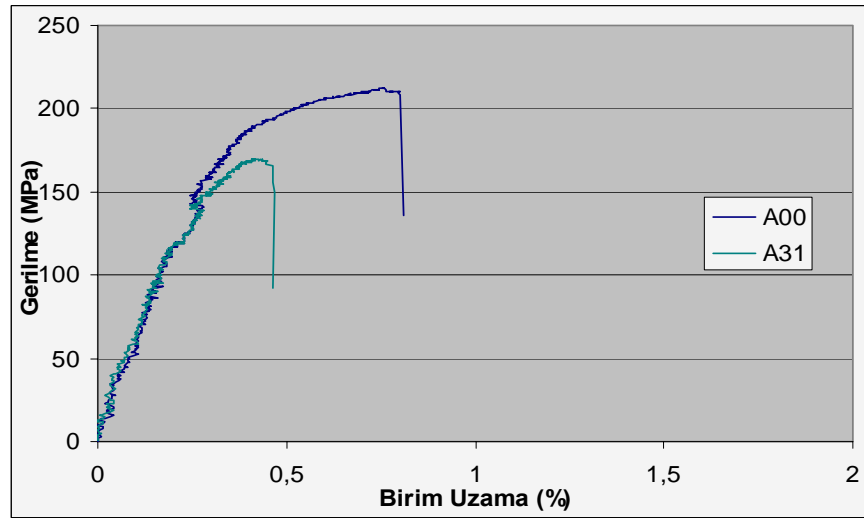
Şekil 6.4 SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A21 kodlu çekme deney grafiği

Buraya kadar ki çalışmalarda devir sayısının artışının çekme mukavemeti değiştirdiği ölçülmüştür. Optimum devir sayısını ve ilerleme hızını tespit etmek amacıyla seçilen 1960 dev/dak ve 20 mm/dak ilerlemede yapılan kaynaklı birleştirmenin çekme deney grafiğinde şekil 6.5'de görülmektedir. Deneyde max. çekme mukavemeti olarak 197 MPa ölçülmüştür. Bu değer ise ana malzemeye göre %93.8 bir değer olup oldukça yüksek bir değerdir. Malzemenin sünekliliği artmıştır. Isı girdisi azaldıkça haddelenmiş ve daha gevrek bir yapıda olan orijinal malzemeye göre daha süreklilikli bir çekme grafiği sergilenmiştir. Bu da optimum devir ve ilerleme hızına bağlı olarak oluşan ısıyla homojenize olmuş bir yapının varlığını göstermektedir. Bu sonuç mikroyapıda daha da net bir şekilde görülebilecektir.



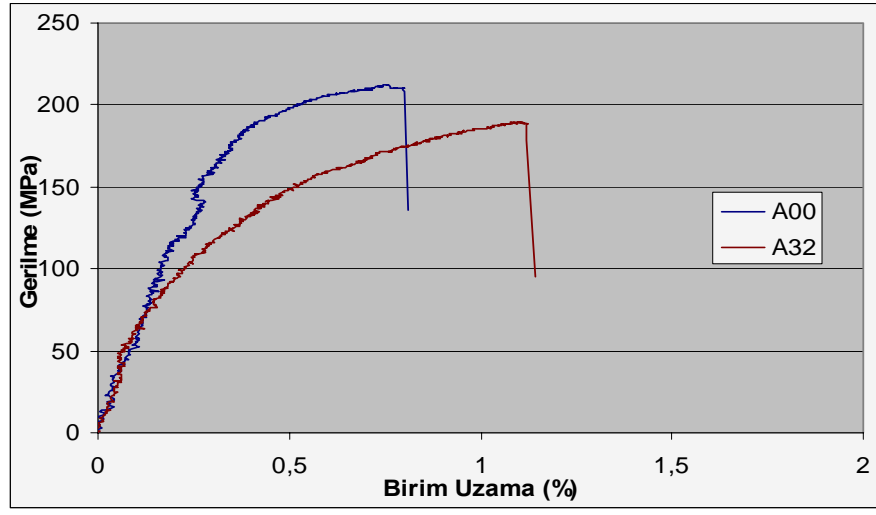
Şekil 6.5 SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A22 kodlu çekme deney grafiği

Sürtünme karıştırma kaynağında devir sayısının artışının malzemede ısı artışına neden olduğu bilinmekte ve yapılan deneylerde de görülmektedir. Bu nedenle devir sayısı artırılmış ve deneyler 2880 dev/dak'da yapılmaya devam edilmiştir. 2880 dev/dak ve 10 mm/dak ilerlemede yapılan SKK birleştirilmiş çekme deneyi grafiği şekil 6.6'da verilmiştir. Burada devir sayısının artışıyla, sıcaklık Şekil 6.19'da görüldüğü gibi artmıştır. Ancak artan sıcaklık kaynakta çökmeye ve kenarlarda çapak birikmesine neden olmuştur. Buda kaynak bölgesinin incelenmesine ve de çentik etkisi oluşumuna sebep olmuştur. Bu nedenle de A22 numunesine göre daha düşük çekme mukavemeti değeri vermiştir. Bu deneyin çekme mukavemeti değeri 169 MPa olarak ölçülmüş olup, birleşme mukavemeti ana malzemeye göre % 80 olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.6 SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A31 kodlu çekme deney grafiği

Yüksek devirlerde ilerlemenin etkisinin görülebildiği deney şartlarında A32’de yapılan SKK birleşiminin çekme deneyi sonucu grafik olarak Şekil 6.7’de verilmiştir. A32 kodlu numune 2880 dev/dak ve 20 mm/dak’da yapılan SKK max. çekme mukavemeti 189 MPa olarak ölçülmüştür. A31’e göre malzemenin sünekliliği artmış ve kenarda birikme ve çökme daha az olarak tespit edilmiştir. A31’e göre ısı girdisi az olduğundan mukavemeti daha iyi ölçülmüştür.



