

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**AZ31B-H24 MAGNEZYUM ALAŞIMININ SÜRTÜNME
KARIŞTIRMA YÖNTEMİYLE KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALPER GÜNDOĞMUŞ

BALIKESİR, ARALIK - 2018

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



AZ31B-H24 MAGNEZYUM ALAŞIMININ SÜRTÜNME
KARIŞTIRMA YÖNTEMİYLE KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİNİN
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALPER GÜNDOĞMUŞ

Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Ali ORAL (Tez Danışmanı)

Doç. Dr. Sare ÇELİK (Tez Eş Danışmanı)

Prof. Dr. Muammer GAVAS

Doç. Dr. Kadir ÇAVDAR

Dr. Öğr. Üyesi. Alaaddin TOKTAŞ

BALIKESİR, ARALIK - 2018

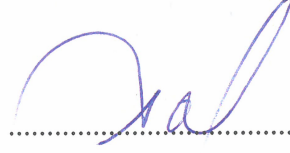
KABUL VE ONAY SAYFASI

Alper GÜNDOĞMUŞ tarafından hazırlanan "AZ31B-H24 MAGNEZYUM ALAŞIMININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA YÖNTEMİYLE KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ" adlı tez çalışmasının savunma sınavı 14.12.2018 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

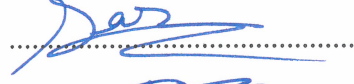
Jüri Üyeleri

İmza

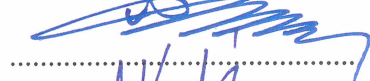
Danışman
Prof. Dr. Ali ORAL



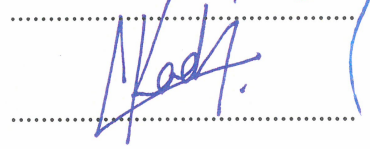
Tez Eş Danışmanı
Doç. Dr. Sare ÇELİK



Üye
Prof. Dr. Muammer GAVAS



Üye
Doç. Dr. Kadir ÇAVDAR



Üye
Dr. Öğr. Üyesi Alaaddin TOKTAŞ



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Rektörlüğüne bağlı Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2017-052 nolu proje ile desteklenmiştir.

ÖZET

**AZ31B-H24 MAGNEZYUM ALAŞIMININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA
YÖNTEMİYLE KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ALPER GÜNDOĞMUŞ
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ALİ ORAL)
(TEZ EŞ DANIŞMANI: DOÇ.DR. SARE ÇELİK)
BALIKESİR, ARALIK - 2018**

Bu çalışmada haddelenmiş AZ31B-H24 magnezyum alaşım levhalarının sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliği incelenmiştir. Çalışmada, sürtünme karıştırma kaynak parametreleri olarak 1000, 1400 dev/dak dönme hızları; 16, 25, 40, 50 mm/dak ilerleme hızları ve 15, 20 mm omuz çapları seçilerek bu parametrelerin farklı birleşimlerinde kaynaklama işlemi yapılmıştır. Yapılan deneyde karıştırıcı uç ile ana metal arasında oluşan sıcaklıkların malzemenin mikro yapısına ve mekanik özelliklerine nasıl etkide bulunduğu incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmada dinamik olarak yeniden kristalleşmiş bölgenin sertliği ana malzemenin sertliğinden daha düşük ölçülmüştür. Kaynak edilen parçalardaki mikro yapıda dinamik olarak yeniden kristalleşen (karışım bölgesi) bölgede ana malzemeye göre daha ince ve homojen tane yapısı tespit edilmiştir. Çekme deneyi sonucunda, kaynaklı bağlantıların mukavemeti ana malzemeye göre %75'lik bir kaynak mukavemet değeri sağlamıştır. Yapılan deneysel uygulama sonucunda en iyi kaynaklı birleşimin 1400 dev/dak dönme hızı, 50 mm/dak ilerleme hızı ve 15 mm omuz çapı ile yapılan kaynak numunesinde elde edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: AZ31B-H24, magnezyum alaşımı, sürtünme karıştırma kaynağı, mekanik özellikler

ABSTRACT

INVESTIGATION OF WELDABILITY OF AZ31B-H24 MAGNESIUM ALLOY BY FRICTION MIXING METHOD

MSC THESIS

ALPER GUNDOGMUS

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. ALİ ORAL)

(CO-SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. SARE CELİK)

BALIKESİR, DECEMBER 2018

The weldability of AZ31B-H24 magnesium alloy sheets rolled in this study was investigated by the friction stir welding method. In the study, welding parameters were set at different parameters by selecting rotation speeds of 1000, 1400 rpm; feed speeds of 16, 25, 40, 50 mm/min and shoulder diameters at 15, 20 mm as friction mixing welding method parameters. It has been investigated how the temperatures formed between the mixer tip and the base metal affect the microstructure and mechanical properties of the material. In the experimental work performed, the hardness of the dynamically recrystallized zone was measured lower than the hardness of the main material. In the microstructure of the welded parts, a thinner and homogeneous grain structure was determined in the dynamically recrystallized region (mixing zone) in comparison to the main material. As a result of the tensile test, the strength of the welded joints provided a welding strength value of 75% of the main material. The experimental tests showed that the best parameter combination is a welding speed of 1400 rpm, a feed rate of 50 mm/min and a diameter of 15 mm.

KEYWORDS: AZ31B-H24, magnesium alloy, friction stir welding, mechanical properties

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür İncelemesi	2
2. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI	6
2.1 Magnezyum	6
2.2 Magnezyum Alaşımaları ve Üretim Yöntemleri	7
2.3 Magnezyum Alaşımalarının Standartları	11
2.4 Magnezyum Alaşımına Alaşım Elementlerinin Etkisi	13
2.4.1 Alüminyum (Al)	13
2.4.2 Çinko (Zn)	14
2.4.3 Diğer Elementler	14
2.5 Magnezyum Alaşımalarının Kullanım Alanları	16
3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA KAYNAK YÖNTEMLERİ	19
3.1 Magnezyum Alaşımalarının TIG Kaynağı	19
3.2 Magnezyum Alaşımalarının MIG Kaynağı	20
3.3 Magnezyum Alaşımalarının Elektron Işın Kaynağı	20
4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI	22
4.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağının Yapılışı	23
4.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Standartlaştırılmış Pim Tipleri	24
4.2.1 Whorl™ Serisi Pimler	24
4.2.2 MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ Serisi Pimler	25
4.2.3 Skew-Stir™ ve A-Skew™ Serisi Pimler	27
4.3 Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takım Malzemeleri	28
4.4 Sürtünme Karıştırma Kaynağında Omuz Tasarımı ve Omuz Özellikleri	35
4.5 Sürtünme Karıştırma Kaynağında Isı Üretimi	38
4.6 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Sonucu Oluşan Bölgeler	39
4.6.1 Isıdan Etkilenmeyen Bölge (Ana Metal)	40
4.6.2 Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)	40
4.6.3 Termo-Mekanik Olarak Etkilenmiş Bölge (TMEB)	41
4.6.4 Karıştırma Bölgesi (KB)	41
4.7 Sürtünme Karıştırma Kaynağına Etki Eden Faktörler	41
4.7.1 Pim İlerleme Hızı, İş Mili Devir Sayısı ve Pim Batma Derinliği	42
4.7.2 Pim ve Omuz Profili	43
4.7.3 Takım Eğim Açısı	43
4.8 Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kusurlar	44
4.8.1 Boşluklar	45
4.8.2 Birleşme Çizgisi Kalıntısı	46
4.8.3 Eksik Kaynak Nüfuzu	47
4.9 Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulama Alanları	48

5. DENEYSEL METOD VE YÖNTEM.....	50
5.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takım.....	50
5.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takım Tezgahı.....	52
5.3 Sürtünme Karıştırma Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi.....	55
5.4 Sürtünme Karıştırma Kaynağının Yapılışı.....	57
5.5 Kaynak Edilen Levhaların Mekanik ve Metalografik Testleri İçin Numunelerin Hazırlanması.....	59
5.5.1 Çekme Deneyi.....	59
5.5.2 Mikro Yapı İncelemeleri.....	61
5.5.3 Mikro Sertlik Ölçümleri.....	61
6. BULGULAR.....	63
6.1 Çekme Deney Sonuçları.....	64
6.2 Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları.....	70
6.3 Mikro Yapı Sonuçları.....	72
6.4 SEM-EDS ve XRD Analiz Sonuçları.....	76
7. SONUÇLAR.....	82
KAYNAKLAR.....	84

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Element halde magnezyum.	6
Şekil 2.2: Türkiye magnezit yatakları	7
Şekil 2.3: Magnezyum ingotları.	9
Şekil 2.4: Magnezyum-Alüminyum denge diyagramı	13
Şekil 2.5: Magnezyum-Çinko denge diyagramı.	14
Şekil 2.6: a) AM50 serisi VW golf b) AM60 serisi VW lupu basınçlı döküm ile imal edilmiş direksiyon iskeletleri.	17
Şekil 2.7: Dövme magnezyum jant.	17
Şekil 2.8: AZ91HP- Basınçlı döküm ile üretilmiş emme manifoldu.	18
Şekil 2.9: AM60HP-Direksiyon simidi.	18
Şekil 2.10: AM20/50 Mercedes Benz koltuk iskeleti.	18
Şekil 4.1: Sürtünme karıştırma kaynağı şematik resmi.	24
Şekil 4.2: Kesik koni pim.	25
Şekil 4.3: Whorl™ pim çeşitleri şematığı (a) Oval şekilli takım (b) Pervane şekilli takım (c) Üçgen taraflı takım (d) Üç taraflı tekrar girişli takım (e) Spiral formulu takım	25
Şekil 4.4: a) MX triflute takım b) Flared-Triflute takım	26
Şekil 4.5: MX özellikli SKK takım	26
Şekil 4.6: Flared-Triflute özellikli takım.	27
Şekil 4.7: Skew-Stir™ takım.	27
Şekil 4.8: PCBN takımında termal bariyer şematığı.	31
Şekil 4.9: Tek parçadan yapılmış AISI H13 takım çeliği.	33
Şekil 4.10: Yuvarlak pimli içbükey omuz.	36
Şekil 4.11: (a) Kavisli veya (b) Konik geometriye sahip dışbükey omuz şekilleri	37
Şekil 4.12: Omuz helezoni (kıvrık) tip takım	38
Şekil 4.13: Sürtünme karıştırma kaynağı sonucu oluşan mikro yapılar.	39
Şekil 4.14: Sürtünme karıştırma kaynaklı 7050-T651 alüminyum alaşımı tane yapısı değişiklikleri. a) Ana malzeme b) Isı tesiri altındaki bölge c) Termo-mekanik olarak etkilenen bölge d) Kaynak külçesi	40
Şekil 4.15: İş mili torkunun şematik gösterimi ve SKK işlemi için farklı kuvvetler.	44
Şekil 4.16: Sürtünme karıştırma kaynağında boşluk kusurunu gösteren makrograf (kaba dağlama yapılmış).	45
Şekil 4.17: Sürtünme karıştırma kaynağında birleşme hattı çizgisi kalıntı kusuru (kaba dağlama yapılmış).	46
Şekil 4.18: Birleşme hattı çizgi kalıntısına neden olan oksit artıklarının büyütülmüş hali.	47
Şekil 4.19: Eksik nüfuziyet sonucu belirlenen kırılma yolu.	48
Şekil 5.1: Deneylerde kullanılan pim tipi ve karıştırıcı boyut ölçüleri.	52
Şekil 5.2: SKK kaynağında kullanılan CNC freze (LER VQ-75).	53
Şekil 5.3: Levhaların bağlama kalıbı ile tezgâha sabitlenmesi.	55
Şekil 5.4: SKK kaynağının yapılışı.	57
Şekil 5.5: Pimin, kaynak edilecek levhaları ortalayacak şekilde ayarlanması.	58
Şekil 5.6: Kaynak edilmiş parçanın görünüşü.	59

Şekil 5.7: TS EN ISO 6892-1 standartta göre test numune ölçüleri.	60
Şekil 5.8: TS EN ISO 6892-1 standartta göre test numunelerinin kaynaklı levhadaki yeri.	60
Şekil 5.9: Çekme deney numunelerinin kodlanması.	61
Şekil 5.10: Mikrosertlik ölçümlerinin yapıldığı noktaların şematik gösterimi.	62
Şekil 6.1: Yapılan deneylerin parametrelere bağlı kaynak yüzey kaliteleri.	64
Şekil 6.2: a) Ana metalden kesilip çıkarılmış çekme numunesi b) Çekme numunesi gerilme grafiği.	65
Şekil 6.3: 3 ve 6 nolu numunelerin kopma bölgeleri.	67
Şekil 6.4: 3 ve 6 nolu numunelerin çekme gerilme grafiği.	67
Şekil 6.5: Sürtünme karıştırma kaynak parametrelerinin ortalama S/G oranı etki grafiği.	68
Şekil 6.6: Doğrulama kaynağı çekme mukavemet grafiği.	69
Şekil 6.7: Doğrulama numunesi kopma bölgesi.	69
Şekil 6.8: 3 nolu numune mikro sertlik grafiği.	71
Şekil 6.9: 6 nolu numune mikro sertlik grafiği.	71
Şekil 6.10: Doğrulama numunesi mikro sertlik grafiği.	71
Şekil 6.11: 3 nolu numune optik mikrografları a) Numune üzerindeki kaynak bölgeleri b) Karışım bölgesi c) Termomekanik olarak etkilenen bölge d) Ana malzeme.	74
Şekil 6.12: 6 nolu numune optik mikrografları a) Karışım bölgesi b) Termomekanik olarak etkilenen bölge c) Ana malzeme.	75
Şekil 6.13: Doğrulama numunesi optik mikrografları a) Karışım bölgesi b) Termomekanik olarak etkilenen bölge c) Ana malzeme.	76
Şekil 6.14: 3 nolu numunenin karışım bölgesine ait 1 noktasının noktasal analizi.	77
Şekil 6.15: 6 nolu numunenin karışım bölgesine ait 1 noktasının noktasal analizi.	78
Şekil 6.16: Doğrulama numunesinin karışım bölgesine ait 1, 2 ve 3 noktalarının noktasal analizi.	80
Şekil 6.17: Karışım bölgesine ait XRD analizi.	81

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Magnezyum fiziksel özellikler [1].	6
Tablo 2.2: Magnezyum alaşım bileşimi ve standartı [18].	12
Tablo 4.1: Mevcut sürtünme karıştırma kaynak takım malzemelerinin özeti.	32
Tablo 5.1: Magnezyum AZ31B-H24 alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlık)	50
Tablo 5.2: Yüksek hız çeliğinin kimyasal bileşimi (kütlece %).	51
Tablo 5.3: SKK takımı malzemesi ısıl genleşme tablosu.	51
Tablo 5.4: CNC dik işlem merkezinin özellikleri (LER VQ-75).	53
Tablo 5.5: Kontrol faktörleri ve seviyeleri.	56
Tablo 5.6: Taguchi L8 ortogonal deney tasarımı matrisi.	56
Tablo 6.1: Magnezyum AZ31-B H24 SKK yapılmış numunelerin çekme deney sonuçları.	66

SEMBOL LİSTESİ

Ag	: Gümüş
AISI	: American Iron And Steel Institute
Al	: Alüminyum
Al₁₁Mn₁₄	: Katı çözeltili
Al₁₂Mg₁₇	: Katı Çözeltili
Al₃Mg₂	: Katı Çözeltili
AlMn	: Alüminyum-Mangan İntermetalik Bileşik
ASTM	: American Society for Testing and Materials
Ba	: Baryum
Be	: Berilyum
Ca	: Kalsiyum
Ce	: Seryum
CNC	: Computer Numerical Control
Co	: Kobalt
Co.	: Company
Cu	: Bakır
DATK	: elektrod +
dev/dak	: Devir/Dakika
EDS	: Energy Dispersive Spectroscopy
Fe	: Demir
H13	: Tool Steel
Hegzagonal SD	: Hegzagonal Kristal Kafes
HRC	: Hardness Rockwell
K	: Potasyum
kg	: Kilogram
km	: Kilometre
kV	: Kilovolt
Li	: Lityum
Lr	: Lavrensiyum
lt	: Litre
M5	: Metrik 5
mA	: Mili amper
mm	: Milimetre
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
MPa	: Mega paskal
MRI	: Magnesium Research Institute
Na	: Sodyum
NC	: Nümerical Control
Nd	: Neodyum
Ni	: Nikel
°F	: Fahrenheit
PCBN	: Polycrystalline Cubic Boron Nitride
SEM	: Scanning Electron Microscope
Si	: Silisyum
SKK	: Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Sn	: Kalay
Sr	: Stronsiyum
Th	: Toryum
TiC	: Titanyum Karbür
TM	: Trade Mark (Tescilli-Ticari marka)
TSE	: Türk Standardları Enstitüsü
W	: Tungsten
Y	: İtriyum
Zn	: Çinko
Zr	: Zirkonyum
α	: Ferrit
β	: Beta
δ	: Gama
γ	: Östenit



ÖNSÖZ

Tezin deneysel ve mikroyapı aşamalarında bana yardımcı olan Sayın Doç.Dr. Sare ÇELİK'e

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri ve desteklerini esirgemeyen ve beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ali ORAL' a;

Mikro yapı ve mekanik incelemelerinde destek olan Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliğinden Sayın Uzman Dr. Niyazi ÇAVUŞOĞLU' na

Mekanik incelemelerde destek veren çalışma arkadaşlarım Sayın Arş. Grv. Fatih BALIKOĞLU' na, Sayın Arş. Grv. T.Kerem DEMİRCİOĞLU' na

Ayrıca beni yetiştirip bu günlere gelmemde büyük emeği olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, babam Beycat GÜNDOĞMUŞ, annem Cevriye KAYABEY GÜNDOĞMUŞ'a ve kardeşlerim Ebru GÜNDOĞMUŞ EROL, Sezer GÜNDOĞMUŞ'a sevgi ve saygılarımı sunar

sonsuz teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Modern teknolojiler neredeyse her alanda giderek daha fazla önem kazanmakta ve üretim endüstrisinde bir istisna olmaktan çıkmaktadır. Otomobil endüstrisinin ana imalat yöntemlerinden biri olan kaynak her imalat sanayiinin ortak önemli bir parçası olmuştur. Kaynak teknikleri ile ilgili olarak giderek daha fazla araştırma yapılmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı, otomotiv sektöründe önemli bir yere sahip olan en yeni kaynak yöntemlerinden biridir. Sürtünmeli karıştırma kaynağı, İngiltere'de The Welding Institute (TWI) tarafından icat edilen ve geliştirilen katı hal kaynak yöntemidir. Öncelikle Alüminyum alaşımlarının kaynağı için sürtünmeli karıştırma kaynağı kullanılmıştır. Daha sonra magnezyum, bakır alaşımları vs. kaynaklı uygulama bulmuştur.

SKK, 1991'deki gelişmesinden beri hızla genişleyen ve havacılık, otomotiv, demiryolu ve denizcilik gibi çok çeşitli endüstrilerde uygulama alanı bulmaktadır. SKK prosesi, belki de en önemlisi füzyon kaynak teknikleri kullanılarak kaynak yapmak zor veya imkânsız olan alaşımları kaynak edebilme kabiliyeti olan diğer kaynak yöntemlerine kıyasla bir takım önemli avantajlar gösterir. SKK işlemi, katı fazda, malzemenin erime noktasının altındaki sıcaklıklarda gerçekleşir ve sonuç olarak, ikinci fazların oluşması, gözeneklilik, aşınma ve çatlama gibi yeniden katılaşmayla ilgili problemler yaşanmaz. Buna ek olarak, işlemin daha düşük sıcaklığı daha düşük distorsiyon (çarpılma) ve daha düşük artık gerilmelerle birleştirmeyi mümkün kılmaktadır. SKK, dolgu malzemesi ve çoğu durumda koruyucu bir gaz kullanılmasını gerektirmeyen enerji açısından verimli bir prosestir. Ayrıca, proses çoğu füzyon kaynak tekniği ile ilgili dumanlar, ark ışığı, sıçrama ve kirlilikten yoksundur. Bu ve diğer pek çok nedenden ötürü SKK birçok üretici için cazip bir birleştirme işlemidir.

1.1 Literatür İncelemesi

Magnezyum ile ilgili olarak yapılan ulusal ve uluslararası çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Magnezyum, hafifliği ve mukavemeti nedeni ile endüstride kullanımı oldukça yaygın olan bir metal olup otomotiv ve uzay-uçak sanayilerindeki ağırlık tasarrufuna yönelik arayışlarda magnezyum metali 1.74 g/cm³ olan düşük yoğunluğu ile mühendislik uygulamaları açısından en hafif yapısal metal olarak ön plana çıktığı gözlenmiştir. Alüminyumdan % 36, çelikten ise % 78 oranında daha hafif olması, geçen on yıl boyunca magnezyum alaşımlarının kullanımını her yıl yaklaşık %15 artış gösterdiği ve otomobil endüstrisinde magnezyum uygulamaları 30.000 ton/yıl değerinden 130.000 ton/yıl değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Bu artış, ağırlık tasarrufunun çok daha önemli olduğu uzay/uçak uygulamalarındaki potansiyeli de işaret ettiği anlaşılmıştır. Çünkü aynı miktardaki ağırlık tasarrufunun otomobilde sağladığı parasal tasarrufun değeri 1 ise ticari bir uçakta 100, savaş uçağında 1000, uzay uygulamasında ise 10.000'dir [1].

Kaçar ve Öztürk, havacılık sanayinde kullanılan metallerde istenilen en temel özelliklerin; hafif ve dayanıklı olması, şok-titreşim ve korozyona karşı direnç olduğu ve hafifliğin, yoğunluğunun azaltılması ile sağlanabileceğini bildirmişlerdir. Metalik malzemelerde günümüz araştırma ve geliştirme çalışmalarının esası; daha kullanışlı malzemeler elde edebilmek için yeni ve daha önce deneme yapılmamış alaşımların geliştirilmesi çalışmalar olduğu görülmektedir ve sektörün yoğunlukla üzerinde iyileştirme çalışmaları yaptığı özelliklerin;

- Yanıcı olmaları,
- Yüzeyine herhangi bir koruyucu kaplama uygulanmadığında, korozif bir ortamda beyaz renkte kümecikler veya noktalar şeklinde korozyona uğramaları
- Alaşımlarının yüzeylerinde oluşan oksit-karbonat filminin, korozif olmayan ortamlarda dahi yeterli derece de korozyon etkilerinden korunma sağlayamamakta, uygun koruyucu kaplama uygulandığında korozyon önemli ölçüde azaltılabilmekte olduğu bildirilmiştir [2].

S.H.Chowdhury ve arkadaşları, AZ31B-H24 Mg alaşımının (ağırlıkça% Al 2.5-3.5, Zn 0.7-1.3, Mn 0.2-1.0, geri kalan miktar Mg) sürtünme karıştırma kaynağı sırasında proses parametrelerinin etkisini analiz etmiştir. 1.65 mm pim uzunluğuna ve 3.175 mm pim çapına sahip takım kullanmışlardır. En düşük sertlik kaynak bölgesinin merkezinde elde edilmiştir. Kaynak hızı ve takım dönme hızı, akma dayanımı üzerinde daha güçlü bir etkiye sahiptir. 20 mm/dak'lık bir kaynak hızı, 1000 devir / dakikalık dönüş hızı ile daha yüksek akma dayanımlı kaynak üretmişlerdir [3].

A.Razal Rose ve diğerleri, kaynak hızının AZ61A Mg alaşımının sürtünme kaynağına bağlı sürtünme direnci üzerindeki etkileri üzerinde durmuşlardır. Kaynak hızı, karıştırma bölgesi, sertlik vb. tane boyutu üzerinde büyük etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır. Seçilen değerler arasında 1200 devir / dakikalık bir takım dönüş hızı, 5KN'lik eksenel kuvvet maksimum çekme mukavemeti sergilemiştir [4].