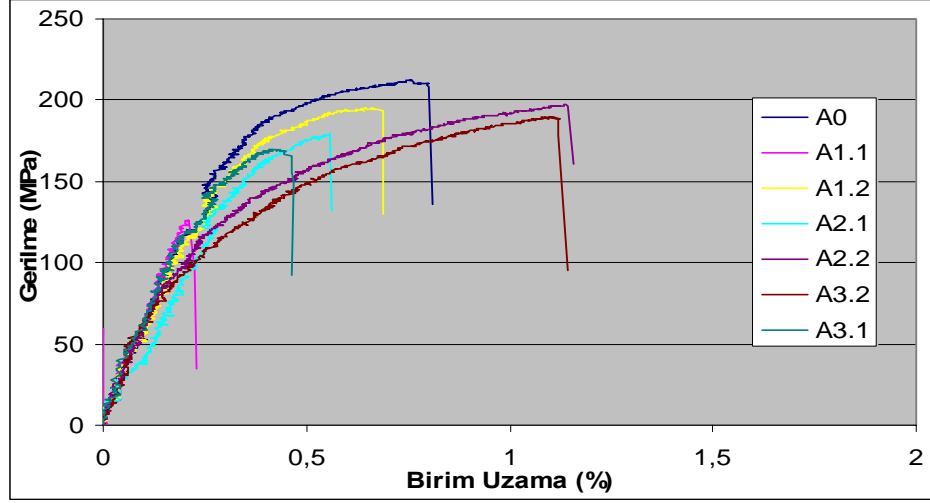
Şekil 6.7 SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A32 kodlu çekme deney grafiği

Çizelge 6.1 SKK kaynak parametreleri ve çekme mukavemeti

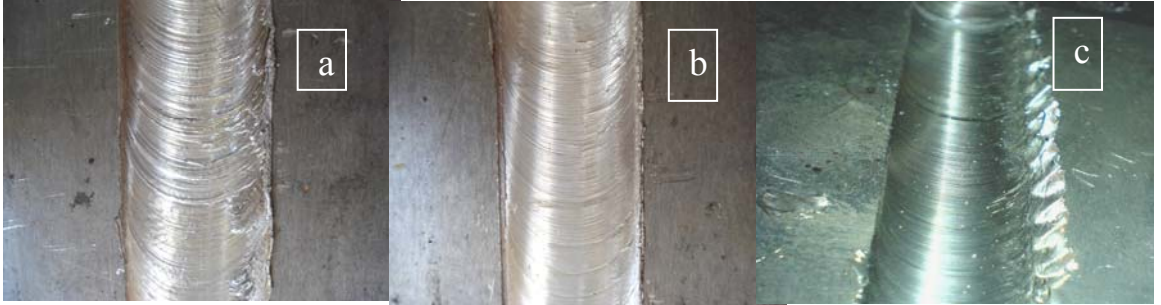
Devir sayısı (dev/dak)	Çekme mukavemeti (MPa)		
	İlerleme hızı (mm/dak)		A00
	10	20	120
960	A11-126	A12-166	
1960	A21-179	A22-197	
2880	A31-169	A32-189	

AZ31 Mg alaşımı farklı parametrelerde SKK ile birleştirilmiştir. Bu parametrenin çekme mukavemetine etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için tek bir grafik üzerinde çizilerek gösterilmiştir (Şekil 6.8). Sonuç olarak kaynak parametrelerinin çekme mukavemetine direkt olarak etkilediği görülmektedir. Karıştırıcı ucun devir sayısı arttıkça çekme mukavemeti artmıştır. Ancak en üst devir olarak seçilen A32 kodlu numunede kenarlarda çökme ve yığılma

olmuştur (şekil 6.9). Grafikten en iyi birleşme mukavemetinin A22 kodlu numune de görülmektedir.

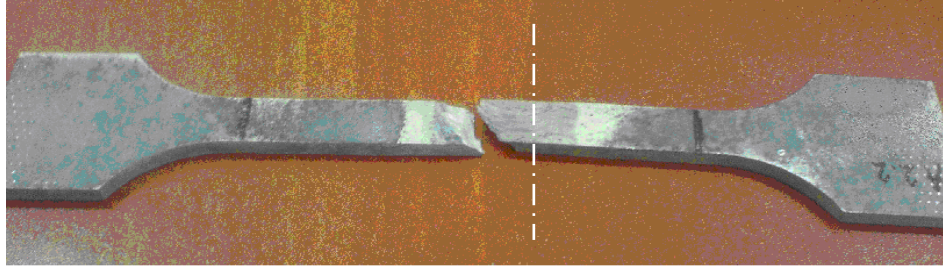


Şekil 6.8 AZ31 Mg alaşımın farklı parametrelerde yapılan kaynak birleşimlerinin çekme mukavemeti grafikleri



Şekil 6.9 Farklı devir ve ilerleme hızlarında yapılan kaynakların yüzey görünümü; a) 960 dev/dak, 20 mm/dak (A12), b) 1964 dev/dak, 20 mm/dak (A22), c) 2880 dev/dk, 20 mm/dak (A32).

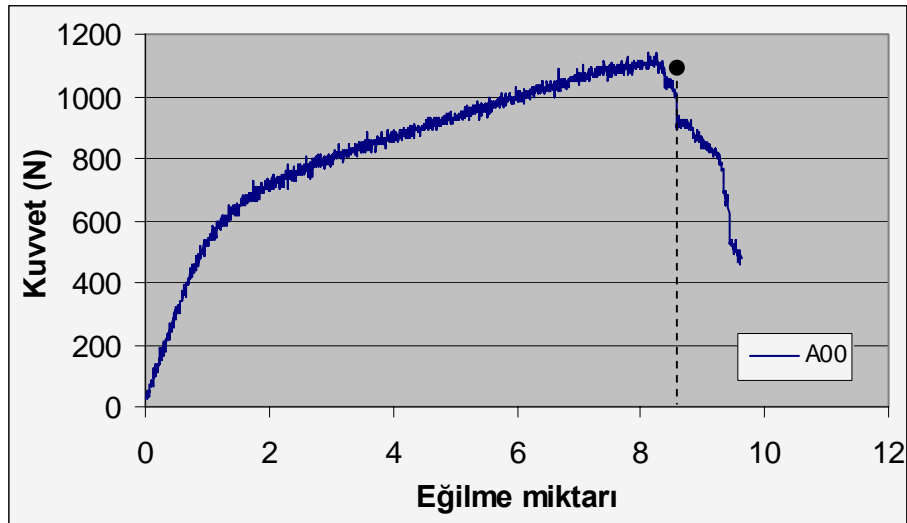
Çekme deneyi sonucunda kopmuş olan numuneler incelendiğinde özellikle düşük devir (A11) kopma birleşme çizgisinden koparken daha yüksek devirlerle ve iyi bir birleşme devrinde (A22) kopma ITAB'den gerçekleşmiştir. Şekil 6.10 bu şekilde kopan bir numunenin makro fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 6.10 A22 çekme deney sonrası görünüşü