S. Rajakumar ve arkadaşları, süreç parametreleri ile çekme mukavemeti arasında bir ilişki olduğunu göstermişlerdir. Deneysel sonuçlar arasında ilişki oluşturulması için tepki yüzeyi metodolojisi (response surface) kullanılmıştır. Deney için AZ61A Mg alaşımı kullanılarak (ağırlıkça% Al 5.96, Zn 1.28, Mn 0.17, geri kalan miktar Mg), takım döndürme hızı, ilerleme hızı, karıştırıcı geometrisi göz önüne alınarak, "Tepki Yüzeyi Metodolojisi" ile optimize yapmışlardır. Takım dönüş hızı 1194 rpm, kaynak hızı 92.19mm / dak, eksenel kuvvet 5,05 kN ile maksimum çekme mukavemeti sağlanmıştır [5].

S.Ugunder ve diğerleri, AZ31B Mg alaşımında (ağırlıkça% Al3.0, Mn2.0, Zn 1.0, Cu 0.05, Ni 0.005, Si 0.1, Fe 0.005, geri kalan miktar Mg) kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere ve mikro yapıya etkisini araştırmışlardır. Sürtünme karıştırma kaynağı 900rpm, 1120 rpm, 1400 rpm ve 1800 rpm'de, takım malzemesi olarak yüksek hız çeliği ve paslanmaz çelik kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikro sertlik değerleri düşük devir hızlarında bir artış göstermiştir. Düşük çekme mukavemeti, 1400 rpm ve 1800 rpm dönüş hızlarında elde edilmiştir [6].

Yong Zhao ve arkadaşları, oda sıcaklığında ve 200 ° C'de NZ20K (Mg-2Nd-0.3Zn-0.4Zr) ve AZ31 Mg alaşımının mikro sertlik değerlerini ve gerilme

özelliklerini karşılaştırmışlardır. 1300 rpm dönüş hızı ve 60 mm/dak ilerleme hızıyla kusursuz kaynak birleştirmeleri elde etmişlerdir [7].

Bhukya Srinivasa Naik ve diğerleri, AZ31B-H24 Mg alaşımının sürtünme ile kaynatılarak çeşitli bindirme konfigürasyonunda artık gerilmeler ve gerilme özelliklerini incelemişlerdir [8].

Sevvel P, Jaiganesh V, sürtünme karıştırma kayanıklı AZ31B Mg alaşımının mekanik özellikleri ve proses parametreleri ile mikroyapı analizlerini optimize etmişlerdir [9].

Magnezyum; yoğunluğu düşük, özgül ısı kapasitesi yüksek ve yüksek ses absorpsiyonu sayesinde birçok sektörde kullanılabilir bir metaldir. Magnezyum alaşımlarının sürünme, yorulma ve korozyon dirençleri ise genel olarak geliştirilmesi gerekli özelliklerdir. Bunlar içerisinde yorulma direnci üzerinde daha çok çalışılması gereken karakteristik olarak dururken, sürünme ve korozyon özellikleri bakımından başarılı bazı alaşımlar geliştirilmiş olup, otomotiv sektöründe de kullanılmaktadır. Magnezyum, özellikle otomotiv ve havacılık endüstrisinde hafif olması sebebiyle diğer hafif metallere göre fazla tercih edilmektedir. Bu sektörlerde tercih edilme sebebi konstrüksiyonda ağırlık azaltımını sağlaması dolayısıyla yakıt tasarrufuna katkı sağlamasındandır.

Otomotiv endüstrisinde kaynak işlemi çok önemli bir yere sahiptir. Otomotiv sektöründe kullanılan metal malzemelerin özellikle hafif metallerin kaynak edilebilirliği ve uygulanan kaynak işleminde kaynak parametrelerinin bağlantı kalitesine etkisi incelenmelidir. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin ergitme kaynak yöntemlerine göre, kaynak kalitesi açısından ortaya koyduğu en önemli üstünlüğü, kaynak yapılacak parçalara daha düşük ısı girişi sağlayıp, kaynak metalinde ergime meydana gelmeden birleştirme işleminin gerçekleştirilebilmesidir. Bunun yanı sıra, son yıllarda sürtünme karıştırma kaynak yönteminde kaydedilen önemli gelişmeler, diğer birleştirme yöntemlerine göre birçok önemli avantajı beraberinde getirmiştir. Özellikle, nispeten daha düşük enerji tüketimi, kaynak bölgesi için hiçbir koruyucu gaz kullanımına gerek olmaması, kaynak esnasında zehirli duman ve gazların açığa çıkmaması, sürtünme karıştırma kaynak yönteminin çevre ve insan sağlığı ile dost "yeşil teknoloji" olarak nitelendirilmesini sağlamıştır.

Son yıllarda konstrüksiyonlarda ağırlığın azaltılması ve konforun yükseltilmesi ihtiyacı endüstri uygulamalarında hafif malzeme kullanımına büyük ilgi uyandırmıştır. Mükemmel özgül dayanım ve rijitlik özellikleri ile magnezyum alaşımları, endüstrideki uygulamalarda alüminyum ve çelik ile mukayese edilebilir düzeydedir. Bu yüzden günümüzde araştırmalar magnezyum alaşımlarının kaynaklı bağlantı özelliklerine odaklanmıştır. Magnezyum alaşımının yanıcı özelliğe sahip olması bu alaşımların ergitme yöntemleriyle kaynaklı birleştirilmesinde sorunlar teşkil etmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağı, düşük işlem sıcaklığı, iyi mekanik özellikler sağlaması, zehirli gaz ve buhar oluşturmaması, kaynak sarf malzemelerine ihtiyaç duyulmaması gibi birçok avantajları olan bir yöntemdir. Bahsedilen özellikler arasındaki düşük işlem sıcaklığı, magnezyum alaşımı gibi düşük ergime sıcaklığına sahip hassas malzemelerde uygulanabilir bir metot olmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmanın amacı, sürtünme karıştırma kaynağında dönüş hızı, ilerleme hızı, takım pim geometrisi gibi proses parametrelerinin magnezyum alaşımlarının kaynaklı bağlantılarındaki mekanik özelliklere olan etkilerinin incelenmesidir. Bu çalışmada magnezyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı için kaynak bağlantılarının mekanik özelliklerini maksimuma çıkaracak kaynak işlem parametreleri ve bu kaynak işlem parametrelerinin mekanik ve metalürjik özelliklere olan etkileri belirlenecektir.

2. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI

2.1 Magnezyum

Periyodik cetvelin II A grubunda yer alan magnezyum, toprak alkali metallere bir kimyasal elementtir. Be, Ca, Sr ve Ba ile birlikte periyodik cetvelin aynı grubunda yer alır. Elementin atom numarası “12”, ana oksidasyon durumu (iyon değeri) “+2”, atomik kütlesi “24,312 gr”, kristal kafes yapısı “hekzagonal”, erime noktası “651 °C”, yoğunluğu “1.74gr/cm³”, atom hacmi “14 gr/mol”, “gümüşü beyaz” görünümünde “bazik” özellik gösteren “litofil” bir metalik elementtir [10,11].

Tablo 2.1: Magnezyum fiziksel özellikler [1].

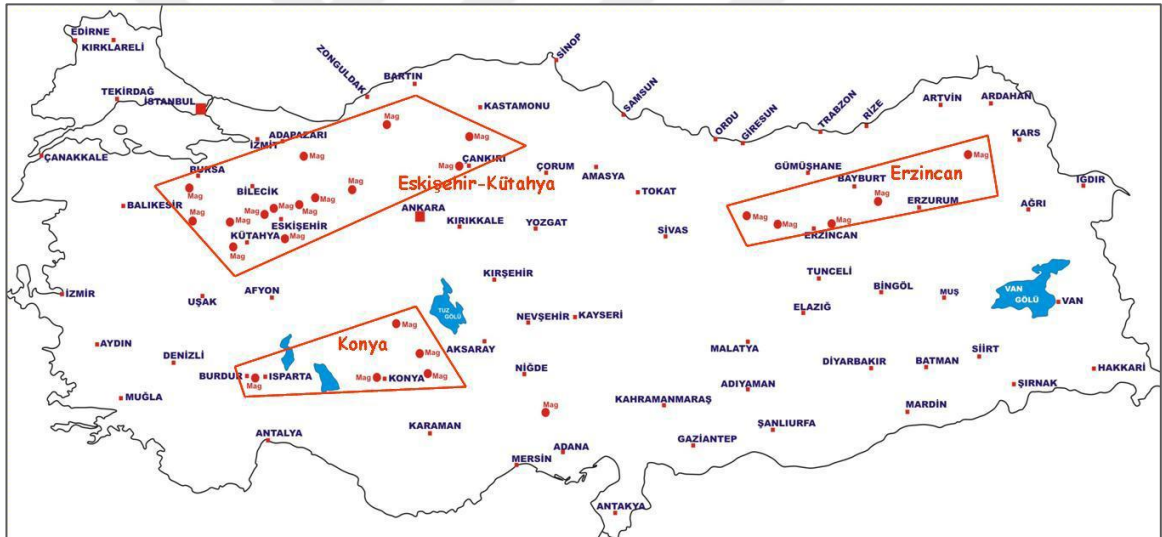
Fiziksel Özellikler	Mg
Atom No	12
Atom Kütlesi	24,3
20 °C deki Özgül Ağırlık	1,74
Ergime Noktası	651 °C
Kaynama Gizli Isısı	46,5 cal/°C
20 °C deki Isıl İletkenliği	0,038 cal/cm.s. °C
25 °C deki Lineer G.K	26. 10 ⁻⁶
20 °C deki Elektrik Direnci	4,5. 10 ⁻⁶
Elektrik İletkenliği (Cu=100)	36,5 ohm.cm
Elastisite Modülü	4570 kg/mm ²
Kristal Yapısı	Hegzagonal SD



Şekil 2.1: Element halde magnezyum.

Magnezyum, Joseph Black tarafından 1755 yılında İngiltere’de keşfedilmiştir. 1808 yılında Humphrey Davey tarafından saf halde, magnezya ve civa-II-oksit (HgO) karışımından izole edilmiştir. Toz halinde magnezyum kolay tutuşur ve parlak bir alev ile yanar. Bu özelliği ile elektrikli fotoğraf makinesi flaşları çıkmadan önce, magnezyum yakılarak flaşlı fotoğraflar çekilmiştir [10,11].

Ekonomik olarak kazanılabilir magnezyum minerali 11 ülkede ve bu ülkelerdeki 38 önemli yatakta bulunmaktadır. En fazla üretim bölgeleri İsrail, Avustralya, Norveç, Kanada, Çin ve Rusya’da bulunmaktadır. Türkiye’deki magnezit yataklarının önemli bir bölümü Konya-Kütahya-Eskişehir de bulunmakta ve geri kalan kısım Erzincan, Çankırı ve diğer şehirlerde dir.



Şekil 2.2: Türkiye magnezit yatakları [12].

2.2 Magnezyum Alaşımları ve Üretim Yöntemleri

Ana metali magnezyum olan alaşımlara "**magnezyum alaşımları**" adı verilmektedir. Hafif olmaları yanında diğer özelliklerinin de iyi olması endüstride büyük önem kazanmasını sağlamıştır. Magnezyum alaşımları; seçkin özelliklerinden

dolayı alüminyum, çelik vb. için umut verici alternatiflerdir. Ağırlık / ağırlık oranı, düşük yoğunluk, yüksek sönüm kapasitesi vb. özellikler bazılarıdır. Bu özellikler otomotiv endüstrisinin önemli bir parçası haline gelmiştir. Bileşenlerin toplam ağırlığının % 20-70'inde bir azalma sağlanabilir. Mg alaşımları hegzagonal kafes yapısına sahiptir ve bu nedenle plastik deformasyon sırasında Cu vb. ile karşılaştırıldığında bazı komplikasyonlar vardır. Mg alaşımlarının mekanik özellikleri, nadir toprak elementleri eklenerek geliştirilmiştir. Mg alaşımları, düşük ergime noktasına, geniş termal genleşmeye ve dolayısıyla geleneksel alaşımların geleneksel yöntemlerle kaynaklanması ile ayırıcı özelliğini ortaya koyar ve çatlaklara, gözeneklere vb. neden olur.

Ticari Mg alaşımları Al (% 3-13 ağırlıkça) Mn (% 0.1-0.4 ağırlıkça), Zn (% 0.5-3 ağırlıkça) içerir ve bazılarının ısıl işleme tabi tutulması zordur. Mg alaşımları genellikle 2 sayı ile gösterilir. Harfler ana alaşım elementlerini, sayılar ise alaşım elementlerinin nominal kompozisyonunu (yüzde olarak içerik) temsil eder. Örneğin; AZ31 alaşımı içerisinde %3 alüminyum, %1 çinko içerdiğini gösterir. [13].

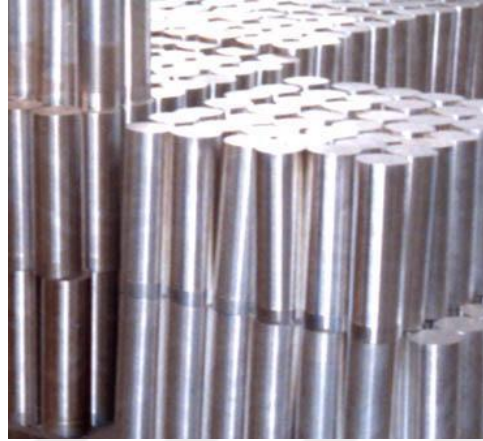
Alaşımsız olarak kullanıldığında düşük mukavemet ve tokluk değerlerine sahip olduğundan alaşımlandırılarak kullanılır. Çinko ve kalsiyum alaşımlarının ilavesi, katılma çatlama ihtimalini arttırmaktadır. % 2'ye kadar çinko ilavesi normaldir, ancak daha fazla artış zayıf kaynak kabiliyetine neden olacaktır.

Magnezyum-alüminyum en fazla kullanılan magnezyum alaşımıdır. Alaşım elementlerinden Al, mukavemeti; Zn, tokluğu; Mn, ise korozyona karşı dayanıklılığı arttırmaktadır. Ancak Zn miktarının artışı sıcak kırılma eğilimine neden olmaktadır. [14].

Magnezyum aynı zamanda yüksek boyutsal kararlılık, yüksek ısıl iletkenlik, iyi elektromanyetik koruma, yüksek sönümlenme, iyi işlenebilirlik ve kolay geri dönüşüm özelliklerine de sahiptir.

Gün geçtikçe magnezyum alaşımlarının havacılık, uzay ve otomotiv endüstrisinde yapısal malzeme olarak kullanımını arttırmaktadır. Ancak, henüz yaygın kullanımda olmaması ve üretiminin pahalı olması nedeniyle magnezyum üreticilerinin sayısı demir ve çelik üreticilerine göre çok daha azdır. Bu durum magnezyum alaşımlarının pahalı olmasının temel sebeplerinden biridir.

Magnezyum alaşımları diğer metallar gibi Őekillendirilebilirler. En uygun Őekillendirme yöntemi “ekstrŐzyon” ve “yŐksek basınc altında pres dŐkŐm” yŐntemleridir [13,14].



Şekil 2.3: Magnezyum ingotları [15].

DÖkme Magnezyum Alaşımları;

DÖkme magnezyum alaşımları "magnezyum - alŐminyum" (Mg-Al) ve "magnezyum alŐminyum - inko" (Mg - Al - Zn) alaşımları olmak ũzere iki bŐlŐmde toplanabilir.

Magnezyuma alŐminyum, en fazla % 7-11 oranlarında ilave edilir. DŐkŐmde kullanıldıkları gibi aynı zamanda dövme ve haddeleme işlemleri içinde elverişlidir. Aynı zamanda bu alaşıma ısı işlemi uygulanır. Mekanik Özellikleri Şunlardır:

Kum dŐkŐm prosesinde, çekme dayanımı $16-17 \text{ kg/mm}^2$ ve uzama % 4 – 5'tir. Bu Özellikler, tel Şeklinde ekilme durumunda çekme dayanımı $27-29 \text{ kg/mm}^2$ ve uzaması % 15 -18'e yŐkselir. Bu alaşımlar pratikte homojenleŐtirme işlemi uygulanarak kullanılır.

Çinko ilaveli magnezyum alaşımları Almanya'da ũretilmiŐtir. Kullanımları çok yaygın değildir. Bu alaşımlar uçak konstrŐksiyonlarında kullanılır. BileŐimlerinde % 3-9 Al, % 1-3 Zn bulunur. Bu bŐlŐme giren % 6 Al, % 3 Zn'li dŐkŐm alaşımının çekme dayanımı $16-20 \text{ kg/mm}^2$ ve uzaması % 3 - 6 oranları

arasında değişir. Alüminyumu % 9 olan alaşım en çok kullanılan döküm alaşımıdır. Kum döküme elverişlidir. Kaliteli parçaların yapımında kullanılır. % 9 Al, % 1 Zn'li alaşımın akıcılığı iyidir. Kokil döküm ve basınçlı döküm yöntemi ile üretilebilir. Mekanik özellikleri; çekme dayanımı 6-18 kg/mm², uzama % 1-2 civarındadır [11,16].

Bakır ve alüminyum içeren magnezyum alaşımlarının ısı iletkenlikleri yüksektir. Bu özellikleri sebebiyle çok kullanılır. İki tip olarak hazırlanır:

- a) Alüminyum ve bakır oranı % 6'nın altında olan alaşımlar: Bunlar, magnezyum alüminyum alaşımları ile aynı özellikleri taşır. Fakat korozyon dayanımları düşüktür.
- b) Bakır ve alüminyum oranı % 8-12 olan alaşımlar: Bu alaşımların ısı iletkenlikleri yüksektir. Bakır oranına bağlı olarak üretilebilir. Yüksek ısı iletkenlik özelliklerinden dolayı motor pistonlarında kullanılır. Mekanik özellikleri yukarıdaki alaşımın (alüminyum-bakır) mekanik özelliklerine yakındır [15].

Dövme Magnezyum Alaşımları;

Dövme alaşım teknolojisi gelişim aşamasında olup, piyasa durumu dövme alaşımların çok az kullanıldığını göstermektedir. Ancak son yıllarda otomotiv endüstrisinde dövme alaşımlarına olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır.

Magnezyum alaşımlarına dövme ile biçimlendirme işlemleri nispeten kolay uygulanır. Fakat birçok durumda güçlü kuruluşlara gerek duyulur. En çok kullanılan dövme alaşımları, oran olarak % 3 - 7 Al, % 1 Zn içerir.

% 3 Al, % 1 Zn içeren alaşımın dövülmesi kolaydır. Bu işleme en uygun alaşımır. Mukavemeti düşüktür. Ortopedi aksesuarı vb. parçaların imalatında kullanılır.

% 6 Al, % 1 Zn'li alaşımın sunekliliği iyidir. nemli kuvvetlerin etkisi altında kalan parçaların imalatında kullanılır. Dövme işlemleri için n yatırım maliyeti yüksektir.

% 7 Al, % 1 Zn içeren alaşım hızla değişen kuvvetlerin etkisi altında bulunan parçaların (motor karteri, pervane kanadı vb.) retiminde kullanılır. Çekme dayanımı 32 - 35 kg/mm² ve uzama yüzdesi % 8 -12' dir.

Yukarıda tanıtılan magnezyum alaşımlarına % 0,2 - 0,3 oranında Mn ilave edilerek korozyon dayanımları iyileştirilebilir.

Magnezyuma % 1,5 - 2,5 oranında Mn katılarak Mn'li magnezyum alaşımları elde edilir. Bunların mukavemetleri öncekilere kıyasla düşüktür ve az kullanılır [17].

2.3 Magnezyum Alaşımlarının Standartları

Magnezyum alaşımları **ASTM (A275)** standart sistemi tarafından belirlenmiştir. Mg alaşımları genellikle iki büyük harfi takip eden iki veya üç numara ile tanımlanır. Harfler, alaşımdaki iki ana alaşım elementini ifade eder. İlk harf en yüksek konsantrasyonu, ikinci harf ise ikinci yüksek konsantrasyonu gösterir. Harfleri takip eden ilk numara, ilk harf elementinin ağırlık olarak yüzdesi (yalnız iki numara varsa) ve ikinci numara da ikinci harf elementinin ağırlık olarak yüzdesini temsil eder. A,B gibi harfler numaraları takip ederse bu, genellikle impurite (safsızlık) seviyelerinde alaşım için A, B gibi bir değişimi gösterir.

rnek olarak **AZ91A** alaşımının gösterimi, ana alaşım elementleri olarak %9 (ortalama değer) alüminyum, %1 (ortalama değer) inko içeriğini göstermektedir. Son ek kullanımındaki bir istisna X harfi olup, alfabetik sırada ilerledikçe impuriteelerin kirliliklerin kontrollü olarak alt sınırdada olduğunu ifade etmektedir.

Tablo 2.2: Magnezyum alaşım bileşimi ve standartı [18].

Alaşım	İçerik	Örnek Alaşım
AE Serisi	Mg, Al ve Nadir Toprak Alaşımları	AE42
AJ Serisi	Mg, Al ve Stronsiyum Alaşımları	AJ52HP-(YüksekBasınç)
AM Serisi	Mg,Al ve Mn Alaşımları	AM60B
AS Serisi	Mg, Al ve Si Alaşımları	AS31
AZ Serisi	Mg, Al ve Zn Alaşımları	AZ91D
EQ Serisi	Mg, Nadir Toprak Gümüş ve Cu Alaşımları	EQ21
EZ Serisi	Mg, Nadir Toprak, Ag ve Zn Alaşımları	EZ33A
HM Serisi	Mg, Th ve Mn Alaşımları	HM21A
HZ Serisi	Mg, Th, Zr Alaşımları	HZ32A
QE Serisi	Mg, Ag ve Nadir Toprak Alaşımları	QE22A
QH Serisi	Mg, Ag ve Th Alaşımları	QH21
WE Serisi	Mg, Y ve Nadir Toprak Alaşımları	WE43
ZC Serisi	Mg, Zn ve Cu Alaşımları	ZC71
ZK Serisi	Mg, Zn ve Zr Alaşımları	ZK11
ZT Serisi	Mg, Zn ve Th Alaşımları	ZT32

Yukarıda belirtilen standart gösterimlerden başka Magnezyum Araştırma Enstitüsünün (MRI) geliştirmiş olduğu yeni alaşımlara ait gösterimler de mevcuttur.

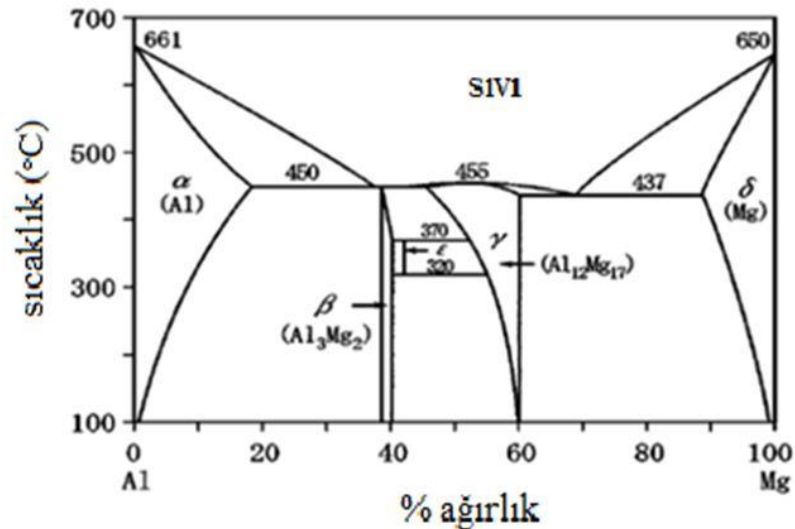
- MRI yeni alaşımları '**MRI-1, MRI-2, MRI-3, MRI-230D**' şeklinde tanımlamıştır.
- Gün geçtikçe keşfedilen yeni alaşım sayısı artmaktadır. Bu yeni alaşımlar temel alaşımların inovasyonu ile geliştirilmiştir.
- Örneğin, **MRI-1**'in temel alaşımını **AM60** iken, **MRI-2**'nin temel alaşımını **AM70**'tir.
- Otomotiv endüstrisinde çok kullanılan **MRI-153** alaşımının temel alaşımını ise **AZ91**'dir [18].