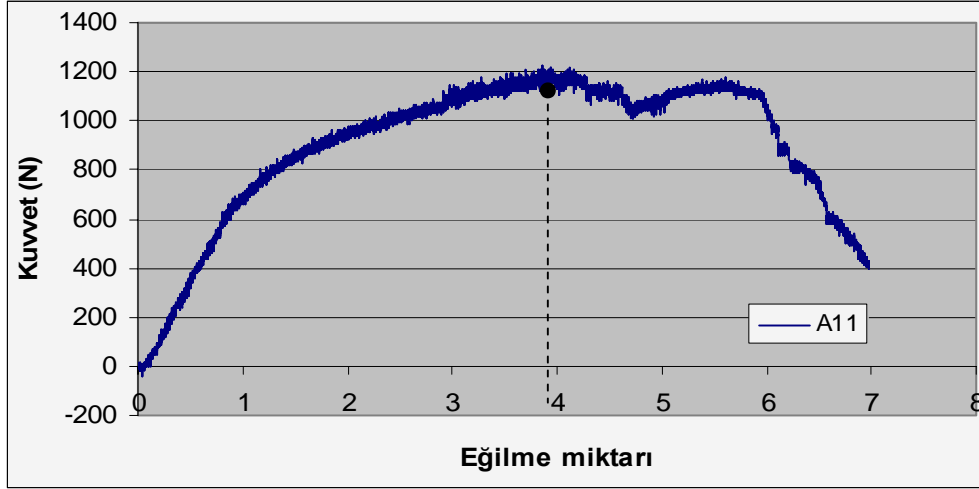
6.2 Eğme deney sonuçları

Haddelenmiş AZ31 Mg alaşım levhasının eğme deneyinde hadde yönüne dik olacak deneyler yapılmıştır. A00 kodlu haddelenmiş AZ31 Mg alaşımının eğme diyagramında görüldüğü gibi gevrek bir yapıya sahiptir. Eğme deneyinde orijinal haddelenmiş AZ31 alaşımı aniden çatlamış ve kırılmıştır. Bunun nedeni haddelenerek plastik deformasyonla yönlendirilmiş ve gevrekleşmiş tanelerden kaynaklandığı düşünülmektedir.



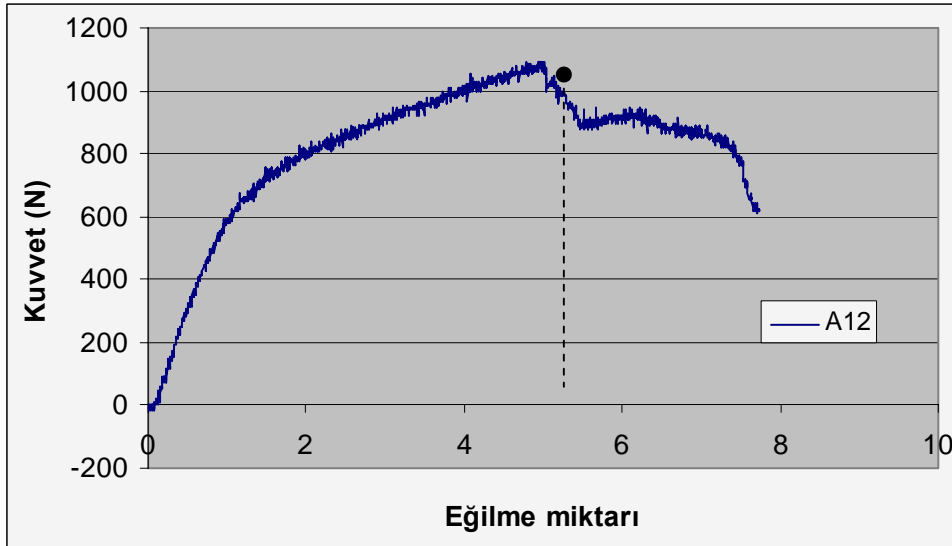
Şekil 6.11 Haddelenmiş AZ31 Mg alaşımının A00 kodlu eğme deney grafiği

Devir sayısının 960 dev/dak ve ilerlemesinde 10 mm/dak olarak uygulandığı A11 kodlu numunede, kaynak esnasında yeterli sürtünme ısı oluşmamış ve eğme grafiğinde de görüldüğü gibi gevrek bir yapı oluşturmuştur. Çünkü sıcaklığı grafiğinde verileceği gibi düşük devirler düşük ısı girdisine sebep olmuştur ve yeterli birleşme sağlanamamıştır. Böylece daha düşük eğme mukavemeti değeri vermiştir (Şekil 6.12).



Şekil 6.12 SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A11 kodlu eğme deney grafiği

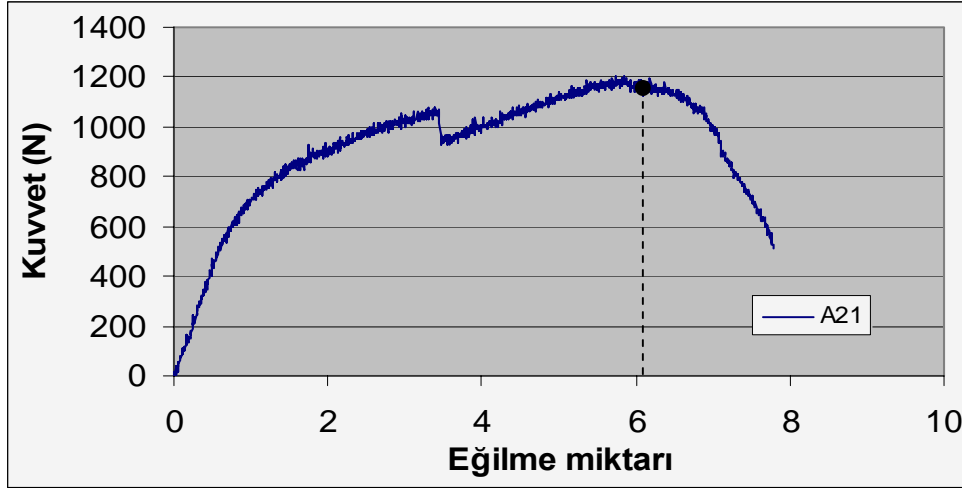
A12 kodlu numunede düşük devir ve yüksek ilerleme hızlarında da kaynakta Şekil 6.19'da görüldüğü gibi yeterli sürtünme ısı oluşmamış ve çekme deneylerinde de verildiği gibi gevrek bir kırılma sergilemiştir. A11 ile kıyaslandığında ilerlemenin artmasına rağmen eğme mukavemeti aynı devir için artmamıştır. Bunun nedeni ilerlemenin artışı ile birlikte oluşan ısı dağılımı ile sıcaklık grafiğinde görüldüğü gibi, sıcaklık artışının yeteri kadar artmamasıdır.