2.4 Magnezyum Alaşımına Alaşım Elementlerinin Etkisi

Diğer metallerde olduğu gibi magnezyum nadir olarak saf halde kullanılmaktadır. Döküm veya dövme ürünlere mukavemet kazandırmak amacıyla magnezyuma alaşım elementleri katılır. Mg, HSP (hekzagonal kristal kafes) yapısına sahiptir ve sahip olduğu tane çapı çok sayıda element ile katı olarak çözünebilirliğe olanak vermektedir. Al, Be, Ca, Cu, Fe, Mn, Ni, Si, Ag, Sn, Zn ve Zr gibi ana elementler ile Na, K, Li alkali ve Ce, Lr, Y, Nd gibi toprak elementleri katılarak alaşımlandırılır. Bu elementlerden bir veya birkaçı ile alaşımlandırıldığında oluşan yeni alaşım yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olur [18,19].

2.4.1 Alüminyum (Al)

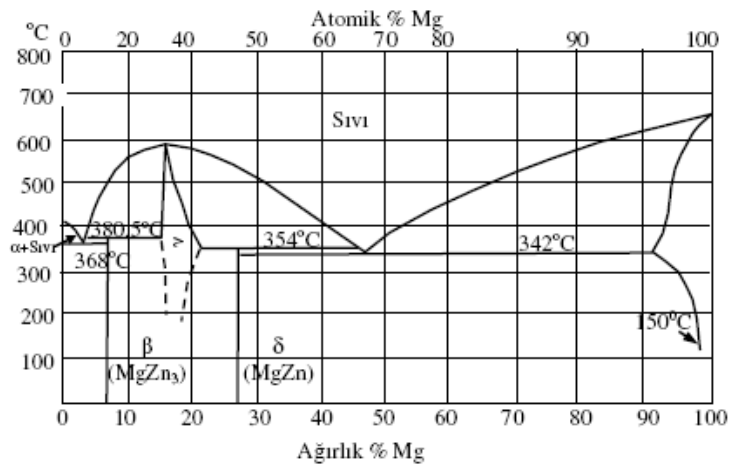
Mg'ye en çok etki eden alaşım elementidir. Mukavemeti, sertliği artırır ve donma aralığını geliştirir. Bu da alaşımın dökülebilirliğini kolaylaştırır. %6'nın üzerinde olduğunda alaşım ısıl işlenebilir fakat nadiren ağırlıkça %10 Al sınırını aşar. %6 optimum mukavemet ve süneklik sınırıdır. Alüminyum magnezyumda erir. Magnezyum kristallerinin incelmeye yardım eder. Mekanik özelliklerini iyileştirir. Al'li magnezyum alaşımları, döküme ve sıcak dövülmeye elverişlidir.



2.4.2 Çinko (Zn)

Çinko Mg içerisinde Al dan sonra en etkili alaşım elementidir. Çinko genellikle oda sıcaklığında mukavemeti arttırmak için Al ile birlikte kullanılır. Bununla birlikte ağırlıkça %7-10 Al içeren Mg alaşımlarına %1'den fazla Zn ilave edilirse sıcak gevrekliği (malzeme akma sınırı noktasının yükselmesi) artırır. Çinko aynı zamanda çökeltme sertleşmesi (mekanik özelliklerin geliştirilmesi için uygulanan bir ısıl işlem) ile mukavemetlendirilen Mg alaşımları üretmek için Zr, nadir metaller veya toryum ile birlikte kullanılır. Mg alaşımları içerisinde bulunması muhtemel demir ve nikel emprütelerinin (safsızlık) zararlı korozyon etkilerini gidermeye yardımcı olur.

Zn, Mg'da normal sıcaklıkta % 2, 34 °C'de % 8 oranında erir. Zn'li Mg alaşımlarına "Elektron" adı verilir. Bu alaşımlar, kokil kalıba döküme ve basınçlı döküm yöntemine çok elverişlidir. Zn, Mg'a alüminyum ile beraber ilave edilir. Örneğin, % 4 Al, % 3 Zn, geri kalanı magnezyumdur.



Şekil 2.5: Magnezyum-Çinko denge diyagramı [18].

2.4.3 Diğer Elementler

Cu, Mg ile % 69 oranı için bir ötektik bileşim verir. Bu alaşım 485 °C'de ergir. Cu, Mg içinde erimez. Al ile birlikte ilave edilir. Alaşımın elektrik ve ısıl iletkenliğini artırır. Cu'lu Mg alaşımları motor pistonları imalatında kullanılır. Alaşımında bakır ve alüminyumun toplam oranı % 6'dan az olduğu zaman özellikleri

Al'li magnezyum alaşımlarına benzer. Korozyon dayanımları iyidir. Cu ve Al toplamı % 12'den az olan alaşımlar, dövme alaşımlarıdır. Isı iletkenlikleri yüksektir.

Mn'nin, Mg'a etkisi iyi bilinmemektedir. Mn oda sıcaklığında az miktarda Mg' de erir. Daha düşük sıcaklıklarda erimeğiği kabul edilir. Mg'de % 0,3 - 0,4 oranında Mn korozyon dayanımını artırır. Mn'li Mg alaşımları elektron alaşımları sınıfına girer.

Be, Mg içerisinde çok az çözünürlüğe sahip olmasına rağmen sadece yaklaşık ağırlıkça %0.001 Be ergime, döküm ve kaynak sırasında yüzeylede ergimiş metalin oksitlenme eğilimini azaltır.

Ca, Döküm alaşımlarına döküm öncesi hemen eklendiğinde ergimiş Őartlardaki hem de döküm işlemi sonrasındaki ısıl işlemde oksidasyonu azaltır. Mg levhaların haddelenebilirliğini geliştirir. Ca ilavesi yaklaşık ağırlıkça % 0,3'ün altında olması gerekir, aksi halde levha kaynak esnasında çatlamaya müsait hale gelir.

Fe, Mg alaşımlarındaki empüritelerden zararlı olanlarından biridir. Çok düşük miktarlarda bulunsa dahi korozyon direncini çok hızlı bir Şekilde düşürür. Genelde geleneksel seviyedeki alaşımlarda Fe içeriği ağırlıkça %0,01 den 0,03 aralığında olabilir. Korozyona max. direnç için Fe içeriği üst limit 0,005 olarak belirlenmiştir.

Li, Mg içerisinde çok yüksek katı çözünürlüğüne sahiptir (ağırlıkça %5.5,- %17.0). Li çok düşük yoğunluğuna (0,54) bağlı olarak alaşımlanmamış Mg un zaten düşük olan yoğunluğundan daha düşük değerlere düşürdüğu için ilgi çekmektedir. HMK yapıdaki  fazını oluşturmak için sadece %11 Li'a ihtiyaç vardır.

Böylelikle dövme alaşımlarının Şekil verilebilirliği gelişir. Li ilavesi mukavemeti azaltır, fakat sünekliği arttırır. Mg-Li alaşımları yaşlanma ile sertleşmeye uygun olsa bile hafifçe yükselen sıcaklıklarda (Ör: 60°C) aşırı yaşlanırlar. Mg-Li alaşımlarının sadece sınırlı uygulama alanları vardır.

Ni, Demir gibi Mg alaşımları içerisindeki bir diğer zararlı emprütedir. Çok düşük miktarlarda da olsa korozyon direncini hızla düşürür. Genelde geleneksel alaşımlarda Ni içeriği ortalama en çok ağırlıkça % 0,01- 0,303 aralığındadır. Maksimum korozyon direnci için Ni içeriği üst limit 0,005 olarak belirtilmiştir.

Nadir kıymetli metalller, Yüksek sıcaklıklarda Mg alaşımlarının mukavemetini arttırlar. Aynı zamanda alaşımların donma noktasını daraltarak kaynak çatlamasını ve dökümdeki poroziteyi azaltırlar.

Si, Mg alaşımlarına Si ilavesi ergimiş haldeki metalin akıcılığını arttırır. Alaşımda Fe de bulunuyorsa Mg alaşımlarının korozyon direncini azaltır.

Gümüş, Mg alaşımlarının mekanik özelliklerini arttırır.

Kalay, Kalay çok az miktarda Al ile birlikte Mg'un alaşımlandırılmasında kullanılır. Alaşımın sünekliğini arttırır ve dövme için daha uygun hale getirir. Sıcak işlem sırasında alaşımın çatlamaya karşı eğilimini azaltır.

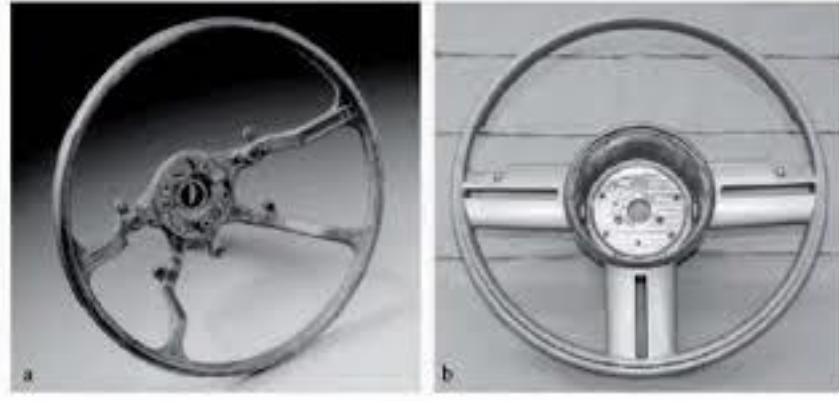
Zirkonyum, Mg alaşımlarında tane inceltici etkisi vardır.

İtriyum, Mg içerisinde çok yüksek çözünürlüğü vardır (ağırlıkça % 12,4) ve 300 °C' nin üzerindeki sıcaklıklarda sürünme direncini arttırmak için nadir toprak elementleri ile birlikte ilave edilirler [18].

2.5 Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

Magnezyum (Mg) alaşımları, son zamanlarda, hafif, yüksek spesifik mukavemet (sadece magnezyuma özgü yapı), sertlik, işlenebilirlik ve geri dönüştürülebilirlik gibi mükemmel özelliklerinden dolayı dikkat çekmektedir. Bu avantajlar, magnezyum alaşımlarını ağırlık azaltmanın son derece önemli olduğu çok çeşitli uygulamalarda cazip malzemeler yapmaktadır. Bununla birlikte, magnezyum alaşımları yapısal uygulamalarda alüminyum alaşımları kadar popüler değildir ve kaynaklı birleştirme yapmadaki zorluklar, yüksek kaliteli kaynaklar üretmek için güvenilir ve ucuz birleştirme yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir [20].

Otomobil endüstrisinde magnezyum alaşımlarının kullanımı direksiyon simidi, direksiyon sütunu parçaları, gösterge panelleri, koltuklar, dişli kutuları, hava emme sistemleri, vites kutusu muhafazaları, depo kapakları vb. gibi geniş bir yelpazede parçaların imalatını kapsar.



Şekil 2.6: a) AM50 serisi VW golf b) AM60 serisi VW lupo basınçlı döküm ile imal edilmiş direksiyon iskeletleri [21].



Şekil 2.7: Dövme magnezyum jant.

Gelecekteki gelişmeler arasında, büyük gövde parçaları, silindir blokları, kapı çerçeveleri ve benzin tank kapakları üretimi yer alacaktır. SKK'nın magnezyum alaşımı üzerindeki etkisine yönelik araştırmaların geliştirilmesiyle, SKK bu alanlarda uygulama için büyük potansiyel göstermektedir. Bu nedenle Mg alaşımları elektronik, otomotiv, havacılık, savunma ve uzay sanayinde çoğunlukla kullanılmaktadır.

Dünyada yakıt tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltmak için güçlü ve hafif metal çeşitleri için yapılan araştırmalar, magnezyuma olan ilgiyi arttırmaktadır. Magnezyum alaşımlarının otomotiv endüstrisindeki uygulamalarından olan taşıt ağırlığının azaltılmasına yönelik çalışmalarda, bazı motor parçalarında çelik ve

alüminyum alaşımlarının yerine Mg alaşımlarının kullanılmasıyla çeliğe göre 48 kg ve alüminyuma göre 19 kg ağırlık azalışı olacaktır. Böylece, her 100 km de çeliğe göre 0,25 lt alüminyuma göre 0,1 lt yakıt tasarrufu elde edilecektir [20,22].



Şekil 2.8: AZ91HP- Basınçlı döküm ile üretilmiş emme manifoldu [22].

Otomobillerde ağırlığın azaltılması konusunda üzerinde durulması gereken bir parça da direksiyon simididir. Bunun nedeni direksiyon simidinin hava yastığını taşıyacak şekilde tasarımının yapılmasıdır.



Şekil 2.9: AM60HP-Direksiyon simidi [11].



Şekil 2.10: AM20/50 Mercedes Benz koltuk iskeleti [11].

3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA KAYNAK YÖNTEMLERİ

Magnezyum alaşımlarına TIG, MIG, elektron ışın kaynağı, lazer, elektrik direnç ve sürtünme karıştırma kaynak yöntemleri uygulanabilmektedir. Mg alaşımlarının kaynağı birçok bakımdan Alüminyum kaynağına benzer. Bu benzerlikler şunlardır:

- 1) Yüzeyde Mg oksit teşekkülü
- 2) Yüksek ısı iletkenliği
- 3) Yüksek ısı genleşme katsayısı
- 4) Düşük ergime sıcaklığı
- 5) Katı malzeme ergime sıcaklığına yaklaşırken renk değiştirmesi [23].

3.1 Magnezyum Alaşımlarının TIG Kaynağı

Tungsten İnert Gaz (TIG) ve tungsten ark kaynağı olarak da bilinen Tungsten Ark Kaynağı, 1930'lu yılların sonunda magnezyum kaynağına ihtiyaç duyulduğunda geliştirilmiştir. Russell Meredith, magnezyumu kaynaklamak için inert gaz olan helyum ve tungsten elektrot kullanan bir kaynak işlemi geliştirmiştir. TIG kaynağı, paslanmaz çelik, alüminyum, magnezyum, bakır ve reaktif malzemeleri (örneğin, titanyum ve tantal) kaynak yapmak için yaygın olarak kullanılır. Bu işlem, tükenmez tungsten elektrot ile iş parçası arasında kalan elektrik arkının oluşturduğu ısıyı, ortak bölgedeki metali kaynalamak ve erimiş bir kaynak havuzu oluşturmak için kullanır. Ark alanı, kaynak havuzu ve tükenmeyen elektrotu korumak için inert veya indirgeyici bir gaz kalkanı ile örtülüdür. İşlem otojen olarak (dolgu maddesi olmadan) çalıştırılabilir veya hazırlanan bir kaynak havuzuna sarf edilebilir bir tel veya çubuk besleyerek doldurma maddesi eklenebilir [23].

3.2 Magnezyum Alaşımalarının MIG Kaynağı

Magnezyum alaşımalarının MIG kaynağında DATK (elektrod) kullanılır. Kısa devre kaynağında sabit voltaj makinası kullanılmakta olup bu makina genellikle püskürtme ark kaynağında tercih edilir. Sabit akım şiddetli (düşen volt-amper çıkışı) makinalar püskürtme ark kaynağında kullanılabilir ve bazen kaynak sıçramaları daha az olduğundan, püskürtme metal geçişi için asgari akım şiddeti düzeyine yakın şiddetle kaynakta avantajlı olurlar. Akım çıkışını pulslamak için özel sabit voltajlı makinalar, pulslu ark kaynağında kullanılır.

Metal geçiş (transfer) türleri: Magnezyum alaşımalarının MIG kaynağı için 3 çeşit metal geçişi uygundur: kısa devre, pulslu ark ve püskürtme yağmuru transferi. Pulslu ark sadece yukarıda belirtilen özel makina ile sağlanabilir. Pulslama tertibatı olmadan özgül çalışma akım şiddetleri aralığı, tel sürme hızı ve tel çapında süreç küresel transferle sonuçlanır ki bu magnezyum alaşımalarının kaynağına uygun değildir [23].

3.3 Magnezyum Alaşımalarının Elektron Işın Kaynağı

Elektron ışın kaynağı, birleştirilen malzemeleri sıkıştırmak, ısıtmak ve eritmek için yoğun bir yüksek hızlı elektron akışı kullanarak metalleri eritip birleştiren bir işlemdir. **Elektron ışını,** yüksek vakumda yerleştirilmiş bir tungsten katot ve bir anottan oluşan elektron tabancasıyla üretilir. Tipik elektron ışın kaynağı için kullanılan ışın akımları ve artan gerilimler sırasıyla 50-1000 mA ve 30-175 kV aralığında değişir. Yüksek yoğunluklu bir elektron ışını metali, kaynak sırasında anahtar deliği gibi bir buhar deliği oluşturarak buharlaştırabilir.

Elektron ışın prosesi, yüksek tekrarlanabilirliğe ihtiyaç duyulan zor kaynak için uygundur. Lazer kaynağı çok uygun bir yöntem olmasına rağmen, enerji sınırlamaları kalın iş parçalarında füzyon nüfuz derecesini sınırlar. Elektron ışın prosesini kontrol eden beş faktör, hızlandırıcı voltaj (V, kV), ışın akımı (I, mA), kaynak hızı (v , mm / s), vakum seviyesi (10 üzeri -3 Torr'un altında) ve iş parçasının yüzeyi üzerindeki elektron demetinin nokta boyutu (ϕ , mm) dur [24].

Elektron ışın kaynağında çok yüksek güç yoğunluğu ile kalın iş parçalarında dahi tam kaynak nüfuziyeti sağlanır. Farklı metaller, kaba, kırılğan intermetalik bileşiklerin oluşumunu engelleyebilen çok hızlı soğutma nedeniyle kaynaklanabilir.

2010 yılında yapılan bir çalışmada (Luo ve arkadaşları), AZ61 alaşımının kaynağı esnasında termal etki olması durumunda elektron ışını iki özel termal etki üretir:

- 1) Derin nüfuziyet termal etki
- 2) Metal buharının yüzey termal etkisidir.

AZ61 alaşımı için deneysel veriler; anahtar deliğine benzer termal etkisini etkileyen kilit parametrelerin, kaynak ısı girişi ve odaklama sargı akımı olduğunu göstermektedir.

AZ serisi magnezyum alaşımlarının Al içeriğini arttırmak (% 10'a kadar), elektron ışın kaynağında kaynağın hem sağlamlığını hem de mikro sertlik derecesini arttırmaya ve kırılğan çökelti konsantrasyonunda artışa bağlı olarak sünekliği azaltır.

2007 yılında yapılan bir çalışmada (Chi and Chao, 2007), 11 mm kalınlığında AZ31B plakalarının 4000 W ila 5000 W'lık bir güce sahip elektron ışını kaynağı sırasında çeşitli işlem parametrelerinin etkisi incelenmiştir Kaynak direncini azaltan faktörlerin, kaynak geometrisindeki sapmalar, porozite ve tane kabalaşması olduğu sonucuna varılmıştır. Genel olarak, kaynak mukavemeti baz alaşım mukavemetinin %90 ından fazlasına ulaşır [24,25].

4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

Füzyon kaynaklarında, eriyiğin kimyasal bileşimi önem kazanır ve dolgu maddeleri veya sarf elektrotlar kullanılır. Ayrıca, işlem belki erimenin oksidasyonunu önlemek için nötr bir atmosfere ihtiyaç duyar. Bazen kaynak öncesi yüzey hazırlığı da gereklidir. Erime ve katılma nedeniyle ortaya çıkan çeşitli kusurlar ve güçlükler, çekme mukavemeti (malzemenin maksimum kuvvet altında kırılmaya karşı gösterdiği direnç), yorulma özellikleri ve şekil verilebilirlik gibi mekanik özelliklerin zayıflığına neden olmaktadır. Bu birleştirme yöntemlerinin diğer zorluklarından olan gözeneklilik, oksidasyon, sıcak ve soğuk çatlaklar ve ayrıca farklı termal genleşme katsayılarına sahip olan ortak olmayan benzer metallerin yetersizliği söz konusudur [26].

Sürtünme karıştırma kaynağı nispeten yeni bir birleştirme tekniğidir ve 1991'de The Welding Institute, İngiltere (TWI) tarafından icat edilmiştir. W.Thomas tarafından geliştirilmiş olup, patenti alınan ve geliştirilmeye devam edilen bir katı faz kaynak yöntemidir. Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), 1991'deki gelişmesinden beri hızla genişleyen ve havacılık, otomotiv, demiryolu ve denizcilik gibi çok çeşitli endüstrilerde uygulamalar bulmaktadır.

SKK prosesi, belki de en önemlisi füzyon kaynak teknikleri kullanılarak kaynak yapmak zor veya imkansız olan alaşımları kaynak edebilme kabiliyeti olan diğer kaynak yöntemlerine kıyasla bir takım önemli avantajlar gösterir. SKK işlemi, katı fazda, malzemenin erime noktasının altındaki sıcaklıklarda gerçekleşir ve sonuç olarak, ikinci fazların oluşması, gözeneklilik, aşınma ve çatlama gibi yeniden katılma ile ilgili problemler yaşanmaz. Buna ek olarak, işlemin daha düşük sıcaklığı daha düşük distorsiyon (çarpılma) ve daha düşük artık gerilmelerle birleştirmeyi mümkün kılmaktadır. SKK dolgu malzemesi gerektirmeyen ve çoğu durumda koruyucu bir gaz kullanılmasını gerektirmeyen enerji açısından verimli bir prosestir. Ayrıca, proses çoğu füzyon kaynak tekniği ile ilgili dumanlar, ark flaşı, sıçrama ve kirlilikten yoksundur. Bu ve diğer pek çok nedenden ötürü SKK birçok üretici için cazip bir birleştirme sürecidir [27, 28].

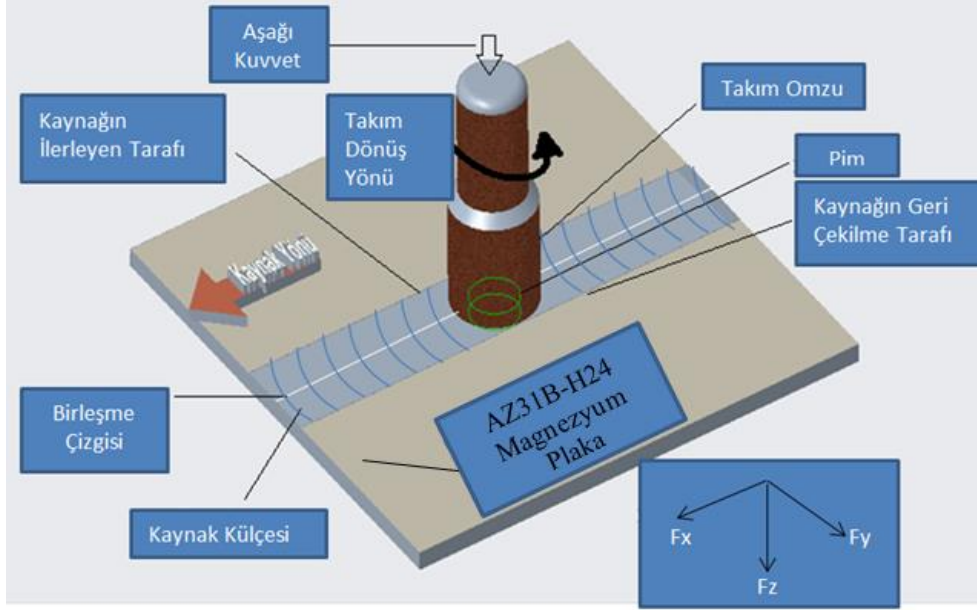
SKK da bir pim ve omuzdan oluşan dönen bir takım iş parçasına batırılmakta sürtünme ve plastik deformasyon yoluyla ısı üretmekte ve bağlantı hattını geçmektedir. Giriş değişkenleri; takım döndürme hızı, kaynak hızı, dalma derinliği, eğim açısı, yana eğme açısı, omuz geometrisi, omuz özellikleri, pim geometrisi ve pim özelliklerini (dişli, konik, silindirik profil gibi) içerir. SKK' nın ilerleme-geri çekilme olayı da iyi anlaşılmalıdır; çünkü sürecin baskın bir özelliğidir ve önemli miktarda omuz basıncı altında pimin arkasında birlikte dövülmeden önce takım pimi etrafında ısıtılan, plastikleştirilen malzemenin ekstrude edildiğini büyük ölçüde etkiler. Bu kaynak yöntemi çok araştırma ve tartışmanın konusudur [29, 30].

4.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağının Yapılışı

Bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynak yönteminde dönel hareket yapan silindirik bir takım belirli bir geometrik yapıya sahiptir. Şekil 4.1 de görüldüğü gibi silindirik bir omuz ve pim kaynaklama işlemini gerçekleştirmektedir. Takım omzu iş parçasına dokunana kadar daldırılır. Takım omzu ile kaynaklanan parçaların sürtünme teması nedeniyle oluşan ısı metali plastikleştirir. Takım kaynak yönünde ilerledikçe takımın özel profil kuvvetleri plastikleştirilen malzemeyi geriye doğru iter ve önemli dövme kuvveti nedeniyle malzemeyi birleştirir ve böylece kaynak bağlantısı sağlanmış olur [30].

Takım (omuz ve pim) ile iş parçası arasındaki sürtünme, ısı oluşumunun en büyük nedenini oluşturur. Omuz çapı arttıkça üretilen ısı miktarının artacağı açıktır. Omuz aynı zamanda kaynak işlemi esnasında yumuşatılmış malzemeyi destekler. Pim'in de sürtünme ısısına katkısı olmakla birlikte, plastikleşen malzeme akışının, omuzdan malzemeye doğru akmasını sağlar.

SKK esnasında dikkat edilmesi gereken bir husus da, kaynak kök kısmının tam olarak kaynaması için pim ucu malzeme arkasına çok yakın geçmelidir.



Şekil 4.1: Sürtünme karıştırma kaynağı şematik resmi.

4.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Standartlaştırılmış Pim Tipleri

Malzeme akışını iyileştirmek ve sonuçta kaynak kalitesini arttırmak, enerji maliyetlerini düşürmek ve SKK prosesinin artan kullanımına yol açacak gerekli eksenel kaynak güçlerini azaltmak için çeşitli takım tasarımları geliştirilmiştir.

Bu takım tasarımları ve özellikleri sonraki bölümlerde sunulmaktadır.

4.2.1 Whorl™ Serisi Pimler

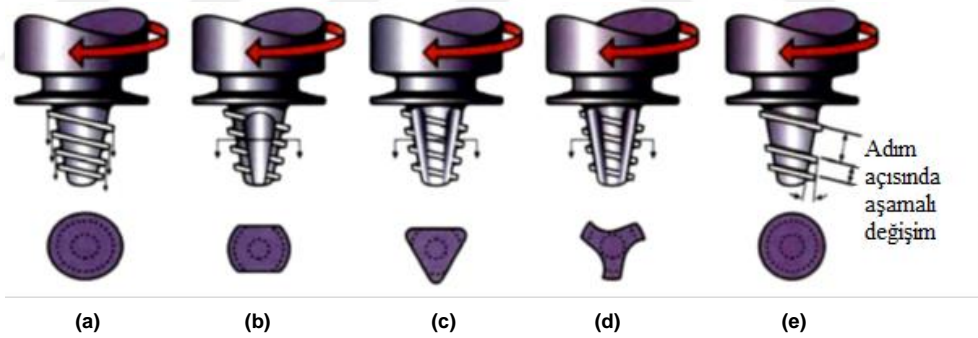
Whorl™ pim tipi yapılan denemeler sonucunda belirlenmiştir. Bu pimin tasarımı TWI (İngiliz Kaynak Enstitüsü) tarafından yapılmıştır. Whorl™ pimi plastikleştirilmiş malzemeyi aşağıya doğru sıkıştıran yan daireler ile sarmal (helisel) bir sırt olan, konik, kesik uçlu bir pime sahip olan kürek şeklinde bir omuzdan oluşur. Whorl™ pimi, aynı çaptaki silindirik bir pimin hacminden % 60 oranında azdır. Deplase (yer değiştirme) hacmi azaltmak, çapraz yükleri de azaltır, bu da daha hızlı takım ilerleme hızlarını mümkün kılar. Kesik koni pimi ile Whorl™ pimi arasındaki en önemli fark pim yüzeyindeki sarmal (helisel) sırtın tasarımıdır. Whorl

piminde bu sarmal (helisel) tasarım net bir aşağı doğru hareket üretmek için bir burgu görevi görür. Bu takım, takımın tasarımı nedeniyle daha iyi sürtünme ısı ve malzeme akışı sağlaması nedeniyle kalın kesitli alaşımların (25 ila 75 mm) tek bir geçişle kaynaşmasını sağlar.

Whorl™ pim'in çeşitleri, dairesel, oval, yassı veya girintili pim kesitlerini içerir. Whorl™ piminin önemli avantajı, pim tarafından süpürülen hacmin pim hacmine oranıdır. Silindirik pimler 1,1 ila 1 arasında bir orana sahipken, Whorl™ pimi 1,8 ila 1 oranında (25 mm veya 1 inç kalın plaka) sahiptir [31,32].



Şekil 4.2: Kesik koni pim [31].



Şekil 4.3: Whorl™ pim çeşitleri şematığı [29]. (a) Oval şekilli takım (b) Pervane şekilli takım (c) Üçgen taraflı takım (d) Üç taraflı tekrar girişli takım (e) Spiral formulu takım

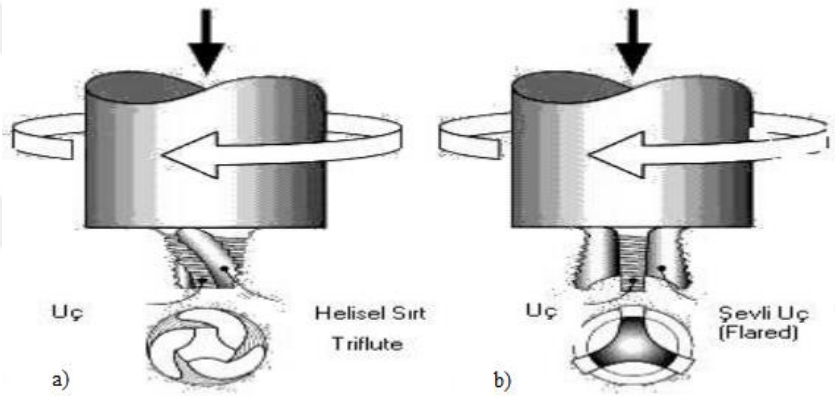
4.2.2 MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ Serisi Pimler

MX Triflute ve Flared-Triflute pimler, Whorl piminin bir başka gelişmiş şekilleridir. Sarmal sırtın yanı sıra, MX Triflute pimi sarmal sırtın içine doğru kesilmiş üç kanala sahiptir. Kanallar, silindirik pim in yer değiştirme hacminden % 70

oranında azdır ve kaynak hattında ek deformasyon sağlar. MX Triflute, kalın kesitli bakırın kaynağına ek olarak, kalın kesitli alüminyum alaşımlarının kaynağında da kullanılmaktadır [33].

Flared-Triflute piminde, pimin alt kısmı dışa doğru genişleyerek fırça tipi profil oluşturur. Bu profil, pimin süpürme ve statik hacimlerini artırır ve geliştirilmiş bindirme sürtünme karıştırma kaynak kalitesi için pimin altındaki akış modelini değiştirir [34].

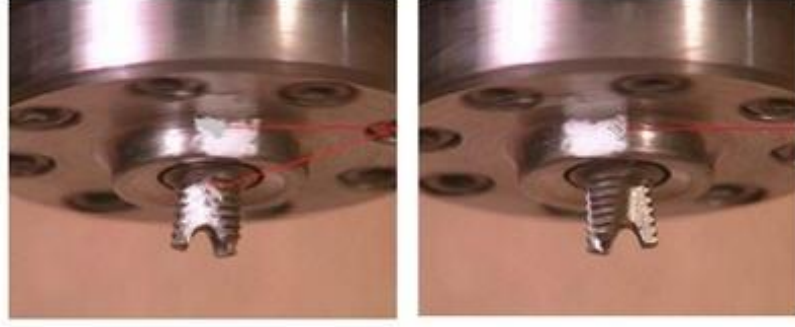
Triflute pimler, silisyum parçacıklarının parçalanmasında ve döküm porozitesini iyileştirmede silindirik veya konik pimlerden daha etkilidir. Yapılan çalışmalar Triflute takımların çapraz kuvvet oranında % 100 artış ve eksenel kuvvet de % 20'lik bir azalma sağladığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.4: a) MX triflute takım b) Flared-Triflute takım.



Şekil 4.5: MX özellikli SKK takım [34].

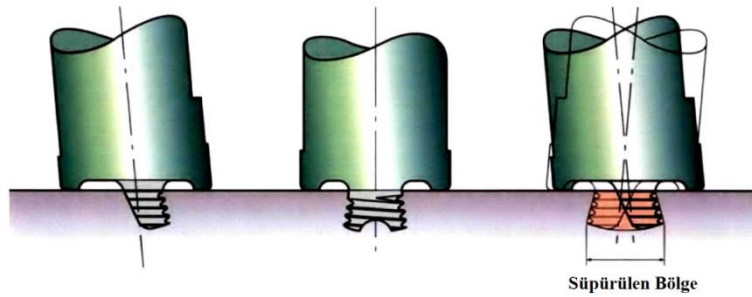


Şekil 4.6: Flared-Triflute özellikli takım.

4.2.3 Skew-Stir™ ve A-Skew™ Serisi Pimler

Skew Stir SKK takımı TWI (İngiliz Kaynak Enstitüsü)'de geliştirilen kaynak takımlarından biridir. Bu takımlarda omuz yüzü, takım piminin eksenine eğiktir ancak kaynak yapılacak tezgâh eksenine diktir. Malzeme akışını geliştirmek için takımın bir tarafı asimetrik bir şekilde kesilir.

Bu tekniğin kullanılması, kaynağın statik hacmine göre dinamik hacim oranını artırır. Bu oran, kaynaktaki boşluk oluşumunun azaltılmasında önemlidir. Bu takım tasarımı ile daha büyük hacim karıştırılmaktadır [35].



Şekil 4.7: Skew-Stir™ takım [32].

4.3 Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takım Malzemeleri

Sürtünme karıştırma, takım sıcaklığının işlenecek parçanın katı sıcaklığına yaklaştığı termo-mekanik bir deformasyon işlemidir. Kaliteli bir sürtünmeli karıştırma kaynağı imalatı, istenilen uygulama için uygun takım malzemesinin seçilmesini gerektirir. Tüm sürtünme karıştırma takımları belirli bir işlev için tasarlanmış özellikleri içerir. Dolayısıyla, boyutsal kararlılığını, tasarım özelliklerini kaybeden veya daha kötüsü kırılmaları olan bir takım olması istenmemektedir.

Doğru takım malzemesinin seçilmesi, hangi sürtünme karıştırma uygulaması için hangi malzemenin özelliklerinin önemli olduğunu bilmeyi gerektirir. Birçok farklı malzeme karakteristiği, sürtünme karıştırma için önemli kabul edilebilir, ancak malzeme özelliklerinin sıralaması, iş parçası malzemesine, deneyimlere ve tercihlere bağlı olacaktır. Bir malzemenin fiziksel özelliklerine ek olarak, SKK takım malzemesinin seçimini belirleyebilecek bazı pratik hususlar vardır.

Bu hususlar şunlardır:

Ortam ve Yüksek Sıcaklık Mukavemeti:

Kullanılacak olan takım malzemesi, ilk önce iş parçasıyla temas ettiğinde ve sürtünmeli karıştırma kaynağı süresince takım kırılmasını veya bozulmasını önlemek için yüksek sıcaklıkta yeterli basınç ve kesme mukavemetine sahip olduğunda basınç yüklerine dayanabilmelidir. Şu anda, gereken takım kuvvetini tahmin etmek karmaşık hesaplama simülasyonunu gerektirir, bu yüzden tipik olarak güç gereksinimleri tecrübeye dayanır. Kullanılan takım malzemelerinin asgari olarak, takımın beklenen normal kuvvetlerinden daha yüksek bir basınç dayanım mukavemeti göstermesi gerekir [36].

Yüksek Sıcaklık Kararlılığı:

Yüksek sıcaklıkta yeterli dayanıma ek olarak takım, kullanım süresi boyunca mukavemet ve boyutsal stabilite (kararlılık) sağlamalıdır. Sürünme (ve sürünme yorgunluğu), zayıf sürünme direncinin kaynak sırasında takım boyutlarını değiştireceği uzun kaynak mesafeleri için bir husustur. **(Sürünme-Creep:** Malzemelerde ergime sıcaklığının altında sabit bir yüksek sıcaklıkta ve sabit bir yük

altında meydana gelen kalıcı şekil değişimidir). Mukavemetlerini çökeltilerden, deformasyon sertleşmesinden veya şekil değiştirme sertleşmesinden elde eden takım malzemeleri maksimum kullanım sıcaklıklarını tanımlar. Maksimum kullanım sıcaklıklarının üstünde kullanılan takım, zamanla mekanik özelliklerinde bir azalma gösterecektir. Mekanik özelliklerin değişimi aşınmanın, tavlama ve dislokasyon alt yapısının geri kazanılmasından veya daha zayıf faza dönmesinden kaynaklanmaktadır. Sürtünme karıştırmada, bu mikro yapı değişiklikleri takımı zayıflatacak ve takım şeklini değiştirecek veya takımı kıracaktır. Sürtünme karıştırmada takımları birçok ısıtma ve soğutma çevrimine tabi tutulduğunda, termal yorulma mukavemeti göz önünde bulundurulmalıdır. Bununla birlikte, çoğu durumda, diğer takım malzemesi karakteristikleri, termal yorulmadan önce kusurlara neden olacaktır [36].

Aşınma Direnci:

Aşırı takım aşınması takım şeklini değiştirir ve bu durum kaynak kalitesini değiştirerek kusur olasılığını artırır. Sürtünme karıştırmada takım aşınması adhesiv, abrasiv aşınma veya kimyasal aşınma (reaktiflik olarak ele alınır) mekanizmaları ile oluşabilir.

Tam aşınma mekanizması, iş parçası ile takım malzemeleri ve seçilen takım parametreleri arasındaki etkileşime bağlıdır. Örneğin, çok kristalli kübik bor nitrür (PCBN) takımlarında düşük takım devir hızı adhesiv aşınmaya, yüksek takım dönüş hızı abrasiv aşınmaya neden olur [36].

Takım Reaktivitesi (Kimyasal Reaksiyona Girme Kabiliyeti):

Takım malzemesi, takımın yüzey özelliklerini (genellikle olumsuz bir şekilde) değiştirecek iş parçası veya çevreyle reaksiyona girmemelidir. Titanyumun yüksek sıcaklıklarda reaktif olduğu iyi bilinir; böylece titanyumun takım malzemesiyle olan reaksiyonları takım özelliklerini değiştirecek ve eklem kalitesini etkileyecektir. Takımın çevresel reaksiyonları (örneğin oksidasyon) takım aşınma direncini değiştirebilir veya hatta toksik maddeler üretebilir (yani MoO₃-molibden trioksit- oluşumu). Bu çevresel reaksiyonlar örtü gazlarıyla hafifletilebilir, ancak bunlar kaynak sistemine karmaşıklık katabilir. İş parçası ayrıca çevresel reaksiyonlar

da gösterebilir; titanyum alaşımlarında, iş parçası oksidasyonunu önlemek için bir örtü gazı kullanmak gerekir.

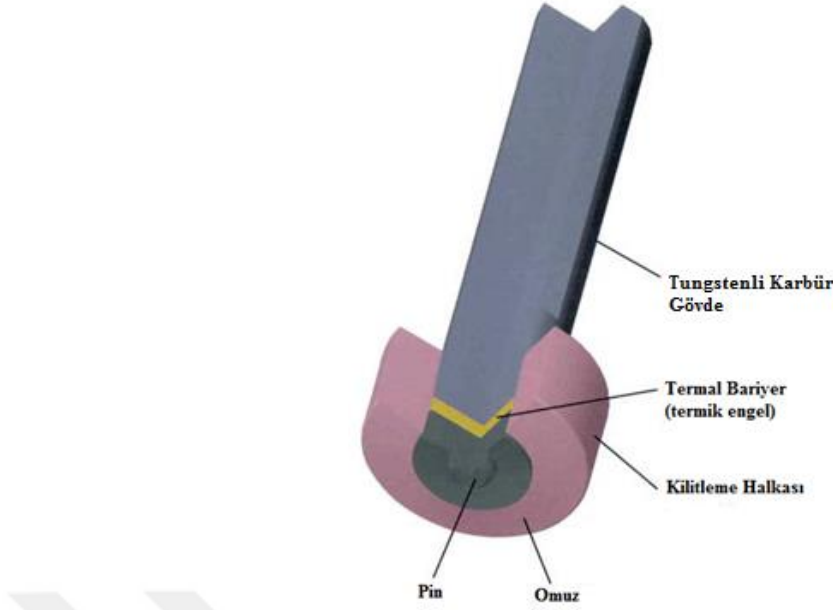
Kırılma Tokluğu:

Takım kırılma tokluğu takım ile dalma sırasında önemli rol oynamaktadır. Takım ilk olarak iş parçasına değdiğinde üretilen bölgesel gerilmeler ve oluşan zorlanmalar, bu zorlama ve gerilmeleri hafifletme yöntemleri (klavuz delik, yavaş dalma hızı ve iş parçasının ön ısınması) kullanılsa bile bir takımı kırmak için yeterlidir. Genel olarak takım daldırma ve bekleme sürelerinin bir takıma en fazla zarar verdiği kabul edilmektedir. Bir takım malzemesi seçilirken, sürtünme karıştırma makinesi iş mili salınımı (iş mili dönüşü sırasında yanal hareket) da dikkate alınmalıdır.

Düşük kırılma tokluğuna sahip takımlar örneğin seramik, sadece erken kırılmayı önlemek için düşük salınım gösteren sürtünme karıştırma makinelerinde kullanılmalıdır [37].

Termal Genleşme Katsayısı:

SKK kaynak takımlarında termal genleşme, karma malzemeli takımlarda söz konusu olan bir durumdur. Pim ve omuz malzemeleri arasındaki ısıl genleşme katsayısında büyük farklar omzun pime göre genişlemesine veya omuza göre pimin genişlemesine neden olur. Bu durumların her ikisi de pim ve omuz arasındaki stresleri (gerilmeleri) artırır, böylece takımın bozulmasına yol açar.



Şekil 4.8: PCBN takımında termal bariyer şematığı [38].

Pim ve omuz tek bir malzemeden yapıldığı zaman ek hususlar dikkate alınmalıdır. Bu durumu hafifletmenin bir yolu, takımdan gövdeye ısı geçişini önlemek için tasarlanmış bir termal bariyerdir. Bunun bir örneği, PCBN takımları ile birlikte kullanılır ve termal bariyer, ısının tungstenli karbür şaftına girmesini önler [39].

Talaşlı İşlenebilirlik:

Çoğu sürtünme karıştırma takımı, takım tezgâhı ile işlenmiş, taşlanmış veya elektro-deşarj edilmiş özelliklerle tasarlanmıştır. Gerekli takım tasarımı için işlenemeyen herhangi bir malzeme düşünülmemelidir.

Mikroyapı ve Yoğunluk Düzensizliği:

Mikroyapı veya yoğunlukta bölgesel değişiklikler varsa takım malzemeleri kullanışlı değildir. Bu küçük değişiklikler, erken kırılmanın meydana geldiği takım içinde zayıf bir bölge oluşturur. Toz metalürjisi alaşımları farklı yoğunluklarda üretilir, bu nedenle sürtünme karıştırma takımları yalnızca tamamen yoğun bir şekilde imal edilmelidir.

Malzemelerin Bulunabilirliği:

Bir takım malzemesi, sürekli olarak tedarik edilemiyorsa kullanışlı değildir. Bu durum, özellikle üretim özelliklerinin belirli bir malzemenin kullanımını gerektirdiği bir üretim ortamında geçerlidir.

Tablo 4.1: Mevcut sürtünme karıştırma kaynak takım malzemelerinin özeti.

Alaşım	Kalınlık (mm)	Takım Malzemesi
Alüminyum Alaşımları	< 12	Takım Çeliği, WC (a)-Co
	< 26	MP159 (b)
Magnezyum Alaşımları	< 6	Takım Çeliği, WC
Bakır ve Bakır Alaşımları	< 50	Nikel Alaşımları, PCBN (c) Tungsten Alaşımları
	<11	Takım Çeliği
Titanyum Alaşımları	<6	Tungsten Alaşımları
Paslanmaz Çelik	<6	PCBN, Tungsten Alaşımları
Düşük Alaşımlı Çelik	<10	WC, PCBN
Nikel Alaşımları	<6	PCBN

a) Tungsten Karbür

b) Ultra Yüksek Mukavemetli Kobalt-Nikel-Bazlı Alaşım

c) Çok Kristalli Kübik Bor Nitrür [40].

1-Takım Çeliği:

Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan en yaygın takım malzemeleridir. Bunun nedeni, SKK literatürünün çoğunluğunun alüminyum alaşımları üzerine takım çeliği ile sürtünme karıştırma yapılmasıdır. Takım çeliğinin sürtünmeli karıştırma takım malzemesi olarak kullanılmasının avantajları; kolay bulunabilirlik ve işlenebilirlik, düşük maliyet ve belirlenmiş malzeme karakteristiği (çekme, kopma, aşınma, sıcaklık v.b özellikler) dir.

Araştırmalar **AISI H13'ü** diğer takım çeliklerinden daha fazla göstermektedir. AISI 13, sıcak işlenmiş krom-molibden bir hava sertleştirme çeliğidir ve iyi yükseltilmiş sıcaklık mukavemeti, termal yorgunluk direnci ve aşınma direnci ile bilinir. H13 takımı, alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağına ek olarak hem oksijeni giderilmiş bakır (Cu-OF) hem de yüksek fosforlu deoksitlenmiş bakır (Cu-DHP) ile sürtünmeli olarak karıştırılmasında da kullanılmıştır. Ancak yüksek fosforlu deoksitlenmiş bakırdaki sınırlı hareket hızı

H13 ün kullanımını sınırlar. Yapılan bir araştırmada takım çeliğinden yapılmış SKK takımlarının 3 mm kalınlığında bakırın kaynak olabileceğini ancak 10 mm kalınlığında bakırı kaynaklamak için takımın özelliklerini (aşınma direnci, yüksek sıcaklığa dayanım, termal genleşme gibi) doldurduğu, takım çeliğinin yumuşadığı ve pim profilinin bozulduğu tespit edilmiştir. Takım eliklerinin maksimum kullanım sıcaklığı takım çeliğinin türüne bağlıdır: yağ ve suyla sertleştirilmiş takım elikleri 500 ° C'ye (930 ° F) kadar kullanılabilir; ikincil sertleştirme yapılmış takım elikleri 600 ° C'ye (1110 ° F) kadar kullanılabilir [40,41].



şekil 4.9: Tek parçadan yapılmış AISI H13 takım eliği [42].