Şekil 6.13 SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A12 kodlu eğme deney grafiği

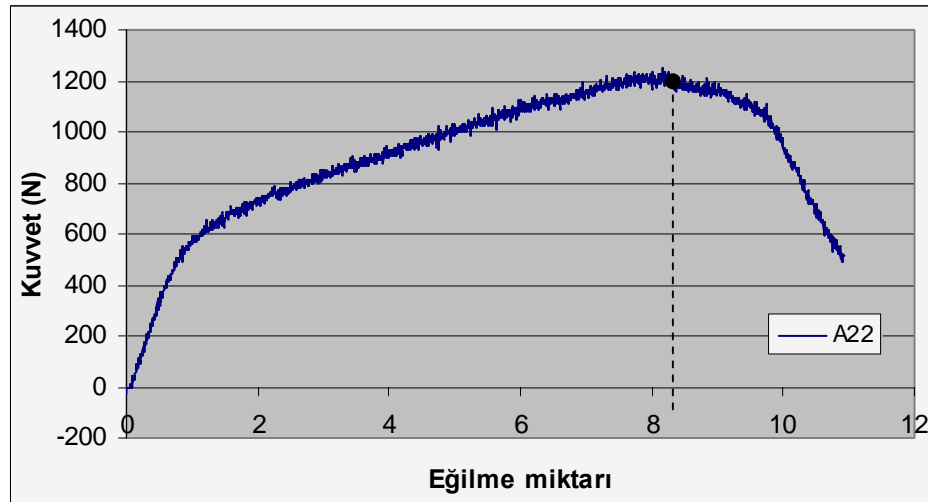
A21 kodlu numunede 1964 dev/dak ve 10 mm/dak ilerleme hızlarında yapılan kaynakta A11'e göre kıyaslandığında ve sıcaklık grafiği dikkate alındığında oluşan sıcaklığın artışıyla

birlikte, haddelenmiş mikroyapı değişerek daha homojen hale gelmiştir (mikroyapılarda görülebilmektedir). Buda yüksek sıcaklık neticesinde gevrekliği azalmış ve malzeme daha süneklilik göstermiştir. Böylece eğme deneyi daha yüksek değerler ve daha derin bir çökme şekil değiştirme meydana getirmiştir.



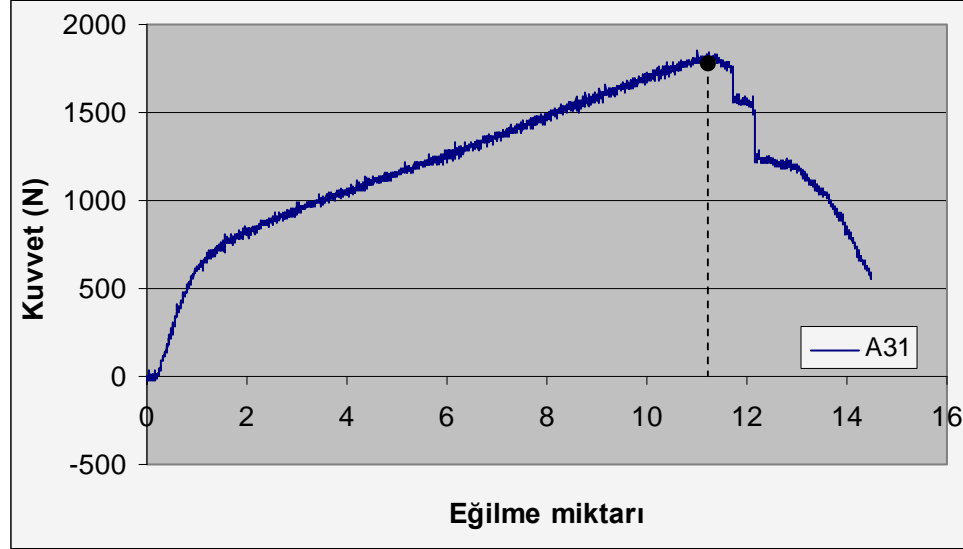
Şekil 6.14 SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A21 kodlu eğme deney grafiği

A22 kodlu numunede kaynak esnasında sürtünme ısısının artışı ile birlikte yeniden kristalleşen bölge genişlemiş çekme deneyinde de görüldüğü gibi sünekliliği artmış ve eğme deneyinde görüldüğü gibi eğilme miktarı artmıştır.



Şekil 6.15 SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A22 kodlu eğme deney grafiği

Şekil 6.16'daki grafikte de görüldüğü gibi en yüksek eğme mukavemetini A31 ile kodlanmış olan 2880 dev/dak dönme hızı ve 10 mm/dak ilerleme hızlarında yapılan kaynağın verdiği görülmektedir. Sıcaklık grafiğinde A31 kodlu numunede daha yüksek sıcaklıkların elde edildiği görülmüştür. Buna bağlı olarak eğme grafiğinde en yüksek eğilme miktarı ve maksimum kuvvette 1210 N olarak görülmüştür. Bu ise orijinal haddelenmiş malzemeden daha yüksek eğme mukavemeti ve daha geniş bir eğilme miktarı değerini vermesine neden olmuştur. Bu ise kaynak metalinde oluşan sıcaklıktan ve bunun nedeni olarak mikroyapılarda görülecek olan homojen tane yapısına sahip olan yeniden kristalleşmiş bölgeden kaynaklandığı düşünülmektedir. Malzemenin mikroyapısı incelendiğinde eş eksenli ve daha küçük tanelerin oluştuğu için malzemenin eğme deneyinde malzemede kopma görülmemiştir.



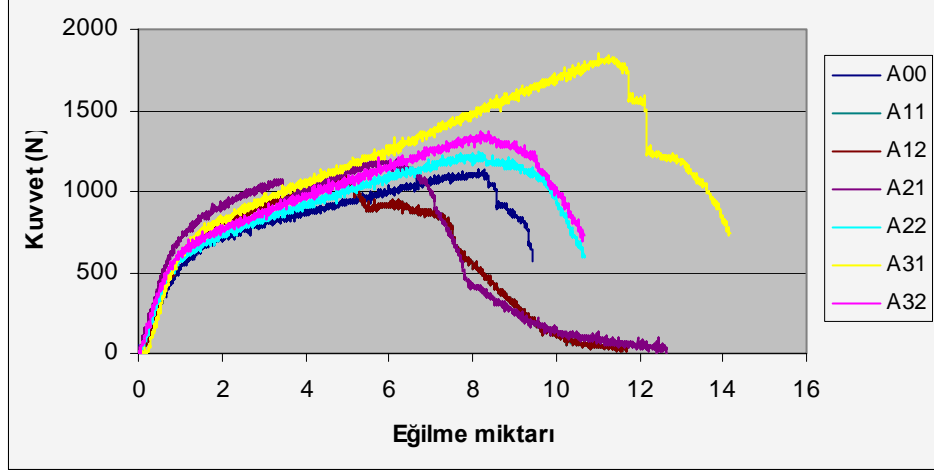
Şekil 6.16 SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A31 kodlu eğme deney grafiği

2880 dev/dak'da ilerleme hızının 10 mm/dak'dan 20 mm/dak'ya artırılması neticesinde elde edilen eğme deneyi grafiği şekil 6.17'de görülmektedir. Yüksek devirden kaynaklanan ısı neticesinde yine eğme deneyinde eğilme miktarı artmıştır. Fakat ilerleme hızının artması neticesinde A31 kodlu numuneye göre daha düşük eğme mukavemeti değeri ölçülmüş ve eğilme miktarı da azalmıştır. A31 dikkate alındığında ilerlemenin artmasına rağmen eğme mukavemeti aynı devir için artmamıştır. Bunun nedeni ilerlemenin artışı ile birlikte oluşan ısı dağılımı ile birlikte sıcaklık grafiğinde (Şekil 6.19) görüldüğü gibi, sıcaklık artışının yeteri kadar artmamasıdır.