2-Nikel ve Kobalt Bazlı Alaşımlar:

Yüksek dayanım, süneklik, sürünme direnci ve korozyona sahip olan ve yüksek sıcaklığa dayanıklı nikel-kobalt bazlı alaşımlar olarak geliştirilmiştir. Bu alaşımlar, mukavemetlerini okeltilerden alırlar, bu nedenle, okelti fazlalığının ve çözünmesinin önlenmesi için kullanım sıcaklığı okelme sıcaklığının (tipik olarak 600 ila 800 ° C veya 1110 ila 1470 ° F) altında tutulmalıdır [40]. Nikel ve kobalt bazlı alaşımlar başlangıçta uçak motoru parçaları için yapılmıştır, alaşımlar hakkında çok şey bilinmektedir ve makul bir tedarik mevcuttur. Sürtünme karıştırma kaynağı için birkaç farklı nikel baz alaşımı kullanılmıştır. Bunlar; IN938, IN939, MAR-M-002, Stellite 12, IN-100, PM 3030, Nimonic 90, Inconel 718, Waspalloy ve Nimonic 105 dir. Alüminyum alaşımlarına, kobalt-nikel-bazlı alaşım MP 159'dan imal edilen takımlar ile sürtünme karıştırma kaynağı uygulanmıştır [43].

3-Refrakter (Isıya Dayanıklı) Metaller:

Refrakter metaller (tungsten, molibden, niyobyum ve tantal), yüksek sıcaklığa dayanıklı (örneğin, ampul filamentleri) ve yüksek yoğunluklu yerlerde (balistik mermiler) kullanılır. Bu alaşımların birçoğu tek fazlı (saf-homojen) olarak üretilir, bu nedenle mukavemet erime noktasına kadar neredeyse korunmaktadır. Bu nedenle, refrakter metaller 1000 ve 1500 ° C (1830 ve 2730 ° F) arasındaki sıcaklığa dayanan en güçlü alaşımlar arasındadır. Ancak, tantal ve niyobyum, sünekliği hızlı bir şekilde azaltan yüksek sıcaklıklarda yüksek oksijen çözünürlüğüne sahiptir.

Tungsten bazlı alaşımlar; bakır alaşımlarının, nikel alüminyum bronzunun, titanyum alaşımlarının ve çeliklerin SKK'nda kullanılmıştır.

Refrakter metallerin kullanımındaki dezavantajlar, malzemenin sınırlı bulunabilir olması, maliyet ve talaşlı işleme zorluğudur [43,44].

4- Karbürler ve Metal-Matris Kompozitleri:

Karbürler, üstün aşınma direnci ve ortam sıcaklıklarındaki makul kırılma tokluğundan dolayı işleme takımları olarak yaygın şekilde kullanılır. Çünkü talaş kaldırma işlemleri için yapıldıklarından karbürler yüksek sıcaklıklarda iyi performans gösterirler. Tungsten karbürden yapılan sürtünme karıştırma takımlarının, Al 6061'in sürtünmeli olarak karıştırılmasında tek tip lifli düzgün yüzeyler elde edildiği bildirilmiştir. WC-Co'nun üstün aşınma direnci dişsiz pimlerin sürtünme yapmasına izin vererek 5 mm kalınlığındaki AC4A (alüminyum silikon alaşımı) ve hacimce % 30 SiC alaşımı kaynaklanabilmektedir. Eğer takım dişli olarak yapılırsa ciddi aşınmalar gözlenir. WC ve WC-Co yüksek sıcaklık mukavemetinden dolayı karbon S45C çeliğini Al 6064 'e SKK ile kaynatmak için kullanılmıştır.

Takviye fazı olarak TiC kullanan metal matrisli kompozitler de bakır alaşımları için takım malzemesi olarak kullanılmıştır [45,46].

5- Kübik Bor Nitrür (PCBN):

Polikristal kübik bor nitrür başlangıçta takım çelikleri, dökme demirler ve süper alaşımların (aşınmaya ve 800° C'tan yüksek sıcaklıklarda akmaya karşı yüksek

direnç gösteren, ateşe dayanıklı karmaşık alaşım) torna edilmesi ve işlenmesi için geliştirilmiştir. Son zamanlarda PCBN, özellikle yüksek sıcaklık alaşımları için bir sürtünme karıştırma takım malzemesi olarak kabul görmektedir. PCBN, aşırı işleme uygulamalarında, önceki başarısına dayanan bir sürtünme karıştırma takımı olarak seçilmiştir [47,48].

PCBN'nin imalatı, aşırı sıcaklıklar ve basınçlar üretilen, PCBN boyutunu sınırlayan çok yüksek sıcaklık / yüksek basınç işlemi ile gerçekleşir. Takımın yalnızca omuzu ve pimi PCBN'den üretilmektedir; gövde tungstenli karbürden yapılır ve her ikisi birlikte süperalaşımli kilitleme halkası ile tutulur. Yüksek takım maliyetleri ve düşük kırılma tokluğu nedeniyle PCBN takımlarının dikkatli kullanılması gerekir. PCBN takımları, takım kırılmasını en aza indirmek için çok iyi balans alınmış iş mili gerektirir.

PCBN ile ferritik çelikler, çift fazlı çelikler, ostenitik paslanmaz çelikler, 430 tipi paslanmaz çelik, 2507 süper duplex paslanmaz çelik, sınıf 40 gri dökme demir, nikel bazlı alaşımlar, Ni-Al bronz, bakır ve çok ince taneli çeliklerin başarılı sürtünme karıştırma kaynakları yapılmıştır [51].

4.4 Sürtünme Karıştırma Kaynağında Omuz Tasarımı ve Omuz Özellikleri

Takım omuzları, iş parçasının yüzeyine ve yüzey altı bölgelerine ısı (sürtünme ve malzeme deformasyonu yoluyla) üretmek üzere tasarlanmıştır. Takım omzu, ince levhada deformasyonel ve sürtünmeli ısıtmanın büyük bir kısmını üretirken, pim kalın iş parçalarında ısınmanın büyük bir kısmını üretir. Ayrıca, omuz, kaynak konsolidasyonu (birleşim) için gerekli olan aşağı doğru dövme işlemini gerçekleştirir [51,52].

İçbükey (konkav) Omuz:

İlk omuz tasarımı, standart tip omuz olarak bilinen içbükey omuz biçimindeydi ve şu anda sürtünme karıştırma kaynağında en yaygın omuz tasarımıdır. İçbükey omuzlar, kaliteli sürtünme karıştırma kaynakları oluşturur ve basit tasarımlı olduğundan kolayca işlenir. Omuz içbükeyliği omuz kenarıyla pim

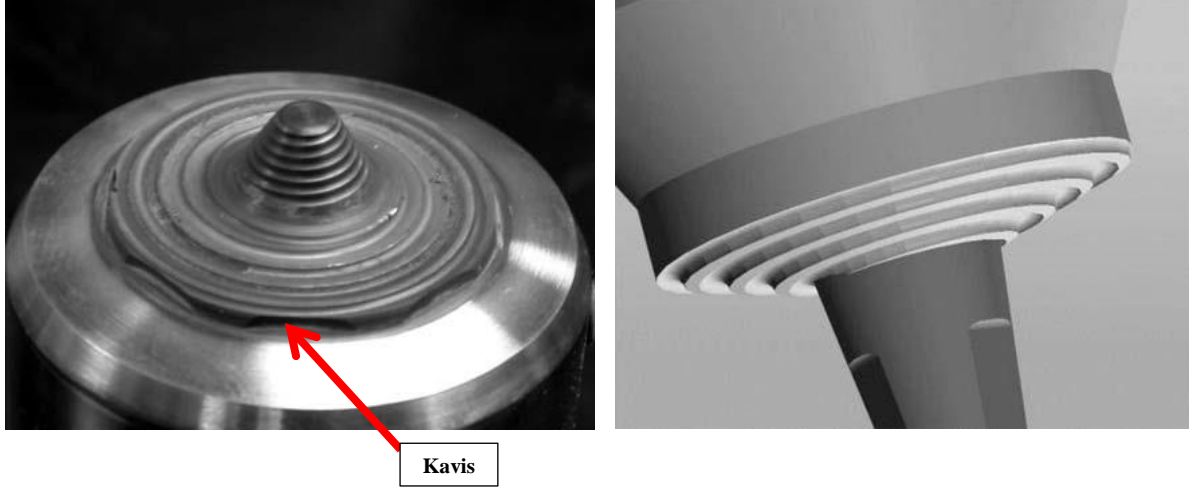
arasında 6 ila 10° lik küçük bir açı ile üretilir. Takım daldırma işlemi sırasında, pim tarafından yer değiştiren malzeme, takım omzunun içindeki boşluğa beslenir. Bu boşluk, omzun dövme işlemi için bir havuz görevi görür. [52,53]. Takımın ileriye doğru hareketi yeni malzemeyi omzun boşluğuna zorlar ve mevcut malzemeyi pim arkasına iter. Bu omuz tasarımının uygun şekilde çalışması için takımın kaynak yapılacak iş parçasının normalinden hareket yönünden 2 ila 4° eğilmesi gerekir; bunun nedeni malzeme haznesini muhafaza etmek ve omzun arka kenarının kaynak üzerinde sıkıştırıcı bir dövme kuvveti üretmesini sağlamak için gereklidir [54,55].



Şekil 4.10: Yuvarlak pimli içbükey omuz [56].

Dışbükey (konveks) Omuz:

Bu omuz tasarımı, omuz ve iş parçası arasındaki temas alanında daha büyük bir esneklik sağlar ve (omuz bağlantı miktarı, kaynak kalitesinde herhangi bir kayıp olmaksızın değişebilir), birleşme uyumsuzluğu toleransını artırır. Ayrıca farklı kalınlıktaki levhaların birleştirilmesinde kolaylık sağlar ve kompleks eğriliklerin kaynak yeteneğini artırır. Dışbükey omuz profili konik veya kavisli olabilir [57].



a)

b)

Şekil 4.11: (a) Kavisli veya (b) Konik geometrili olan dışbükey omuz şekilleri [56].

Farklı Omuz Özellikleri:

SKK takım omuzları, omuz tarafından üretilen malzeme deformasyonunu arttırmak için farklı özellikler de içerebilir; bu da levhaların karıştırılmasının artması ve yüksek kaliteli sürtünme karıştırma kaynaklarının elde edilmesini sağlar.

Bu omuz özellikleri, çıkıntılı, tırtıklı, oluklu, eş merkezli dairelerden oluşabilir. Şu anda, omuz özelliklerinin üç tipinde örnekler yayınlanmıştır. Bunlar kepçe tipi, eş merkezli daire ve helezoni şeklindeki kıvrımlardır.

Helezoni tip omuz en sık görülen omuz özelliğidir. Helezoni omuzlu takım, omzun kenarından merkezine doğru spiral kanal kesilmiş düz bir yüzeye sahiptir. Kanallar deforme olan malzemeyi omzun kenarından pimine doğru yönlendirir ve böylece takımı eğme gereği ortadan kalkar [56].

Konkav omuz takımları, takımın hareket hızı arttıkça iş parçası yüzeyinden uzaklaşma eğilimi gösterirler. Helezoni tip omzun içbükey omzun yerini alması, takımın yukarı kalkmasını azaltır ve kaynak hızını artırır. Ayrıca, omuzu yeterli temasta tutmak için hem normal hem de enine yönde yük uygulamak gerekir; ancak dışbükey takım iş parçasına normal olduğundan normal kuvvetler içbükey omuz takımlarından daha düşüktür [56].

Helezoni tip omuzlu takımlar da, omzun sadece 0.1 ila 0.25 mm lik kısmı levhaya temas eder. Bu değerden fazla kısmın levhalara teması, önemli miktarda kaynak yapılırken parlamaya sebep olacaktır. Eğer takım çok yüksekse (yetersiz temas) omuz kaynak birleşim çizgisi boyunca leke görünümü oluşturacak ve kaynak kalitesinin belirlenmesini zorlaştıracaktır. Bu sebeple, kıvrılmış tip omuz kullanımında, konkav omuzdan daha fazla konumsal özen göstermek gerekir.



Şekil 4.12: Omuz helezoni (kıvrık) tip takım [56].

4.5 Sürtünme Karıştırma Kaynağında Isı Üretimi

Sürtünme karıştırma kaynağında ısı, metalin deformasyonu sırasında sürtünme ve plastik dağılım kombinasyonu tarafından üretilir. Isı üretimi daha büyük yüzey alanı nedeni ile ağırlıklı olarak omzun altında gerçekleşir. Baskın ısı oluşum mekanizması kaynak parametreleri, kaynak yapılacak parçaların ısıl iletkenlikleri, pim, altlık desteği, ve kaynak takım geometrisinden etkilenir. Genel ilkeler sıcak kaynakların yüksek devir sayısı ile ve düşük hareket hızıyla ampirik (deneysel) olarak korelasyonunu sağlayan kaynak parametrelerinin seçimi için geçerli olduğu, düşük devirde ve yüksek hareket hızlarında ise daha soğuk kaynaklar elde edildiği üzeredir. Pim etrafındaki sıcaklık, asimetriktir ve SKK'nın alüminyum alaşımlarındaki geri çekilme tarafında (retracting side) biraz daha yüksek sıcaklıklar bildirilmiştir. Bu, ısıdan etkilenen bölgede (ITAB) ağırlıklı olarak SKK'nın geri çekilme üzerinde meydana gelen çekme testi başarısızlıklarıyla bağlantılıdır. Daha

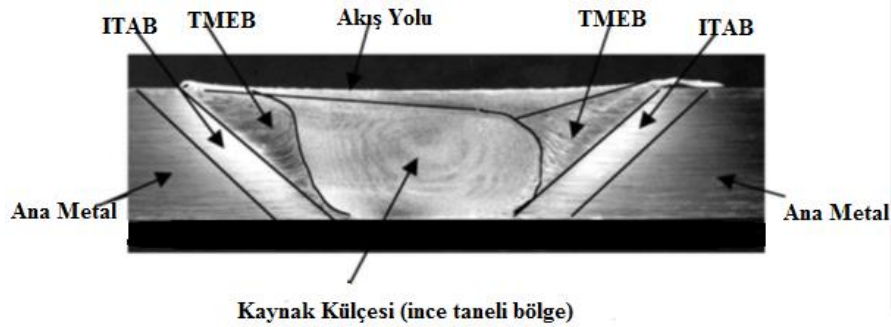
yüksek dönme hızlarında (> 15.000 dev / dak) kaynaklarda aşırı ısınmayı önlemek için, dönmeyen bir omuz ile başarılı kaynaklar yapılmıştır [58].

Bu alanda yapılan ilk çalışmalar, ısı üretiminin büyük kısmının omuz / iş parçası ara yüzünde gerçekleştiğini göstermiştir. Isınma mekanizması, iki yüzey arasındaki temas koşullarına bağlı olarak ya sürtünme ya da plastik dağılımdan kaynaklanmaktadır. Hem pim hem de omzun geometrik özellikleri, iki yüzeyin kayması, yapışması veya iki yöntem arasında dönüşümlü olmasını etkiler. Yeni analitik çalışmalar, pim ile kaynaklanacak levhalar arasında oluşan ısının önemsiz olmadığını ve ısı alanını tanımlamak için gerekli olduğunu göstermiştir.

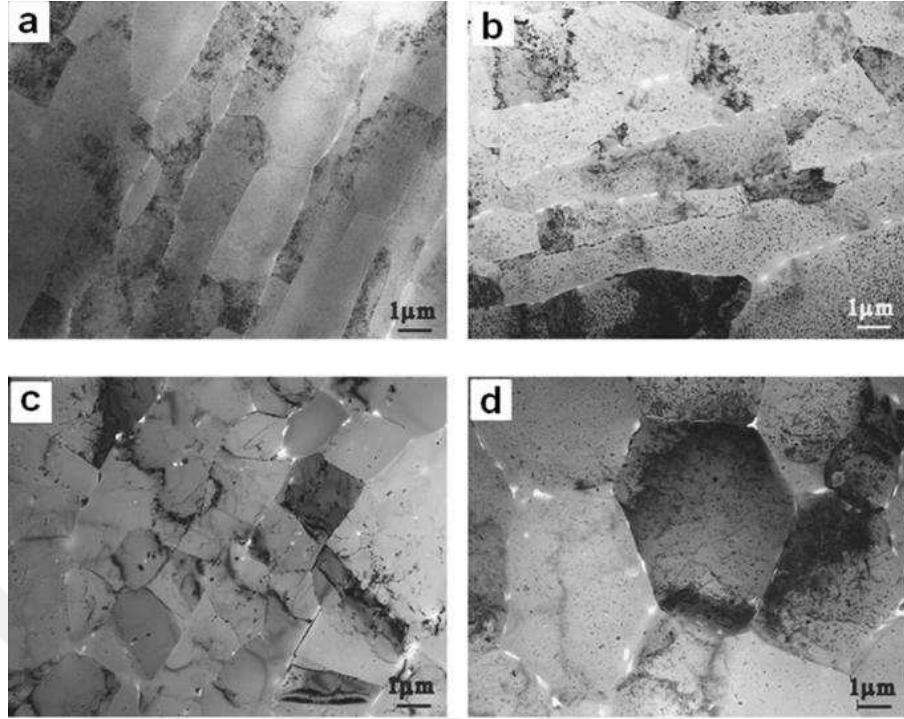
Pim ile iş parçası arasındaki ısı oluşum mekanizmaları; arayüzde kayma veya yapışma koşullarının geçerli olup olmadığına bağlı olarak sürtünme veya plastik dağılımdan kaynaklanmaktadır. Pim etrafında deformasyonel ısıtmadan gelen ısı girişi miktarının % 2 ila % 20 arasında değiştiği tahmin edilmektedir [59].

4.6 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Sonucu Oluşan Bölgeler

SKK'nın asimetric (her yerde benzer olmayan) mikro yapısı yüksek karakteristik (kendine özgü) mikro yapı ile sonuçlanır ve her bölgede farklı mikro yapıya sahiptir. Mikro yapı; alaşım bileşimine, başlangıç malzeme sıcaklığına, kaynak parametresine, takım geometrisine ve soğutma hızına bağlıdır. SKK'lı kaynak bölgesinde 4 farklı mikro yapı bölgesi oluşmaktadır. Bunlar, ısıdan etkilenmeyen bölge (ana metal), ısı tesiri altındaki bölge (ITAB), termo-mekanik olarak etkilenmiş bölge (TMEB) ve karıştırma bölgesidir (KB) [60].



Şekil 4.13: Sürtünme karıştırma kaynağı sonucu oluşan mikro yapılar.



Şekil 4.14: Sürtünme karıştırma kaynaklı 7050-T651 alüminyum alaşımı tane yapısı değişiklikleri. **a)** Ana malzeme **b)** Isı tesiri altındaki bölge **c)** Termo-mekanik olarak etkilenen bölge **d)** Kaynak külçesi [61].

4.6.1 Isıdan Etkilenmeyen Bölge (Ana Metal)

Baz, yani ana malzeme olup bu bölgenin mikro yapısında herhangi bir değişim olmamaktadır. Yani bu bölgede plastik deformasyon söz konusu değildir.

4.6.2 Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)

Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB), tüm kaynak işlemleri için ortaktır. Bu bölge bir ısıl çevrim geçirir ancak herhangi bir plastik deformasyona uğramaz. Sıcaklıklar termo-mekanik olarak etkilenen bölgeden daha düşük olmasına rağmen mikro yapı termik olarak dengede değilse hala önemli bir etkiye sahip olabilir.

4.6.3 Termo-Mekanik Olarak Etkilenmiş Bölge (TMEB)

Termo-mekanik olarak etkilenen bölge, SKK sırasında hem sıcaklık değişimi hem de deformasyon yaşar. Ana metalin uzamış taneleri, kaynak külçesi bölgesi etrafında yukarı doğru akan bir biçimde deforme olmuştur. Termo-mekanik olarak etkilenen bölge plastik deformasyona uğrar; ancak deformasyon gerginliği yetersiz olduğu için bu bölgede yeniden kristalleşme meydana gelmez [62].

4.6.4 Karıştırma Bölgesi (KB)

Kaynak bölgesinin orta kısmında yer alan, birleşme yerinin diğer mikro yapı bölgelerinden oldukça iyi mekanik özelliklere sahip bir mikro yapı sergileyen bölgedir. Tane boyutu üst tarafta artma eğilimi gösterir ve birleşme çizgisinin her iki tarafında azalma eğilimi gösterir. Bunun nedeni sıcaklığın farklılığından kaynaklanmaktadır. Kaynak külçe bölgesi, küçük, dengeli taneler ve zayıf bir tane şekli yapısıyla nispeten homojen bir mikro yapı ile karakterizedir. Deformasyon haritası, bu bölgenin neredeyse tamamen yeniden kristalleştiğini ve intragranüler (tanecik içi) deformasyonun az olduğunu ya da hiç olmadığını göstermektedir. Kaynak külçesi bölgesinde doku güçsüzdür ve baskın bir küp dokusu ile her iki taraftaki TMEB' den farklıdır [62].

4.7 Sürtünme Karıştırma Kaynağına Etki Eden Faktörler

Süreç değişkenlerinin sürtünmeli karıştırma kaynağı prosesine etkisi genel prensipleri diğer kaynak prosesleriyle çok fazla ortak olmasına rağmen ayrıntılar tamamen beklendiği gibi farklıdır. Bu değişkenlerin hepsi kaynak işleminin sonucunu belirlemek için hareket eder. Proses değişkenlerinin etkisinin incelenmesindeki ana ilgi, sürecin üretkenliği, performansı en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan statik mekanik özellikler, yorulma mukavemeti, korozyon özellikleri, stres korozyona direnç, tokluk ve tekrarlanabilirlik gibi prosesin ortak özelliklere etkisinin anlaşılmasına dayanmaktadır.

Takım ilerleme hızı, takım dönüş hızı, takım düşey basıncı, takımın eğim açısı, takım uç profili, levhalar arasındaki yüzey farklılıkları, pimin batma derinliği başlıca SKK sürecini kontrol etmek için kullanılan bağımsız değişkenlerdir. Bu değişkenler kaynak kalitesini etkilemektedir.

4.7.1 Pim İlerleme Hızı, İş Mili Devir Sayısı ve Pim Batma Derinliği

Pim ilerleme hızı ve iş mili devir sayısı parametre değişkeni olarak sürtünme karıştırma kaynak performansını etkileyen önemli iki parametredir. Bunun yanında pim batma derinliği de kaynak kalitesini etkiler.

İlerleme ve devir sayısı arttığında kaynak yapılan bölgede sertlik düşüşü azalmaktadır. Çünkü ilerleme hızının yüksek olması kaynaktaki soğuma hızının hızlı olması ile mukavemet arttırıcı partiküller (parçacık) kısmen tekrar çökelmektedir. Eğer ilerleme hızı düşük seçilirse bu sefer kaynak bölgesindeki soğuma hızı düşmekte ve kaynak bölgesinin sertliği azalmaktadır. Böyle durumlarda kaynak dikişinin sertliği ısı tesiri altındaki bölgeden (ITAB) az yüksektir.

İlerleme hızı, levha kalınlığına ve alaşım cinsine göre farklılık gösterir. Örnek olarak; 5 mm kalınlığındaki 6082-T6 Al alaşımının sürtünmeli karıştırma kaynağında, 800 dev/dakikada kaynak hızı 610 mm/dakika, 30 mm kalınlığında bir Al levhanın tam nüfuziyeti kaynağında ise ilerleme hızı tahmini olarak 180 mm/dakikaya düşer.

SKK' da kaynak takımının devir sayısı ve takım omuz çapı ısı girişini etkileyen en önemli parametrelerdir. Omuz çapının artışı ile sürtünme yüzeyi artacak ve buna bağlı olarak da ısı miktarı artacaktır. İlerleme hızı da birim alana düşen miktarı etkiler. İlerleme hızının artışı birim alana düşen ısı miktarını azaltır. SKK' da kaynak ilerleme hızının artışı ısı girişini azalttığından artan kaynak ilerleme hızı ile kaynak yapılan metal levhanın sertliği de değişir. Sertlik miktarının değişimi fazla değildir ve karıştırma işlemi yapan ucun karıştırdığı karışım bölgesindeki sertlik daha az, kaynak merkezinden ana metal tarafına doğru ise sertliğin daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır [63].