Şekil 6.17 SKK yapılmış AZ31 Mg alaşımının A32 kodlu eğme deney grafiği

Farklı deney şartlarında birleştirilmiş kaynaklı birleşimlerin eğme deneyi sonuçları deney şartlarının etkisinin daha iyi belirlenmesi açısından tek bir grafik olarak oluşturulmuş ve Şekil 6.18'de verilmiştir. Şekil 6.18'de görüldüğü gibi devir sayısı arttığında eğme mukavemeti artmış, aynı şekilde ilerleme hızı da arttığında eğme mukavemeti artmıştır [18]. Ancak aynı devir için ilerleme arttığında ve örnek olarak A31 ile A32 karşılaştırıldığında eğme mukavemeti artmıştır. Buda birim zamanda birim alana giren ısı miktarı aynı devir için artmamaktadır. Bu grafikte bunu açıkça göstermektedir. Dolayısıyla bu ısı girdisine göre yüksek devir ve düşük ilerlemede en iyi eğme mukavemeti değeri elde edilmiştir. Fakat bu artış aynı devir için dikkate alındığında ilerlemenin artmasına rağmen eğme mukavemeti aynı devir için artmamıştır. Bunun nedeni ilerlemenin artışı ile birlikte birim alana birim zamanda aktarılan ısı azalmaktadır. En yüksek eğme mukavemetini A31 ile kodlanmış olan 2880 dev/dak dönme hızı ve 10 mm/dak ilerleme hızlarında yapılan kaynağın verdiği görülmektedir. AZ31 Mg alaşımının kaynağında kaynak parametrelerinin birleşimin eğme mukavemetinde etkili olduğu ve belirli bir devir ve ilerleme hızının tespit edilmesi gerektiği görülmüştür.



Şekil 6.18 Farklı deney parametrelerinde birleştirilen numunelerin eğme deney grafikleri

6.3 Mikrosertlik deney sonuçları

SKK esnasında farklı devir ve ilerleme hızlarının kaynak esnasında malzemeler üzerinde oluşturduğu ısı farklılıkları mikroyapıyı ve çekme-eğme mukavemetini etkilediği gibi bu sonuçlardan bağımsız olmayan sertlik değerini de etkilemiştir. Sıcaklık artışının sertlikte de önemli bir fark oluşturduğu dikkati çekmektedir. Isıdan etkilenmiş bölgede (ITAB) karıştırıcı ucun mekanik bir etkisi olmamasına rağmen, kaynak dinamik olarak yeniden kristalleşmiş bölgeye yakın olduğu için malzemede ısıdan dolayı bir yumuşama meydana gelmiştir.

Mikro sertlik ölçümlerinde AZ31 haddelenmiş magnezyum levhanın sertliği 83 HV olarak ölçülmüştür. SSK yapılmış malzemelerde ısı girdisinin malzemenin sertliğine etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Mikrosertlik deney sonuçları Çizelge 6.2'de verilmiştir.

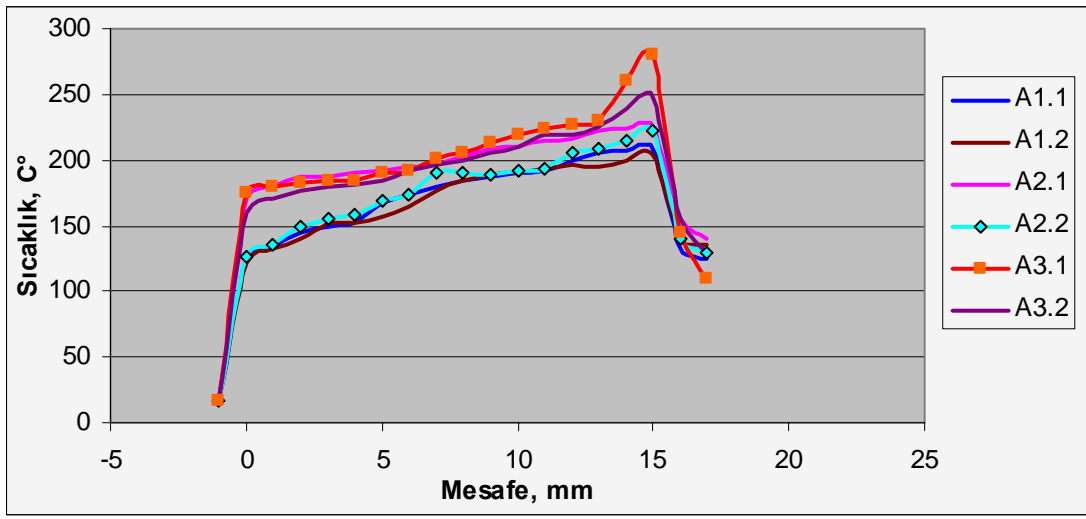
Çizelge 6.2 Farklı SKK parametrelerin de oluşan sertlik değışimleri

Mesafe (cm)	A00	A11	A12	A21	A22	A31	A32
12	83	83	83	83	83	83	83
11	83	80	75,1	82	78,5	72,4	81,9
10	83	79	76,8	79,4	82,4	68,3	73,2
9	83	83,5	62,4	75,2	83,9	70,4	72,2
8	83	78,8	87,9	73,2	80	66,4	68,8
7	83	82,5	78,8	87,2	73,9	68,7	82,1
6	83	118	68,2	68,7	73,3	69,2	77,5
5	83	91,1	68,6	87,6	86,2	68,6	77,2
4	83	72,8	72	84	94,2	60,5	72
3	83	97,7	76,8	80	50	65,5	65,5
2	83	86,6	60,7	84	64,5	65	71,6
1	83	72,7	56,6	80	71,9	63,4	69,7
0	83	81,1	57,8	65,2	74,9	68	76,7
1	83	82,2	60	76	77,8	59,8	63,6
2	83	101	69,2	64	76,6	65	76
3	83	96,7	60	85	71,6	77,9	74,6
4	83	94,8	70	77,6	75,5	69,2	65,8
5	83	86	80	92	64,4	68,2	68,3
6	83	87,9	75,5	78	60	65	82,8
7	83	83,7	66,6	95,5	63,2	71,5	83
8	83	91,3	68,3	76	86	65	77
9	83	87,7	83,1	82	82	55,3	80
10	83	80,7	83	83	83	80	83
11	83	80	83	83	83	83	83
12	83	82	83	83	83	83	83

Çizelge 6.2 da kaynak ve her iki tarafından alınan sertlik ölçümlerinde ortalama olarak tüm parametrelerde elde edilen sertlik değeri (76 HV) ana malzemenin sertliğinden (83 HV) düşüktür. Isıdan etkilenmiş bölgede (ITAB) mekanik deformasyon olmamasına rağmen, kaynak merkezine yakın olduğu için malzemede ısıdan dolayı bir yumuşama meydana gelmiştir. Bu sonuçların diğer, benzer çalışmalarda da görüldüğü ifade edilmiştir [19-20].

SKK esnasında karıştırıcı ucun devir sayısının oluşan sertlik üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir. Yani devir sayısının artışı ile birlikte sertlikte bir azalma meydana gelmektedir. Bunun yüksek devirlerde kaynak esnasında oluşan kaynak ısısından dolayı oluştuğu düşünülmüş ve benzeri sonuçlar alındığı ifade edilmiştir [20]. Kaynak esnasında ilerleme hızının artışı ile birlikte devir sayısının aksine, yeterli yumuşamanın sağlanamamasından dolayı

sertlikte daha az bir düşme görülmüştür [14]. Böylece A11 kodlu numuneye göre A31 kodlu numunenin kaynak bölgesindeki sertliği daha düşük çıkmıştır. Aynı şekilde ilerleme hızına bağlı olarak sertlik değişimi dikkate alındığında, A31 kodlu numunede elde edilen sertlik ortalama olarak A32 kodlu numunede elde edilen sertlikten daha düşüktür. Bunun sebebi de yukarıda da açıklandığı ve sıcaklık pratiğinde görüldüğü gibi, kaynak esnasında oluşan ısı girdisinin malzemede oluşturduğu sıcaklıktan dolayıdır. Şekil 6.19 Farklı SKK parametrelerin de oluşan sıcaklık değişimleri görülmektedir.



Şekil 6.19 Farklı SKK parametrelerin de oluşan sıcaklık değişimleri

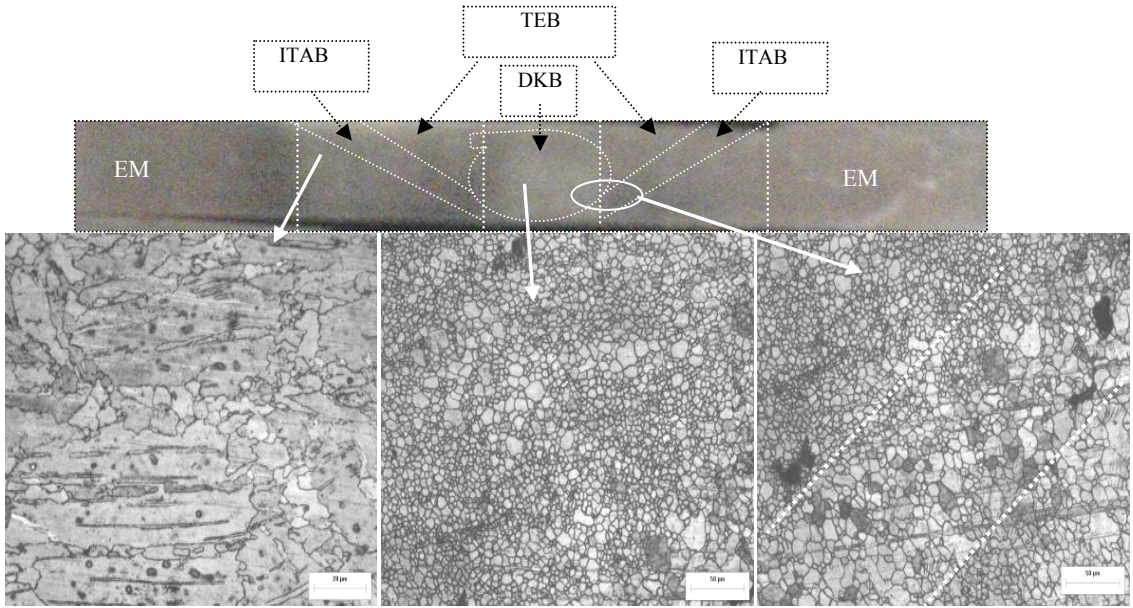
6.4 Mikroyapı sonuçları

SKK kaynağı yapılan AZ31 mg alaşımının kaynaktan sonraki mikroyapıları Şekil 6.20.'de verilmiştir. Burada ana malzeme tipik bir haddeleme sonrası mikroyapıyı sergilemiştir Şekil 6.20a. Burada uzun ve yönlendirilmiş tanelerin, ince ikinci faz parçacıkları içerdiği görülmektedir. Ana malzemenin mikroyapısı esas olarak tane sınırları boyunca yayılmış intermetalik bileşikler ve mg içinde çözülmüş katı hal çözelti tanelerinden oluşmaktadır. Termomekanik olarak etkilenmiş bölgede (TEB), yeterli ısı oluşmaması ve yetersiz deformasyon gerilimi nedeniyle yeniden kristalleşme oluşmamıştır. Şekil 6.20c. Kaynak dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) ise SKK esnasında oluşan sürtünme ısı ve plastik deformasyon nedeniyle ince yeniden kristalleşmiş taneler yoğun olarak oluşmuştur. DKB nin tane boyutu ana malzemenin tane boyutundan oldukça küçüktür. Isıdan etkilenmiş bölgenin (ITAB) tane boyutu, matris içerisinde çözülmüş veya kabalaşmış olan taneler ile dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB)'den daha kabadır. Bu yüzden ısıdan etkilenen

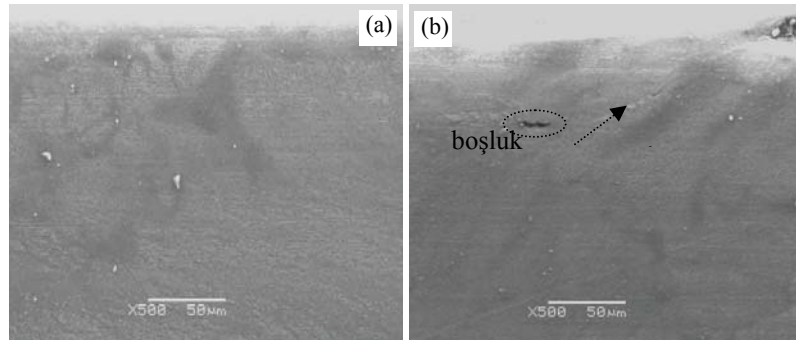
bölge (ITAB), genellikle SKK da birleşimin en zayıf bölgesidir. Bu bölgede SKK esnasında oluşan ince ve homojen tane yapısı plastik davranışı geliştirmekte ve yüksek sıcaklıklarda malzemenin şekillendirilebilirliğini artırmaktadır [20]. Termal olarak ısıdan etkilenmiş bölge (TEB) ve dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) arasındaki ara yüzeyi de göstermektedir şekil 6.20c. TEB de taneler ciddi şekilde deforme olmuştur. Sürtünme karıştırma kaynağı esnasında aynı devirde yüksek ilerleme hızlarında kaynakta düşük ısı girdisi ile DKB de küçük taneler oluşmuştur [16].