Pim batma derinliğinin ise iyi ayarlanması gerekir. Pim ucu kaynak yapılacak levhaların sabitlendiği altlık desteğine yakın geçmelidir. Pim ucu ile altlık desteğinin arasında 0,1-0,3 mm fark kalıncaya kadar pim batırılmalıdır. Eğer bu değer daha büyük olursa kaynak kök kısmı elde edilemez ve kaynak hatalı yapılmış olur. Bu nedenle pim batma derinliği de SKK' da önemli bir parametredir.

4.7.2 Pim ve Omuz Profili

Takım geometrisi, malzeme akışında kritik bir rol oynar. Bir SKK takımı pim ve omuzdan oluşur.

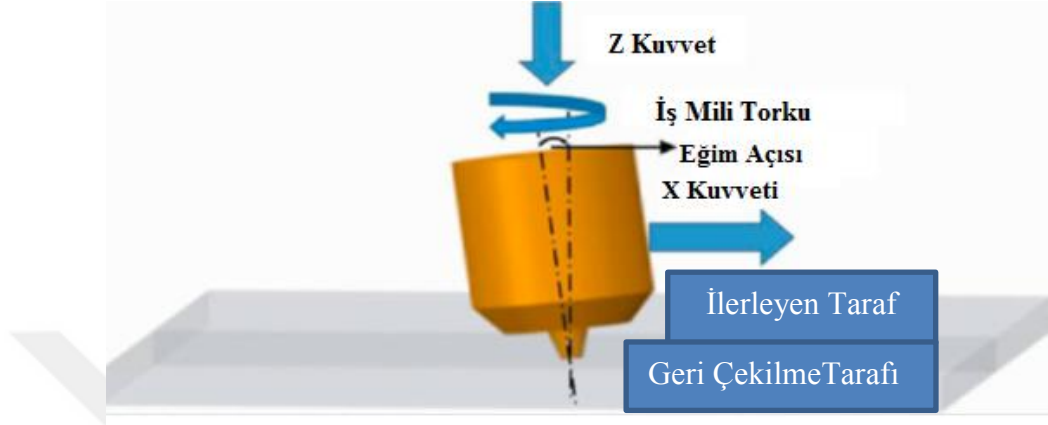
Takım piminin işlevi, yüksek derecede plastikleştirilen malzemeyi pimin önünden arkaya doğru hareket ettirmek ve aynı zamanda dikey yönde de hareket ettirmektir. Plastikleştirilen malzemenin sonraki hareketi, takım pimindeki dişlerin veya benzer özellikteki profillerin yardımı ile gerçekleştirilir. Pim aynı zamanda kaynak birleşme çizgisindeki oksitlerin ve yabancı maddelerin dağılmasını sağlar. Kaynak yapılan levhanın kalınlığı arttıkça, omuzdan gelen ısı girişinin pimden gelen ısı girişine oranı azalır.

Takım omzunun işlevi, kaynak yapılacak malzemenin yüzeyi üzerinde büyük bir sıkıştırma kuvveti ve takım dönüşü uygulayarak ve altındaki yumuşatılmış plastik metalde içererek ısı sağlamaktır. Basma gerilmesi birleştirilmiş metaldeki boşlukların ve gözeneklerin oluşumunu en aza indirir. İnce sacların kaynaklanması durumunda, hemen hemen tüm sürtünme ısısı, takım omzuyla kaynak yapılan sac parçası arasındaki sürtünmeden sağlanır [64,65].

4.7.3 Takım Eğim Açısı

Takım eğim açısı, sürtünme karıştırma kaynağı sırasında kaynak kalitesini belirleyen temel işlem parametrelerinden biridir. Takım-iş parçası arabiriminde üretilen tork ve farklı kuvvetler (Z kuvveti, X kuvveti), eğim açılarının etkisini değerlendirmek için deneysel olarak ölçülür ve analiz edilir. SKK ile ilişkili tork ve kuvvetlerin, eğim açısı arttıkça arttığı gözlenmiştir. Yapılan çalışmalarda konik dişli

takım tarafından elde edilen tork ve dikey kuvvet (Z kuvvet), konik takımınkinden daha yüksek olup, konik dişli takım için kaynak kuvveti (X kuvvet) konik takımla karşılaştırıldığında daha az olduğu bulunmuştur. Takım açısının, kaynak külçesi bölgesinde karmaşık ve yoğun karıştırma etkisi vardır. (Abhijit Banik ve ark.)



Şekil 4.15: İş mili torkunun şematik gösterimi ve SKK işlemi için farklı kuvvetler.

Chen ve ark. araştırmalarında takım eğme açısının ısı oluşumunu etkilediği ve kusursuz kaynakların kaynak külçesi bölgesinde yoğun bir şekilde karıştırma etkisi gösterebileceğini bulmuşlardır. Z.barlas ve diğ. deneysel olarak, 2 ° eğimin kusursuz kaynak üretebildiğini göstermişlerdir.

4.8 Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kusurlar

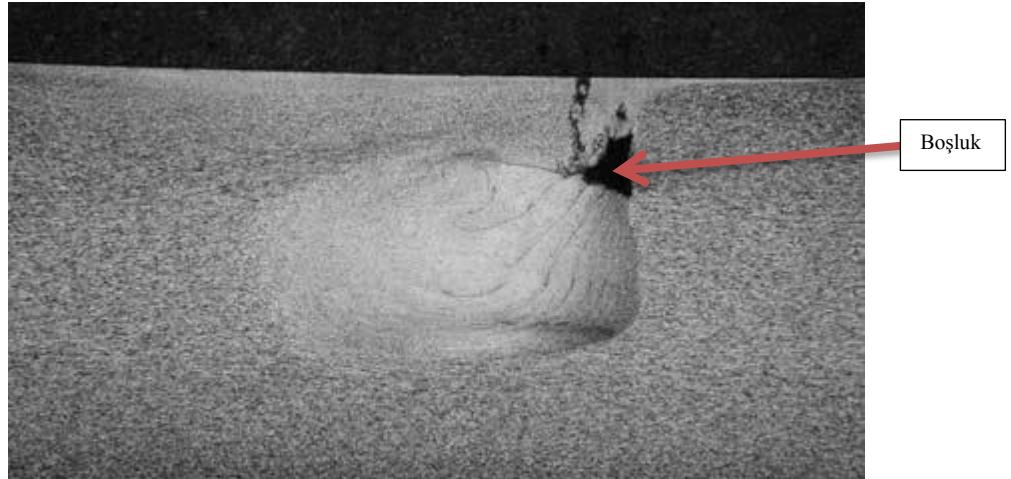
SKK işleminin hızlı gelişimi ve uygulanmasında uygun olmayan kaynak parametreleri veya teknolojik koşullar kullanıldığında SKK sırasında kaynak kusurlarının oluşabileceği ve bu yarık, kavite (boşluk), alın altına birleştirmenin mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Eğer kullanılan kaynak parametreleri uygunsa kaynak sırasında genelde herhangi bir kusur oluşmaz [66].

Sürtünmeli karıştırma kaynaklarının kalitesini etkileyen birkaç farklı işlem değişkeni (örneğin; takım tasarımı, takım dönüş hızı ve takım ilerleme hareket hızı, takım omuz dalma derinliği, takım eğim açısı, kaynak aralığı ve kalınlık uyumsuzluğu) bu yönteme etki ederken, takım tasarımı ve işlevsellik kusurları etkiler.

Aşağıda SKK sırasında oluşan kaynak kusurları ve nedenleri açıklanmıştır.

4.8.1 Boşluklar

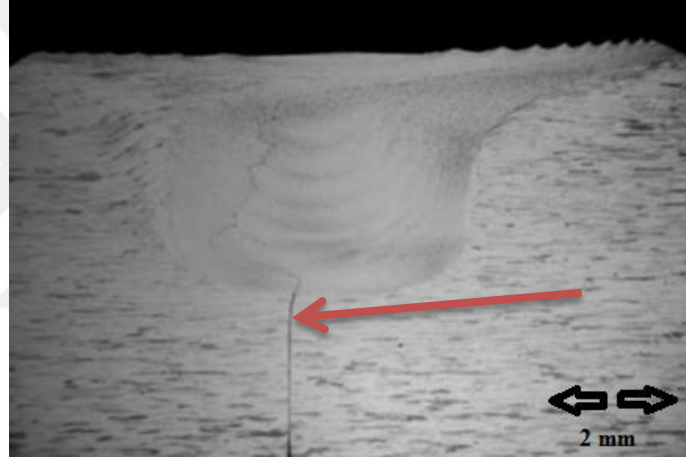
Boşluklar genellikle kaynağın ilerleyen (Advancing Side) tarafında bulunur ve sürtünmeli karıştırma kaynak yüzeyine geçebilirler veya kopmayabilirler. Belli bir takım tasarımı için boşluk oluşumu; yetersiz baskı kuvveti, çok yüksek kaynak hızı ve kaynaklanacak levhaların sıkıştırılmasından (çok büyük birleşim boşluğu) kaynaklanmaktadır. Sürtünmeli karıştırma takımı tarafından deforme edilen malzeme, bir uçtan bir uca hareket eden pim tarafından üretilen boşluğu doldurabilmelidir. Takım tasarımı yanlışsa (yani, pim çapı seçilen parametreler için çok büyükse) veya ilerleme hızı çok hızlıysa, malzeme, takımın hemen arkasındaki bölgeyi tamamen doldurabilmesinden önce soğumaya başlar. Buna ek olarak, omzun, takımın etrafında malzeme akışına izin vermesi için yeterli ısı üretimi uygulamak gerekir. Eğer yetersiz ısı üretilirse (yetersiz baskı kuvveti veya yanlış omuz çapı seçimi), malzeme düzgün akmayacak ve boşluklar oluşacaktır [67].



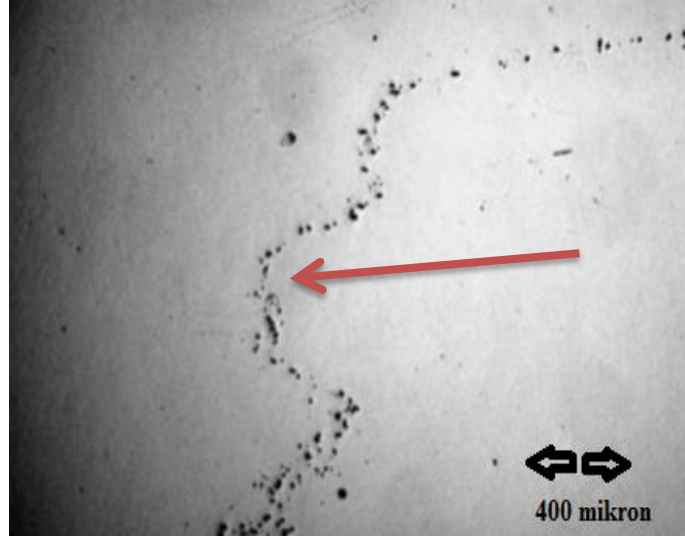
Şekil 4.16: Sürtünme karıştırma kaynağında boşluk kusurunu gösteren makrograf (kaba dağlama yapılmış) [56].

4.8.2 Birleşme Çizgisi Kalıntısı

Bir birleşme hat kalıntı kusuru (alın altına yapışma, hapsolmuş oksit kusuru), kaynak külçesi boyunca yarı sürekli bir oksit katmanından kaynaklanmaktadır. Yarı sürekli oksit tabakası, başlangıçta birleştirilecek plakaların birleşme yüzeyleri üzerinde sürekli bir oksit tabakası oluştururlar. Birleşme hat kalıntıları, kaynak hattından kaynaklanan hatalı takım konumu, çok hızlı kaynak hızı veya çok fazla takım omuz çapından dolayı, kaynak yapılmadan önce kaynaklanacak levhaların yetersiz temizlenmesi veya kontak yüzeyi ara yüzünde deformasyonun yetersiz olması nedeniyle oluşmaktadır [67].



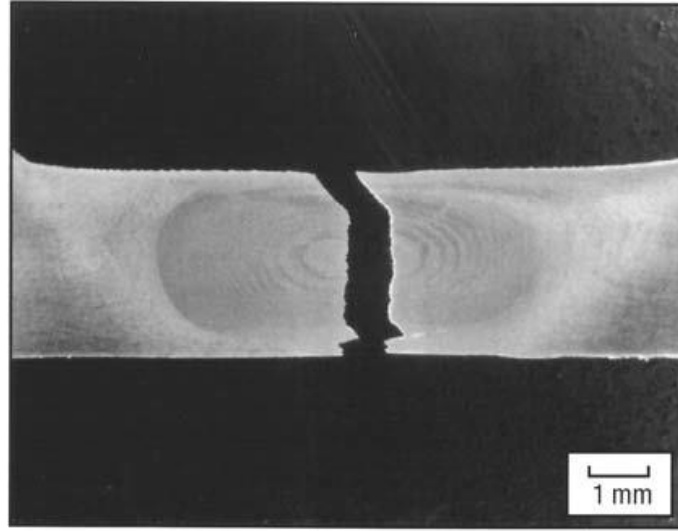
Şekil 4.17: Sürtünme karıştırma kaynağında birleşme hattı çizgisi kalıntı kusuru (kaba dağlama yapılmış) [56].



Şekil 4.18: Birleşme hattı çizgi kalıntısına neden olan oksit artıklarının büyütülmüş hali [56].

4.8.3 Eksik Kaynak Nüfuzu

Eksik kaynak nüfuzu için, yanlış takım tasarımı, takımın birleşme ara yüzüne göre kötü hizalanması ve kaynak yapılacak levha kalınlığındaki bölgesel değişiklikler dahil çeşitli nedenler vardır. Takım tasarımında SKK pimi destek altlığından çok uzak olduğunda eksik kaynak nüfuziyeti oluşur. Bu nedenle takımın alt kısmı ile levhanın alt yüzeyi arasında deforme olmayan bir bölge vardır. Bu durumda levhalar eğilme gerilmesine maruz bırakıldığında, sürtünme karıştırma kaynağı eksik nüfuz hattı boyunca başarısız olur. Eksik kaynak nüfuziyet durumunu ortadan kaldırmak için yeterli bir deformasyon derinliği gereklidir. Bu da pimin altlık desteğine yakın geçmesi ile sağlanır.



Şekil 4.19: Eksik nüfuziyet sonucu belirlenen kırılma yolu [56].

4.9 Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulama Alanları

Nispeten soğuk bir teknoloji olan SKK, erimiş metalin füzyon sırasında katılaşması sonucunda oluşan kaynak kusurları gibi füzyon kaynaklarının kötü etkilerini ortadan kaldırır. SKK zaten endüstriyel ölçekte ticari alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirmeleri için uygulanmıştır. Rapor edilen çalışmalardan SKK, Mg alaşımlarının ticari olarak birleştirilmesi için çok uygun görünmektedir. Ayrıca, uygun takım malzemesi, geometri ve işlem parametrelerinin seçimi ile SKK, Fe, Ti, Ni ve Cu bazlı alaşımlar gibi diğer yüksek mukavemetli ve yüksek erime noktalı alaşımlar için teknolojik olarak geleceği uygundur. Bu alaşımlara uygulamaya yönelik gelişmeler de hızla ilerlemekte ve laboratuvar ortamından giderek uygulamaya doğru gelişmektedir. Ayrıca, benzer olmayan materyallerin, metal matris kompozitlerinin, seramiklerin, polimerlerin ve en son olarak ahşap plastikler arasındaki etkili birleştirme için SKK incelenmektedir.

SKK ile yapılan çalışmalardan örnek verilecek olursa;

İnsanla AY'a iniş projesinin derinlemesine araştırılması ve uygulanması daha gelişmiş havacılık teknolojisi gerektirmektedir. Yeni nesil ağır fırlatma aracının tank malzemesi, alüminyum lityum alaşımından ve en büyük model olan LM-5'in 2 misli

ve 10 m çapında tasarlandı. Ağır modelin çekirdeği olan depo, yarıçap kalınlık oranı 1000:1 olan aşırı büyük, süper ağır yük taşıyan ve aşırı düşük sıcaklığa (-183 °C veya -253 °C) dayanan özelliklere sahip bir yapıdadır. Bu nedenle, tank yapısının mekanik performansı üzerindeki tekdüzelik ve güvenilirlik isteği artmaktadır. Tank imalatı konvansiyonel teknolojilerin yerini alması nedeniyle SKK, yeni model lansman aracının araştırılması ve üretilmesi konusunda güçlü bir destek görmektedir. Yüksek doğruluk ve kaliteli üretim sağlamak için, SKK nın değişken teknikleri ağır modelin özellikleri ve teknik gereksinimleri ile ilgili olarak geliştirilmekte ve uygulanmaktadır.

On yıldan uzun süren derin araştırmalarla SKK, roket tankının kritik teknolojileri ele alınarak ve tank bölümü, kubbe ve gövde üzerindeki mühendislik uygulamaları gerçekleştirilmiştir. SKK geleneksel füzyon kaynağıyla karşılaştırıldığında, havacılık uygulamasındaki yüksek kaynak kalitesi ve geometrik doğruluk ile avantaj sağlar.

SKK uygulamaları olan diğer endüstriler arasında ekstrüzyon alüminyum panellerden yapılmış vagon gövdeleri, otomotiv de hafif alaşım jantlar ve yakıt tankları, Boeing'deki Delta II ve IV uzay lansman araçlarının AA 2014 alüminyum alaşımı yakıt tankları gibi havacılık uygulamaları yer alır. Boeing Şirketi, SKK'ya özgü Delta II ve IV tasarımlarının % 60 tasarruf sağladığını ve üretim süresinin 23 günden 6 güne düştüğünü bildirmiştir.

5. DENEYSEL METOD VE YÖNTEM

Bu çalışmada AZ31 B-H24 alaşımının sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliği araştırılmıştır. Magnezyum AZ31 B-H24 levhalar 150x100 mm boyutlarında giyotin makas ile kesilmiş ve CNC freze tezgâhında kaynaklanmıştır.

SKK takımı olarak, kaynak sırasında levhalar ile temas halinde oluşan yüksek sıcaklığa dayanıklı, Şekil 5.1 de gösterilen ölçülerden imal edilmiş, 1.3343 tip yüksek hız çeliği takım kullanılmıştır. Üretimi yapılan karıştırıcı uca ısıtma işlemi uygulanarak 62 HRC sertlik kazandırılmıştır. SKK sonrasında kaynaklı parçaların çekme dayanımı ve kaynak kesitinin farklı bölgelerinden alınan mikro yapıları incelenerek, bu bölgelerde mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır.

Haddeme yöntemi ile üretilmiş ve kalınlığı 3,2 mm olan AZ31B-H24 magnezyum alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 5.1 de verilmiş olup, sertliği 76 HV, max. çekme mukavemet değeri 258 MPa, uzama yüzdesi % 15' ve akma dayanımı 174 MPa' dır.

Tablo 5.1: Magnezyum AZ31B-H24 alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlık).

Al	Mn	Zn	Si	Cu	Ni	Fe	Mg	Temper
3.2	0.42	1.03	0.0190	0.0008	0.0006	0.0020	Kalan	H24

5.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takım

Çalışmada kullanılan SKK pim tipi DIN 1.3343 yüksek hız çeliğinden üretilmiş silindirik profile sahiptir ve kaynak takım ölçüleri Şekil 5.1 de ve özellikleri Tablo 5.2 ve Tablo 5.3 de verilmiştir. Takım yekpare olup iki taraflı omuz ve pim profiline sahiptir. Bir tarafı 5 mm pim çapı, 15 mm omuz çapı, diğer tarafı 5 mm pim

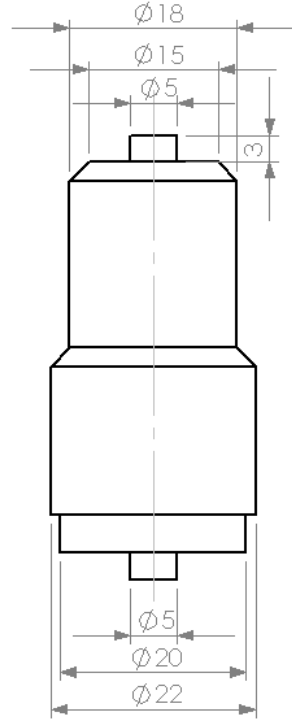
çapı, 20 mm omuz çapında silindirik pim profiline sahiptir. SKK da kullanılan 1.3343 yüksek hız çeliğinin özelliği, genel kullanım amaçlı, yüksek aşınma ve kırılma direncine sahip, sertlik ve tokluk bakımından kıyaslandığında soğuk iş çeliklerinden daha üstün olup bunun sonucunda performans olarak daha yüksektir.

Tablo 5.2: Yüksek hız çeliğinin kimyasal bileşimi (% ağırlık).

C	Cr	Mo	V	W
0,9	4,1	5,0	1,9	6,4

Tablo 5.3: SKK takımı malzemesi ısı genleşme tablosu.

Fiziksel Özellikleri				
Özgül ağırlığı: 20 °C'de 8,10 kg/dm ³				
Isıl iletkenliği: 20 °C'de 19,0 W/(m.K)				
Isıl genleşme: 20 °C'den °C'ye kadar, 10 ⁻⁶ m/(mK)				
100 C°	200 C°	300 C°	400 C°	500 C°
11,5	11,7	12,2	12,4	12,7
Isıl İşlemi:				
Yumuşatma tavlama: 770 - 840 °C				
Tavlama sonrası sertlik: En fazla 280 HB				
Gerilim giderme tavlama: 600 - 650 °C				
Sıcak şekil verme: 1100 - 900 °C				
Sertleştirme: 1190 - 1230 °C				
Sertleştirme ortamı: Yağ, Sıcak banyo, Vakum (500 - 550 °C)				
Menevişleme: 540 - 570 °C				
Menevişleme sonrası sertlik: 64 - 66 HRC				



Şekil 5.1: Deneyleerde kullanılan pim tipi ve karıştırıcı boyut ölçüleri.

5.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takım Tezgahı

SKK işlemleri için Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi bünyesinde bulunan LER VQ-75 marka CNC freze kullanılmıştır. CNC freze Şekil 5.2 de ve teknik özellikleri Tablo 5.4 de görüldüğü gibidir.



Şekil 5.2: SKK kaynağında kullanılan CNC freze (LER VQ-75).

Tablo 5.4: CNC dik işlem merkezinin özellikleri (LER VQ-75).

Tabla Ölçüleri	Tabla Çalışma Ölçüleri (mmxmm)	980x380
	T kanal sayısı ve genişliği (mm)	18x125x5
	Tablaya Bağlanabilecek maksimum parça ağırlığı	Kg 1000
Tabla Hareketleri	Boyuna Hareket (X eksen) (mm)	850
	Enine Hareket (Y eksen) (mm)	380
	Dikey Hareket (Z eksen) (mm)	500
İş Mili	İş Mili Koniği	BT 40
	İş Mili Devir Aralığı (d/dak)	50 - 11000
	İş Mili Tahrik Tipi	Direct Motor

Tablo 5.4 ün devamı

Hassasiyetler	Tekrarlama Hassasiyeti (mm)	± 0.005
	Pozisyonlama Hassasiyeti (mm)	± 0.003
Motorlar	İş Mili Motor Gücü	Kw 20
	X/Y/Z Eksen Motorları	Kw 3/3/3.5
	Su Motoru	Kw 1,6
Hızlar	Boşta Hareket Hızları (X/Y/Z) (m/dak)	36/36/30
	Kesme Hızı (mm/dak)	7000
Magazin	Magazin Tipi	ATC
	Takım Sayısı	14
	Takımdan Takıma Değiştirme Zamanı (Sn)	3
	Takım Dönüş Yönü	Her iki yöne
	Max. Takım Çapı (mm)	125
	Max. Takım Boyu (mm)	300
	Max. Takım Ağırlığı (kg)	6

SKK kaynağı yapılacak levhalar, CNC dik işlem merkezine iş bağlama kalıbı ile Şekil 5.3 de görüldüğü gibi alın yüzeyleri birbirine temas edecek şekilde bağlanmıştır.