Haddelenmiş AZ31 Mg alaşımının SKK'ında üç mikroyapısal bölgeden oluştuğu görülmektedir. Bunlar; dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB), termomekanik olarak etkilenmiş bölge (TEB) ve ısıdan etkilenmiş bölgedir (ITAB) ve Esas metal (EM) dir. DKB'si sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış AZ31 ve diğer alaşımlarının kaynağında olduğu gibi havuza benzer bir kesit bölge sergilemiştir [9].

Farklı parametrelerde kaynak yapılan AZ31 alaşımının, kaynak birleşme bölgesinde alınan mikroyapı ve SEM görüntüleri şekil 6.21 ve şekil 6.20'de görülmektedir. Optik görüntülerde, Esas Metal (EM) tipik bir haddelenmiş tane yapısını götürmektedir. Bu yapı kaynak esnasında karıştırıcı ucun termomekanik etkisinden dolayı tanelerinde incelme olarak kendini göstermiştir. Kaynağın merkezinde ise dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge DKB'de görüldüğü gibi yeniden kristalleşmiş daha ince ve homojen görünümlü bir tane yapısı oluştuğu görülmektedir. Bu da oluşan ısının etkisini göstermektedir. Bu eş eksenli ve daha küçük taneli yapı malzemenin haddelemeden dolayı oluşan ince uzun tanelerin sergilediği gevreklik özelliğinin daha yumuşak olmasına sebep olmuştur. Böylece eğme deneylerinde ve çekme deneylerinde görüldüğü gibi süneklilik artmıştır. Ayrıca sertlikte ise esas malzemeye göre daha düşük sertlik değerlerini vermiştir.

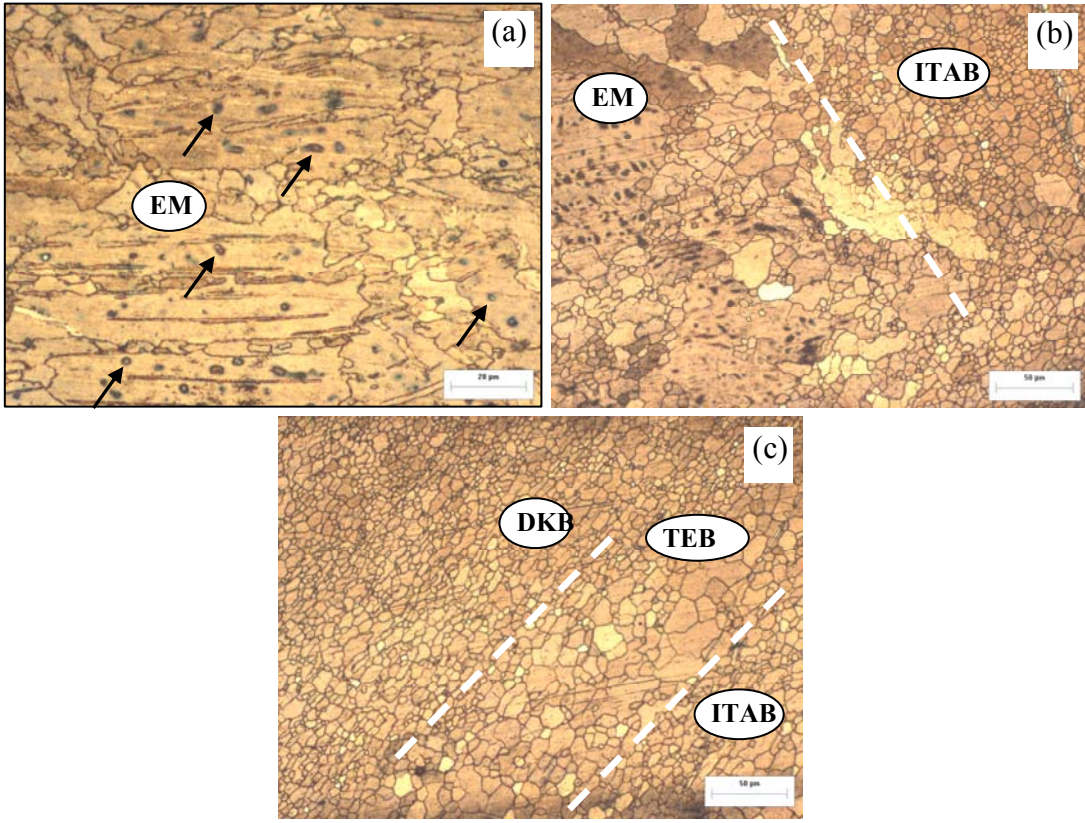


Şekil 6.20 SKK ile 2880 dev/dak ve 10mm/dk kaynak şartlarındaki birleşimi ve optik mikroyapıları



Şekil 6.21 a) A22 SEM görüntüsü, b) A11 SEM görüntüsü

Böylece mikroyapılarda görüldüğü gibi SKK esnasında oluşan ısı malzemelerin kaynak bölgesindeki çekme ve eğme mukavemet değerlerinin değişimine sebep olmuştur. Homojen bir tane yapısının oluşması eğme özelliklerini geliştirmiştir, gevreklik ve kırılma daha da azalmıştır.



Şekil 6.22 SKK kaynağı ile 1960 dev/dak ve 10 mm/dak kaynak şartlarında yapılan kaynağın mikroyapısı a) Esas metal (EM) b) esas metal ile ITAB bölgesine geçiş c) DKB, TEB ve ITAB bölgelerine geçişleri

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1 Sonuçlar

AZ31 magnezyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin araştırıldığı bu çalışma sonuçları aşağıda sıralanmıştır.

- Kullanım alanlarının hızla geliştiği Mg alaşımlarından AZ31 alaşımının sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle başarılı bir şekilde birleştirebildiği görülmüştür.
- Sürtünen ucun devir sayısının artışı ile birlikte elde edilen kaynak yüzey görünümü daha düzgün ve homojen olmuştur. Ancak yüksek devir ve yüksek ilerleme hızlarında kaynak yüzeyi çökme ve kenarda talaş birikimi ile tekrar bozulmuştur.
- Kaynaklarda en yüksek eğme mukavemeti A31 ile kodlanan 2880 dev/dak devirde ve 10 mm/dak ilerleme hızlarında yapılan numunede elde edilmiştir.
- Çekme deneyinde A22 ile kodlanan 1960 dev/dak devirde ve 20 mm/dak ilerleme hızlarında yapılan numunede en iyi çekme mukavemeti değeri ölçülmüştür. Bu değer ana malzemenin birleşme mukavemetinin % 93 gibi yüksek bir değerdir.
- AZ31 magnezyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında yüksek devirlerde, karıştırıcı uç ile malzeme arasında sürtünme ile sıcaklık artışı meydana gelmiştir. Fakat yüksek devirlerde artan ısı girdisine bağlı olarak sürtünme basıncı deformasyon miktarının artışına neden olmuş bunun sonucu malzemede çökme ve kenarda çapak birikmiştir. Buda çekme deneyini sonucunu olumsuz etkilemiştir.
- Malzemede oluşan sıcaklık artışı neticesinde yeniden kristalleşme ile eşeksenli homojen ve ana malzemeye göre daha ince yapılı taneler oluşmuştur.
- Haddelene esnasında soğuk deformasyonla oluşan uzun ve yassı taneler yerini daha homojen ve eşeksenli tanelere bırakmış böylece de malzemenin sünekliğinin arttığı görülmüştür. Buda eğme deneyinde daha yüksek bir eğme mukavemeti değerinin ölçülmesine sebep olmuştur.
- Düşük devirlerde ve ilerleme hızlarında yeteri kadar yüksek sıcaklıklara çıkılmadığından malzemede yeniden kristalleşme oluşmamış ve daha gevrek bir yapı kendini muhafaza etmiştir. Böylece eğme ve çekme deneylerinde de görüldüğü gibi daha az sünek bir grafik sergilemiştir.

- Mikroyapılarda ise sürtünme ısısı hadde yönündeki tanelerin toparlanmasına yol açarken, karıştırıcı omuz ile esas metal yüzeyi arasındaki sürtünme basıncı tane irileşmesini önleyerek küçük taneli bir yapıya neden olmuştur.

7.2 Öneriler

Bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı, ergitmeli kaynak yöntemleriyle oldukça zor olan Mg alaşımlı malzemelere başarıyla uygulanabilmektedir. Bu çalışmada Mg AZ31 alaşım malzemesi kaynak edilmiş ve kaynak sonrasında yapılan muayene ve deneyler sonrasında bu yöntemin başarısı görülmektedir. Birleşme özelliklerinin daha da geliştirebilmesi aşağıda bazı önerilen çalışmaların yapılması ile daha iyi neticeler verecektir.

- Farklı malzeme kalınlıklarında da SKK uygulanabilir.
- SKK yapılmadan önce malzemeye ön ısı girdisi yapılabilir.
- Değişik devir ve ilerleme hızlarında kaynak yapılabilir ve kaynak edilebilirlik araştırılabilir.
- Kullanılan uç profilleri değiştirilerek kaynak kabiliyeti incelenebilir.
- SKK'nın Mg-AZ91 vb. gibi farklı malzemelerde uygulanabilirliği araştırılabilir.
- Karıştırıcı pimin omuz çapları değiştirilerek kaynak mukavemeti incelenebilir.
- Mg alaşımlarında bindirme ve T kaynağı yapılması araştırılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] S.H.C. Park, Y.S.Sato, H. Kokawa, 2003, Effect of micro-texture on fracture location in friction stir weld of Mg alloy AZ61 during tensile test”, Scripta Material 49,
- [2] Koç, E, Temmuz 2008, Alaşım Elementlerinin Magnezyum Döküm Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü ZONGULDAK.
- [3] Tanrıverdi, A, Eylül 2005, Magnezyum alaşımı AZ91’in korozyon davranışına katılma hızı ile Si ve Y katkı elementlerinin etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü
- [4] Wang Xunhong , Wang Kuaishe, 2006, Microstructure and properties of friction stir but-welded AZ31magnesium alloy”, materials Science and Engineering.
- [5] W. Woo, H. Choo, D.W. Brown, P.K. Liaw, Z.Feng, 2006, Texture variation and its influence on the tensile behavior of a friction-stir processed magnesium alloy”, Scripta Materialia 54 “p”
- [6] Zeytin, H, 1999, Magnezyum alaşımları Otomotiv endüstrisinde uygulamaları ve geleceği,
- [7] Oğuz B. 1990 Demir dışı metallerin kaynağı, 530 s, Oerlikon yayınları, İstanbul.
- [8] Avcı, P, Temmuz 2005, magnezyum alaşımı AZ91’in korozyon davranışına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi üni. Fen Bilimleri Enstitüsü
- [9] Saraçoğlu, E. Haziran 2007, Alüminyumların sürtünme karıştırma kaynağının incelenmesi, Bitirme Tezi, Dokuz Eylül Üni.
- [10] Naiyi Li, Tsung-Yu Pan, Ronald P. Cooper, Dan Q. Houston, Zhli Feng, and Michaiel L. Santella, 2004, Friction stir welding of Magnesium AM60 alloy”, Magnesium Technology, Edited by A. Lou, TMS (The minerals, Metals and Materialas Society).
- [11] Eren, T, Eylül 2005, AA 6063-T6 borularının sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle kaynak edilebilirliğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [12] Gül, A, 2006, Farklı metasel malzemelerin sürtünme kaynağında, kaynak parametrelerinin dikış özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [13] Tanrıöver, L, 2008, AA5052/2024 alaşımlarının sürtünme karıştırma yöntemiyle birleştirilebilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü
- [14] Doğan, S, Ekim 2006, AA 5754 –H22 Alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağında işlem parametrelerinin mikro yapı ve mekanik özellikler etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- [15] Güçlüer, S, Temmuz 2007, Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle alın kaynağı yapılmış Al-5086 H32 levhaların mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [16] Datong Zhang, Mayumi Suzuki, Kouichi Maruyama, 2005, Microstructural evolution of a heat-resistant magnesium alloy due to friction stir welding” Scripta Materialia,
- [17] Peng Liu, Qingyu Shi, Wei Wang, Xin Wang, Zenglei Zhang, 2008, Microstructure and XRD analysis of FSW joints for copper T2/aluminium 5006 dissimilar materials,
- [18] A. Denquin, D. Allehaux, M-H. Campaganc, G. Lapasset,” Relationship between microstructure variations and proeperties of friction stir welded 6056 aluminum alloy”, weld-world (2002) 14-19.
- [19] Yeong-Maw Hwang, Zong-Wei Kang, Yuang-Cherng Chiou, Hung-Hsiou Hsu, 2007, Experimental study on temperature distributions within the workpiece during friction stir welding of aluminum alloys, Internaional journal of Machine Tools and Manufacture.
- [20] S.T. Amancio-Filho, S. Sheikhi, J.F. dos Santos, CBolfarini, 2007, Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminum alloys 2024-T351 and 6056-T4. Journal of metarials processing technology 10.1016j.
- [21] B.M. Darras, M.K. Khraisheh, F.K. Abu-Farha, M.A. Omar, 2007, Friction stir processing of commercial AZ31 magnesium alloy”, Journal of Materials processing Technology 191.78-81