Şekil 5.3: Levhaların bağlama kalıbı ile tezgâha sabitlenmesi.

5.3 Sürtünme Karıştırma Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi

Parametrelerin belirlenmesinde öncelikli olarak literatür araştırması yapılmış olup, daha sonra yapılan ön denemeler sonucunda kaynak parametreleri Tablo 5.5 de verildiği gibi belirlenmiştir. Bu parametreler belirlenirken levhalara herhangi bir işlem (kaynak ağzı açma, oksit giderme işlemi gibi) uygulanmamıştır. Giyotin makas ile kesilen taraftaki pürüzlü yüzeylerin SKK işlemi sırasında temas edecek olan levhaların alın yüzeylerinin lineer (doğrusal) olması ve kaynak işlemi sonucunda boşluk oluşmaması için frezeleme işlemi yapılmıştır.

Deney değişkenleri belirlendikten sonra “Taguchi Metodu” yaklaşımı ile deney tasarımı oluşturularak, belirlenen parametreler arasında “en yüksek-en iyi” deney yaklaşımı ile çekme dayanımına sahip kaynaklı levhalar elde edilmeye çalışılmıştır. Taguchi Metodu, farklı parametrelerin, farklı seviyeleri arasından en iyi kombinasyonu saptamak için kullanılmıştır.

Kontrol parametreleri olarak, takım omuz çapı, tezgâh devir sayısı, ve tabla ilerleme hızı alınmıştır. Bu yöntemin kullanılmasının nedeni, parametre sayısının

artması ile birlikte sonuçların daha sağlıklı değerlendirilmesi ve daha kısa sürede deneylerin gerçekleştirilmesidir.

Çekme dayanımına etkisi araştırılan bu kontrol parametrelerinden takım omuz çapı, tezgâh devir sayısı 2 seviyeli olup, tabla ilerleme hızı 4 seviyelidir. Tablo 5.5 de çalışma için kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri gösterilmektedir.

Tablo 5.5: Kontrol faktörleri ve seviyeleri.

Seviyeler Faktörler	1.Seviye	2.Seviye	3.Seviye	4.Seviye
Takım Omuz Çapı (mm)	15	20		
Tezgah Devir Sayısı (dev/dak)	1000	1400		
Tabla İlerleme Hızı (mm/dak)	15	25	40	50

Tablo 5.5 de gösterilen faktörler ve seviyeleri Taguchi metodunda L8 ortogonal deney tasarım matrisine karşılık gelmektedir. Tablo 5.6 de Taguchi L8 ortogonal deney tasarım matrisi gösterilmektedir. Deney tasarımı yapılmıyadı normalde 2(seviye)x2(seviye)x4(seviye) = 16 adet deney yapmak gerekmektedir.

Tablo 5.6: Taguchi L8 ortogonal deney tasarımı matrisi.

Deney No	Tabla İlerleme Hızı (mm/dak)	Takım Omuz Çapı (mm)	İş Mili Devir Sayısı (dev/dak)
1	25	15	1000
2	40	15	1400
3	50	15	1400
4	40	20	1000
5	50	20	1000
6	15	15	1000
7	25	20	1400
8	15	20	1400

Taguchi Design
 Taguchi Orthogonal Array Design
 L8 (4**1 2**2)
 Factors: 3
 Runs: 8
 Columns of L8 (4**1 2**4) Array
 1 2 3

5.4 Sürtünme Karıştırma Kaynağının Yapılışı

Yapılan çalışmada, SKK uygulaması için CNC dik işlem merkezi kullanılmıştır. Kaynak yapılacak magnezyum levhaların tezgâha sabitlenmesi işlemi için özel olarak tasarlanmış iş bağlama kalıbından yararlanılmıştır. Yapılan SKK, malzemenin haddeleme yönüne dik olarak gerçekleştirilmiştir. Yeterli ısının sağlanabilmesi için omuz çapı ile orantılı olarak kaynak başlangıcında bekleme süresi uygulanmıştır. Literatüre uygun olarak omuz çapı pim uzunluğundan 0.1 mm fazla malzemeye batırılmıştır.

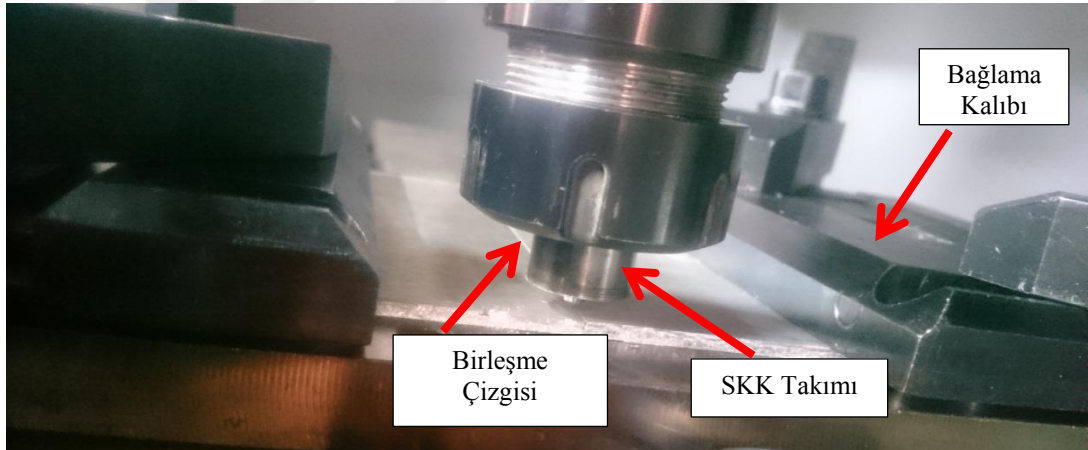


Şekil 5.4: SKK kaynağının yapılışı.

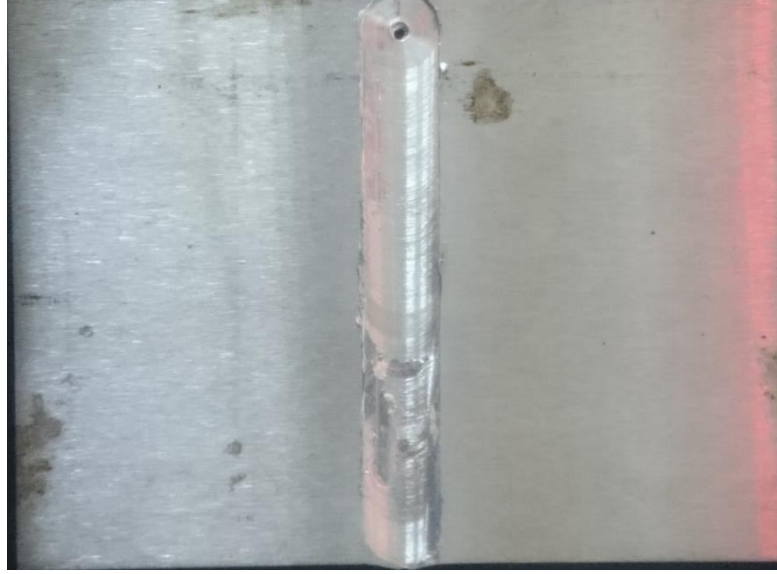
Levhaların alın yüzeyleri, yani kaynak yolunun geçtiği yüzeylerin birbiri ile temas etmesi için Şekil 5.4 te gösterildiği gibi bağlama kalıbının yan yüzeylerinden sıkma işlemi yapılmıştır. Levha üst yüzeylerinin de kaynak esnasında kaymaması için levha üst yüzeyleri de iş bağlama pabuçları ile üstten sıkılarak baskı uygulanmıştır. SKK için belirlenen parametreler daha öncede belirtildiği gibi yapılan ön çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. Pim ucunun kaynak edilecek levhaların birleşme çizgisinden geçmesi için bağlama kalıbı referans alınarak levhaların birleşme çizgisi ortalanacak şekilde bulunmuştur. Pimin dalma derinliğini ayarlamak için levhaların üst yüzeyi referans alınarak sıfır noktası olarak ayarlanmıştır. Böylece

levha yüzeyinden istenilen derinliğe inilmesi basit bir şekilde ayarlanır. Levhaların kök kısmının tam olarak kaynaması için pim ucu altlığa yakın bir mesafeden geçmelidir. Pim batma derinliği istenilen değere ayarlandıktan sonra takım, bulunduğu bölgede uygun bir sıcaklığa ulaşmaya kadar bekletilmiştir. Burada bilinmesi gereken önemli bir husus, pimi istenilen değerden daha fazla daldırmamaktır. Çünkü pim ucu gereğinden fazla daldırıldığında levha altlık desteğine zarar verebilir ve aynı zamanda malzeme kaybı yaşanır. Böylece levhalar yeterli sıcaklığa ulaştığında pim otomatik olarak ilerletilerek birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada silindirik profilli pim ve silindirik profil omuzlu takım kullanılmıştır. Takım omzu kaynak sırasında ilerleme sonucu levhalardan kopan malzemelerin kaynak bölgesinden ayrılmasına izin vermeyerek kaynak bölgesinde tutulmasını sağlar.



Şekil 5.5: Pimin, kaynak edilecek levhaları ortalayacak şekilde ayarlanması.



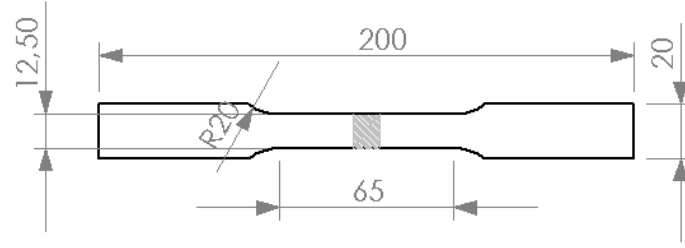
Şekil 5.6: Kaynak edilmiş parçanın görünüşü.

5.5 Kaynak Edilen Levhaların Mekanik ve Metalografik Testleri İçin Numunelerin Hazırlanması

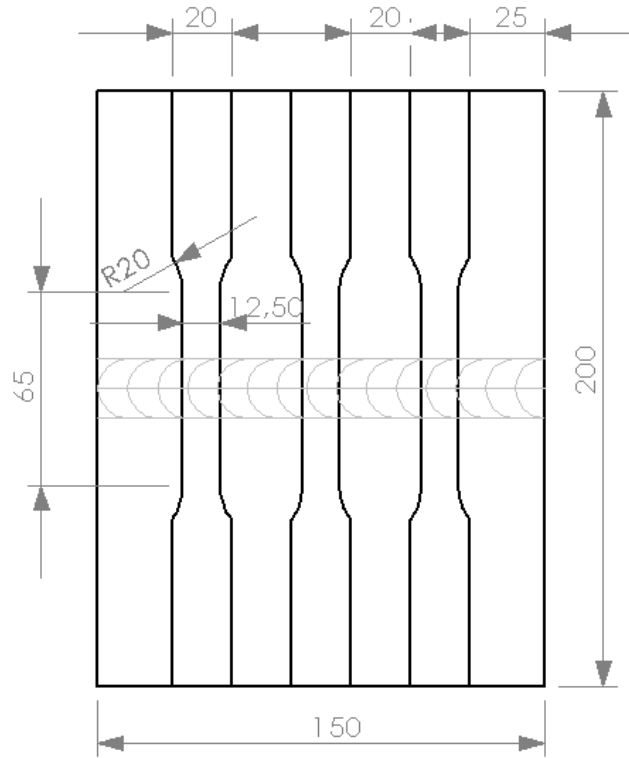
SKK işleminden sonra kaynak yapılan numuneler gözle kontrol edilmiştir. TS EN ISO 6892-1 standardına göre CNC dik işlem merkezinde, yapılan NC programına göre kaynak yapılan parça malzemesine uygun kesici takım ile çekme testi ve mikro yapı incelemeleri için otomatik olarak kesilmiştir. Kaynak yapılan numunelerin kaynak başlangıcı ve bitiminden itibaren 25 mm lik kısımları kesme işlemine dahil edilmemiştir. Bunun nedeni, kaynak başlangıcı ve bitiminde kaynak esnasında oluşabilecek kusurlu bölgelerin oluşması ihtimali sebebiyle bu bölgeler kullanılmamıştır.

5.5.1 Çekme Deneyi

Çekme testi uygulanacak numuneler TS EN ISO 6892-1 standarta göre çekme işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 5.7 de ilgili standartın çekme numunesi ölçüleri verilmiştir. Şekil 5.8 de ise kaynak edilen parçalardan test için alınan numunelerin çıkarılma yerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.7: TS EN ISO 6892-1 standartta göre test numune ölçüleri.



Şekil 5.8: TS EN ISO 6892-1 standartta göre test numunelerinin kaynaklı levhadaki yeri.

Kaynaklı numuneler Şekil 5.9 da gösterildiği gibi her kaynak parametresine bir numara verilerek sınıflandırılmıştır. Yapılan deney tasarımına göre 8 adet kaynak işlemi yapılmış ve numuneler 1 den 8 e kadar numara verilerek kodlanmıştır. Kaynak yapılan her parametreden 3 adet çekme deney numunesi alınarak çekme testi yapılmış ve ortalaması alınmıştır. İlk kaynak numunesi 1A, 1B ve 1C şeklinde kodlanarak, diğer numunelerde aynı şekilde CNC frezede numara yazılıp, kesilmiştir.



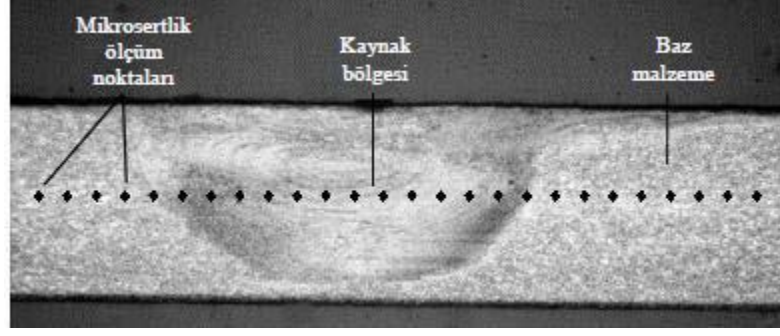
Şekil 5.9: Çekme deney numunelerinin kodlanması.

5.5.2 Mikro Yapı İncelemeleri

SKK yapılan levhaların kaynak bölgesinde meydana gelen yapı değişimi ve kaynağa etki eden parametrelerin mikroyapıdaki etkisini belirlemek amacıyla mikroyapı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple; kaynak yönüne dik olarak kaynak bölgesinde 25x10 mm boyutlarında alınan numuneler, bakalite alınarak sıra ile 180, 600, 1200 ve 2000 gridlik zımpara ile zımparalama işlemi yapılmıştır. Sonrasında ise 1 mikronluk tane boyutuna sahip alümina solisyon ile parlatılmıştır. Parlatma işlemine tabi tutulan numuneler 4,2 gr picric asit 10ml su, 70ml Etanol, 10ml asetik asit çözeltisi hazırlanarak dağlanmıştır. Optik mikroskop incelemeleri LEİCA Ters Tip Metal Mikroskobu ile yapılmıştır.

5.5.3 Mikro Sertlik Ölçümleri

Kaynak yapılan levhaların sertlik ölçümleri için Metkon MH-6 mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri için kaynak kesitinden 3.2x20 mm ölçülerinde alınan numunelerin orta ekseninde mikrosertlik ölçümleri yapılarak, bölgeler arasındaki değişimi incelenmiştir. Alınan numunelerin 3.2 mm kalınlığındaki yüzeylerine mikroyapı incelemelerinde belirtilen zımparalama, parlatma işlemi uygulanmıştır.



Şekil 5.10: Mikrosertlik ölçümlerinin yapıldığı noktaların şematik gösterimi.

Sertlik ölçümünde 0,2 kg'lık yükleme ve 10 sn süre kullanılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri kaynak doğrultusuna dik kesitin eksenine doğrultusunda 5 mm aralıklarla yapılmıştır (Şekil 5.10).

6. BULGULAR

SKK yapılmış AZ31-B H24 numunelere çıplak gözle bakıldığında herhangi bir çarpılma ve yüzey pürüzlülüğü bakımından diğer kaynak yöntemlerine göre oldukça üstün özellikte olduğu söylenebilir. Ayrıca kaynak yüzeyi herhangi bir temizleme işlemine gerek duymamaktadır. Şekil 6.1 de kaynak dikişinin farklı parametrelerdeki kaynaklı parçaların makro görüntüsü verilmektedir.

Şekil 6.1 den de görüldüğü gibi kaynak parametrelerine bağlı olarak kaynak yüzey kaliteleri değişmektedir. Düşük devir ve yüksek ilerlemeye sahip levhaların kaynağında düzgün birleştirmeler elde edilmediği görülmektedir.

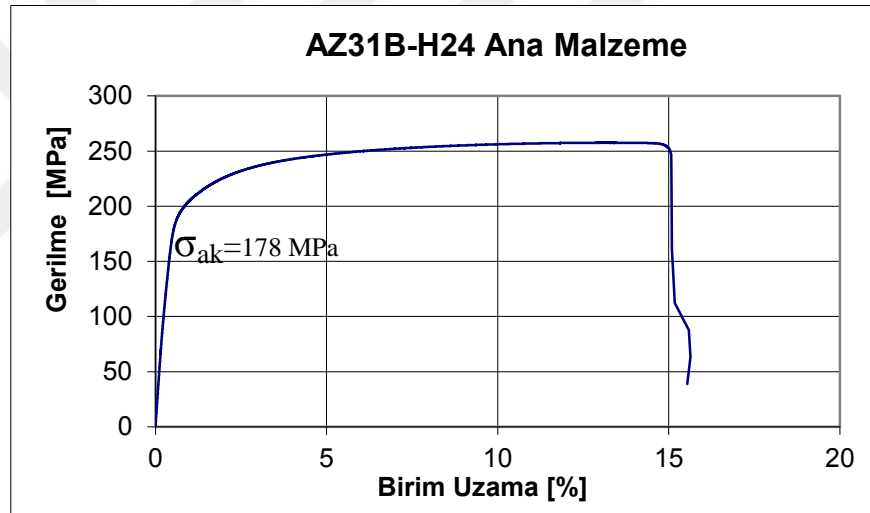
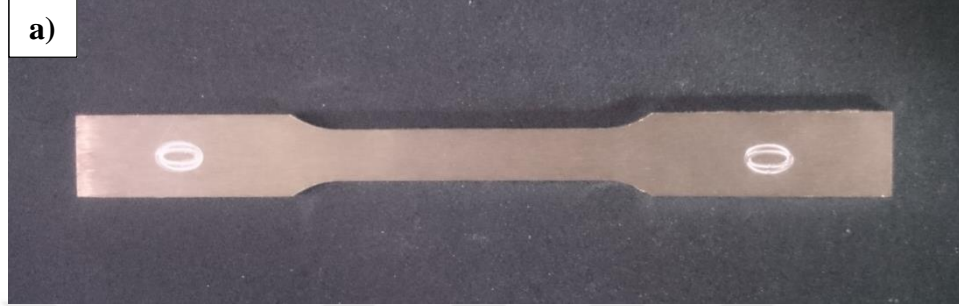


Şekil 6.1: Yapılan deneylerin parametrelere bağlı kaynak yüzey kaliteleri.

6.1 Çekme Deney Sonuçları

SKK ile birleştirilen numunelerin, ana metal malzeme ile çekme mukavemetlerinin karşılaştırılabilmesi için kaynaklı levhalardan çekme numunesi alınmıştır. AZ31B-H24 magnezyum levhaların, SKK sonrasında elde edilen çekme deney sonuçları aşağıda verilmektedir. SKK yapılmış deney numunelerinin çekme mukavemetini belirlemek için yapılan testler “Zwick / Roell” marka test cihazında, “Balıkesir Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi” nde gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri, çekme kapasitesi 10 kN ve çene hızı 2 mm/dak uygulanarak yapılmıştır.

AZ31-B H24 ana metal magnezyum alaşımından TS EN ISO 6892-1 standartta kesilip çıkartılan çekme numunesinin max. çekme mukavemeti 258 MPa olarak ölçülmüştür. Ana metalden kesip çıkarılan çekme numunesi “0 (sıfır)” olarak kodlanmıştır. Aşağıda Şekil 6.2 de ana metal malzemeden kesilen çekme numunesi ve çekme mukavemeti sonuç grafiği verilmiştir.



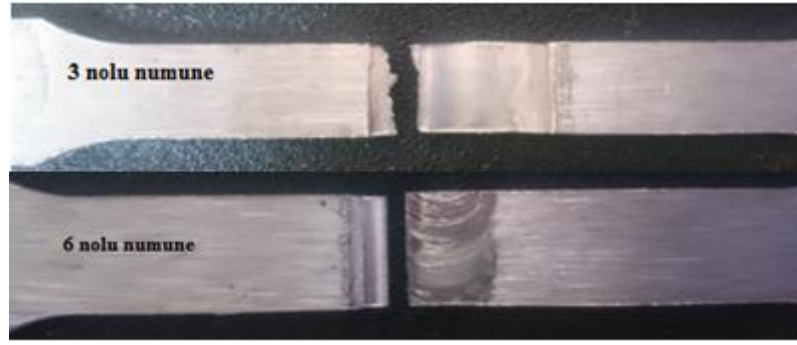
Şekil 6.2: a) Ana metalden kesilip çıkarılmış çekme numunesi b) Çekme numunesi gerilme grafiği.

SKK yapılmış numuneler de kaynak yönüne dik olarak TS EN ISO 6892-1 standardına göre kesilip çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan her deney parametresinden 3 adet numune alınarak ortalama değer çekme mukavemet sonucu olarak yazılmıştır. Tablo 6.1 de çekme deneyi sonuçları gösterilmektedir. Devir sayısı 1000 dev/dak dan 1400 dev/dak ya çıktığında dayanım değerinin arttığı, ilerleme hızına bağlı değişimlere baktığımızda ise ilerleme hızı arttığında dayanım değerinin düştüğü görülmektedir. Devir sayısı artıp, ilerleme hızı düştüğünde dayanımın düştüğü görülmektedir. Bunun nedeninin, plastik deformasyonun tam olarak meydana gelmemesinden kaynaklandığı söylenebilir.

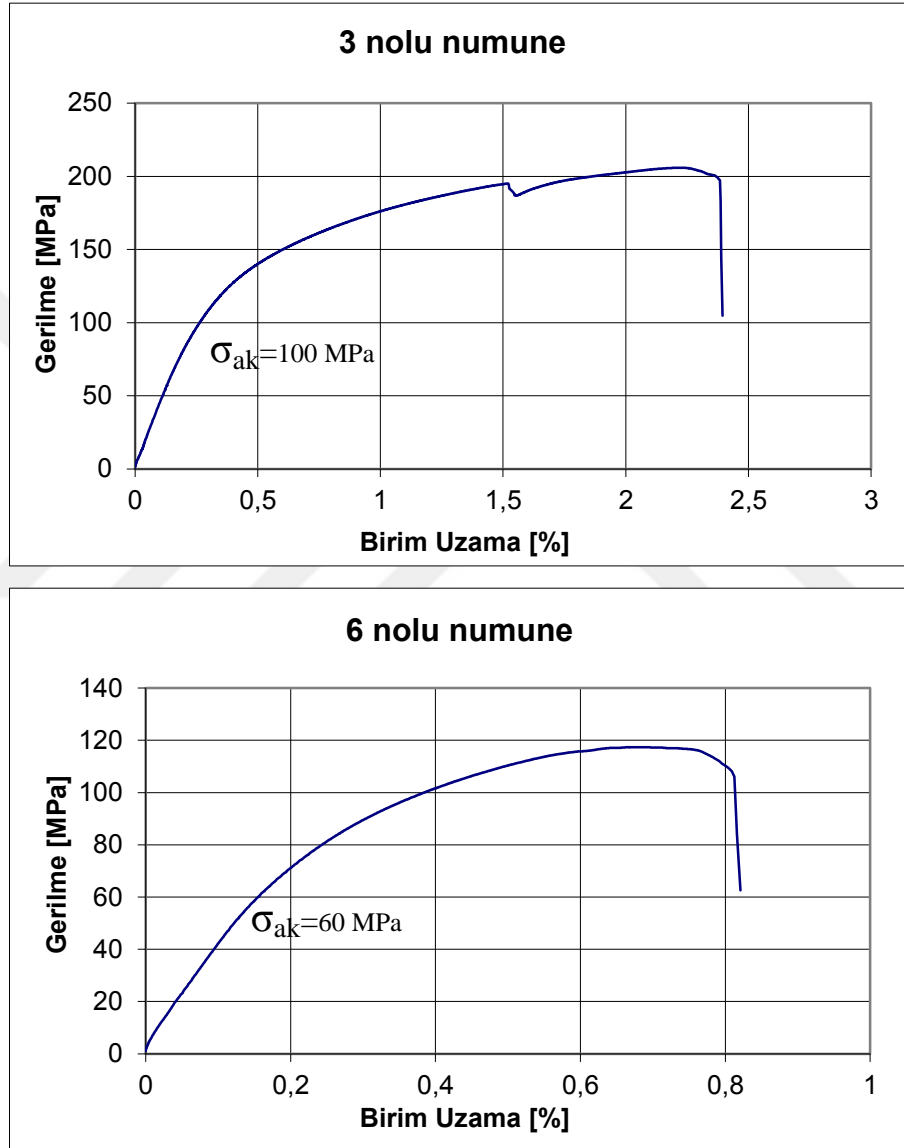
Çekme testi sonuçları incelendiğinde en yüksek çekme dayanımı değerinin 3 nolu numunede, en düşük çekme dayanımı değerinin ise 6 nolu numunede olduğu görülmektedir. Devir sayısı 1000 dev/dak dan 1400 dev/dak ya çıktığında dayanım değeri artmıştır ancak ilerleme hızına bağlı değişimlere bakıldığında ise ilerleme hızının artması dayanım değerini düşürmüştür. Sürtünme karıştırma kaynağında devir sayısının artırılması takım ile kaynaklanacak malzeme arasındaki sürtünmeyi arttıracığından ısı girdisini arttırmaktadır. İlerleme hızı arttığında ise takım ile parça arasındaki temas süresi azalacağından malzemeye olan ısı girişi azalacaktır. Dolayısıyla devir sayısı ile ısı girdisi doğru orantılı, ilerleme hızı ile ters orantılıdır. Omuz çapının etkisine bakıldığında ise omuz çapının artması sürtünmeyi arttırdığından ısı girdisi artmaktadır. Devir sayısının ve omuz çapının fazla artması, ilerlemenin belli bir değer altına inmesi ile gereğinden yüksek ısı girdisi nedeni ile kaynak bölgesinde oluşan intermetalik fazların oluşmasından dolayı dayanımda tekrar düşmelerin olduğu görülmektedir. SKK da ergime olmasa bile ısı girdi miktarı kaynak kalitesi açısından oldukça önemlidir.

Tablo 6.1: Magnezyum AZ31-B H24 SKK yapılmış numunelerin çekme deney sonuçları.

Numune No	Devir Sayısı (dev/dak)	İlerleme (mm/dak)	Omuz Çapı (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Mukavemet Performansı (%)
Ana Malzeme	—	—	—	258	15	—
1	1000	25	15	151,66	4	58,7829
2	1400	40	15	177,77	2	68,9031
3	1400	50	15	195,77	3	75,8798
4	1000	40	20	161,77	1,5	62,7015
5	1000	50	20	176,78	2	68,5193
6	1000	15	15	116,86	1	45,2945
7	1400	25	20	179,86	1	69,7131
8	1400	15	20	189,25	2	73,3527

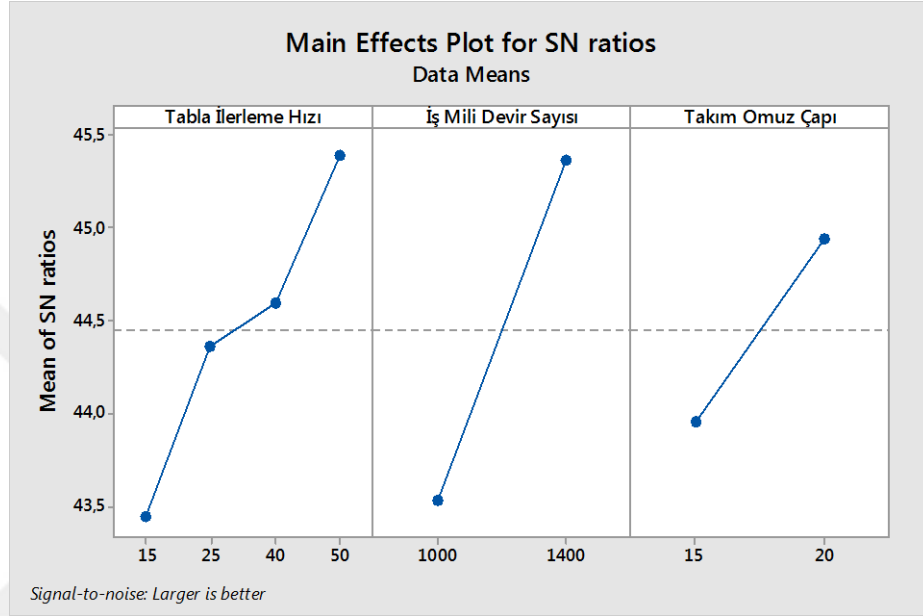


Şekil 6.3: 3 ve 6 nolu numunelerin kopma bölgeleri.



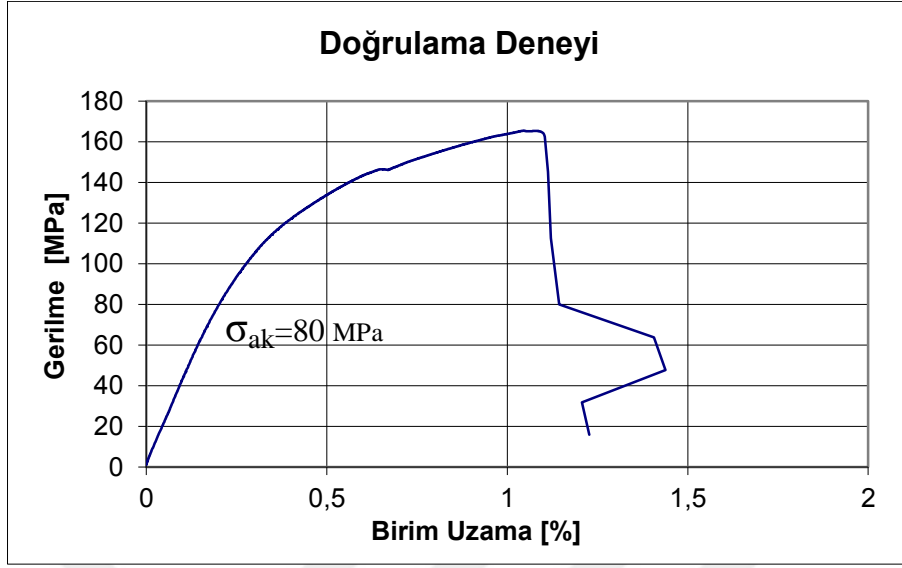
Şekil 6.4: 3 ve 6 nolu numunelerin çekme gerilme grafiği.

Yapılan deney tasarımına göre deneylerden elde edilen çekme mukavemet sonuçları Minitab 17 istatistik yazılımı kullanılarak analiz edilmiş, çekme mukavemeti üzerine faktör ve seviyelerin etkisini görmek için, S/G analizi (sinyal/gürültü analizi) uygulanmıştır. Analiz, deney sonuçları tahmin ettirilerek en yüksek çekme mukavemeti sonucunun, 20 mm takım omuz çapı, 50 mm/dak ilerleme hızı ve 1400 dev/dak değerlerini vermiştir.



Şekil 6.5: Sürtünme karıştırma kaynak parametrelerinin ortalama S/G oranı etki grafiği.

Şekil 6.5 e bakıldığında 3 kaynak faktörünün S/N oranı arttıkça çekme mukavemeti değerinin en yüksek olacağı görülmektedir. Ancak analiz tahmin sonucuna göre yapılan SKK en yüksek çekme mukavemet değerini vermemiştir. Buradan çıkarılabilecek sonuç, çekme mukavemetine başka kaynak faktörleride etki etmekte (pin profili, kaynak bekleme süresi, takım eğim açısı gibi) ve faktörlerin seviye sayılarında arttırılması gerektiği düşünülmektedir.



Şekil 6.6: Doğrulama kaynağı çekme mukavemet grafiği.

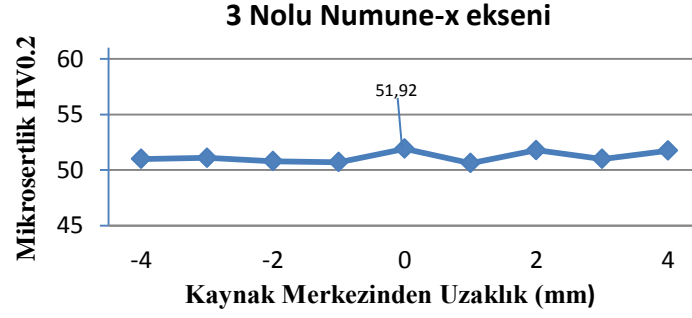
Kaynak yapılmış doğrulama deney parçasının çekme dayanım değeri max. 165 Mpa dır. Şekil 6.7 da görüldüğü gibi kaynak, karışım bölgesi ile termomekanik olarak etkilenen bölge (TMEB) arasından kopmuştur. Bunun nedeni, verilen kaynak parametrelerinin kaynak işlemi için gereken ısı girdisi ile ilişkili olduğu söylenebilir. Dayanımı en yüksek olan 3 nolu numunenin parametrelerinden tek farkı omuz çapının daha yüksek olmasıdır. Omuz çapının artması ısı girişini arttıracığından kaynak bölgesinde gevrek intermetalik fazların ($Al_{12}Mg_{17}$, $Al_{11}Mn_{14}$) oluşumuna neden olarak dayanımın azalmasına neden olduğu düşünülmüştür. Doğrulama numunesinin kaynak ortasına yakın yerden kopmasına rağmen ana malzemeye göre % 60 lık bir çekme mukavemet performansı göstermiştir.



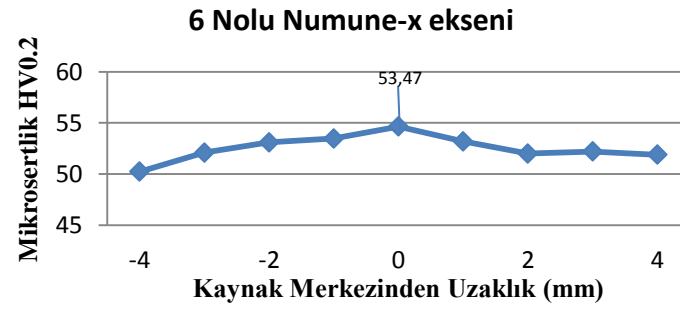
Şekil 6.7: Doğrulama numunesi kopma bölgesi.

6.2 Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

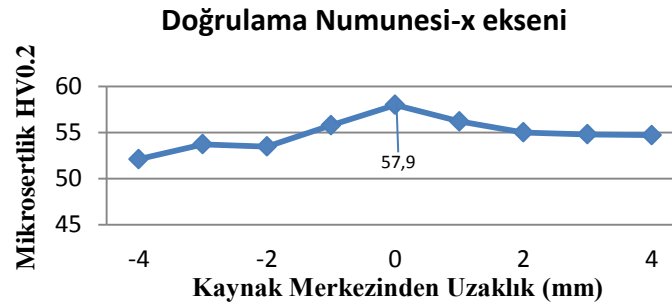
Vickers mikro sertlik test cihazı kullanılarak kaynak bölgesindeki kaynak boyunca sertlik ölçümleri yapılmıştır. Vickers mikro sertliği kaynağın enine kesitinin orta kalınlık çizgisi boyunca ölçülür. Bu çalışmada ana metalin ortalama mikro sertliği 53HV_{0,2/10} (53HardnessVickers, 0,2 kg yük altında, 10 saniye bekleme süresi) olarak ölçülmüştür. En yüksek mikrosertlik değerleri karıştırma bölgesinden alınmış ve 3 nolu deney numunesinin mikrosertliği 51,92HV ve 6 nolu deney numunesinin mikrosertliğide 53,47HV olarak ölçülmüştür. En yüksek mikrosertlik değeride doğrulama numunesinden alınmış ve karıştırma bölgesinde en yüksek sertlik olan 57.9HV değeri kaydedilmiştir. Kaynaklı bölgeden ölçülen sertlik değerleri kullanılan kaynak parametreleri ile ilişkilidir. Ancak kaynak merkezinin kaynaklama parametrelerinden pek etkilenmediği ve kaynak merkezindeki sertlik değerleri arasında önemli bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Sürtünme karıştırma esnasında kaynak devir sayısının oluşan sertlik üzerinde etkili olduğu ifade edilebilir. İlerleme hızında kaynak sıcaklığında etkili olduğu unutulmamalıdır. Daha yüksek takım dönme hızı daha yüksek ısı üretimi ile sonuçlanır ve bu da karıştırılan malzemenin üst yüzeyinde aşırı türbülansa neden olabileceğinden ve bu durumda daha düşük sertliğe yol açacağı söylenebilir [68,69]. Doğrulama numunesinin kaynak bölgesinde görülen sertlik artışının nedeni olarak daha önce de belirtildiği gibi omuz çapındaki artış nedeni ile ısı girdisi artışına bağlı olarak intermetalik bileşiklerin meydana gelmesi ve iri magnezyum parçacıkları olarak düşünülmüştür.



Şekil 6.8: 3 nolu numune mikro sertlik grafiği.



Şekil 6.9: 6 nolu numune mikro sertlik grafiği.



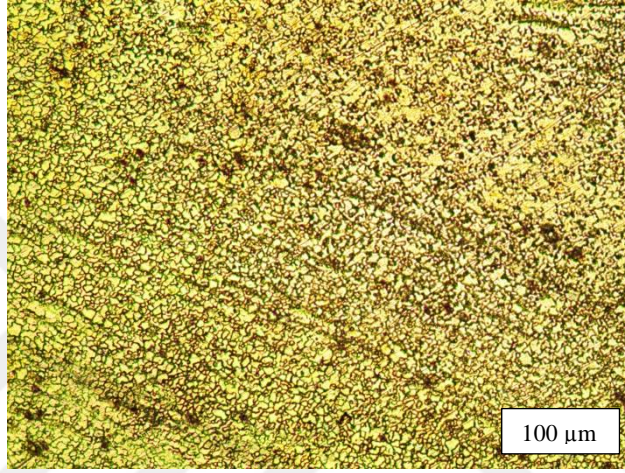
Şekil 6.10: Doğrulama numunesi mikro sertlik grafiği.

6.3 Mikro Yapı Sonuçları

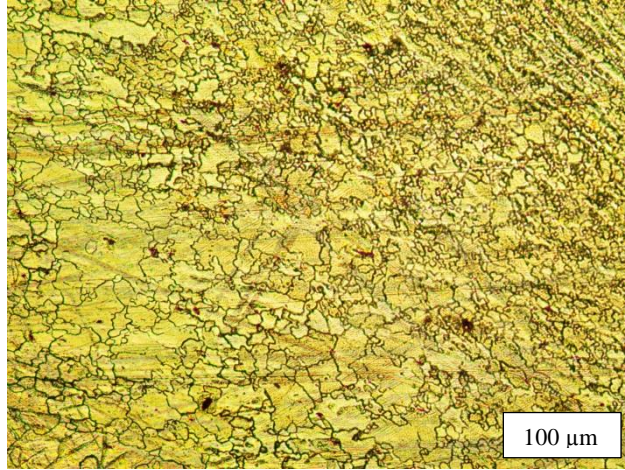
Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış AZ31B-H24 kaynaklı parçaların mikroyapıları incelenmiştir. Dayanım değeri en yüksek, en düşük olan kaynaklı parçaların ve doğrulama numunesinden alınan mikroyapı görüntüleri Şekil 6.11-6.13 da gösterilmektedir. Kaynaklı parçaların mikroyapıları incelendiğinde 3 bölgeden oluştuğu görülmektedir. Karışım bölgesi, termomekanik olarak etkilenen bölge ve ısıdan etkilenmeyen ana malzemedir. Mikroyapı kaynak sıcaklığı ile değişmektedir. Kaynak merkezinde yani dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgede, kaynak sırasında oluşan sürtünme ısı ve plastik deformasyon ile yeniden kristalleşmiş ince taneler yoğunlukla görülmektedir. Ancak bu çalışmada takım omuz çapında kaynak bölgesine etkisinin önemli olduğu söylenebilir. Çünkü 3 nolu deney numunesi ile doğrulama kaynak numunesinin kaynak parametreleri karşılaştırıldığında tek farkın takım omuz çapı olduğu görülmektedir. Bu nedenle büyük takım omuz çapı daha fazla ısı girişi sağlamakta ve bu da tane yapısına etkide bulunduğu ve tane irileşmesi oluştuğu ya da ısı girdisinin artışıyla gevrek intermetalik fazların oluşabileceği düşünülmektedir. Karıştırma bölgesinde görünen siyah noktalar intermetalik bileşikler ile karakterize edilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı yapılan numunelerin kaynaklı birleştirme bölgesinin mikroyapı incelemesi literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür [68,69].



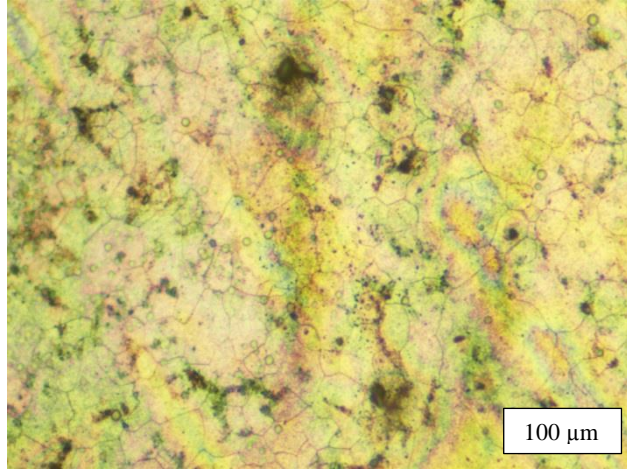
a) Numune üzerindeki kaynak bölgeleri



b) Karışım bölgesi

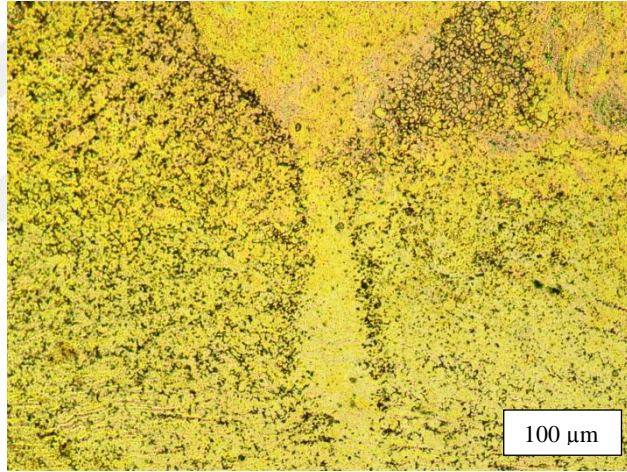


c) Termomekanik olarak etkilenen bölge

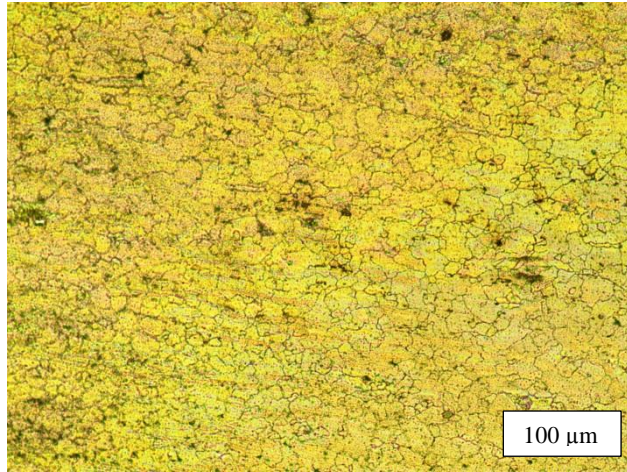


d) Ana malzeme

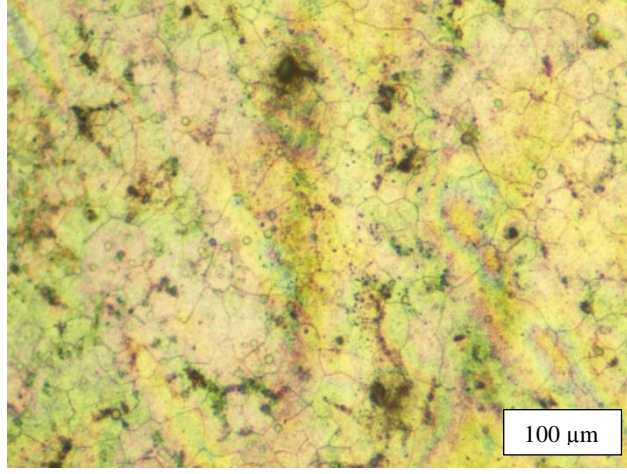
Şekil 6.11: 3 nolu numune optik mikrografları a) Numune üzerindeki kaynak bölgeleri b) Karışım bölgesi c) Termomekanik olarak etkilenen bölge d) Ana malzeme.



a) Karışım bölgesi

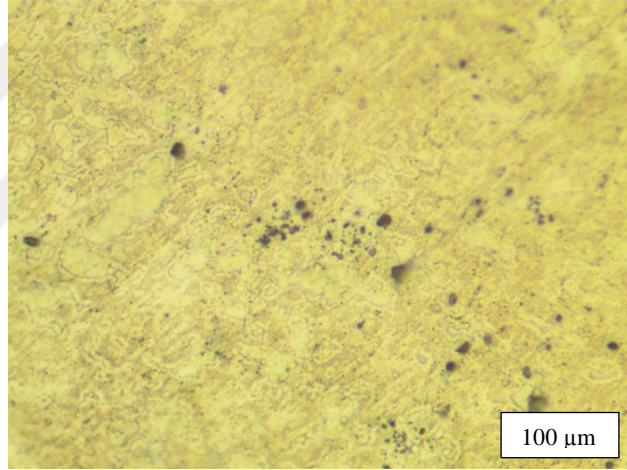


b) Termomekanik olarak etkilenen bölge

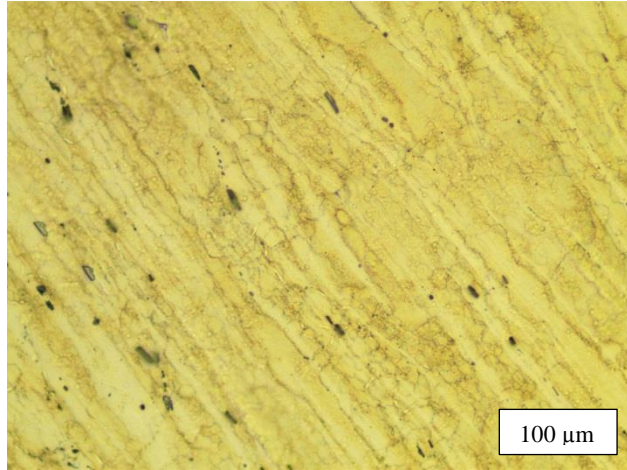


c) Ana malzeme

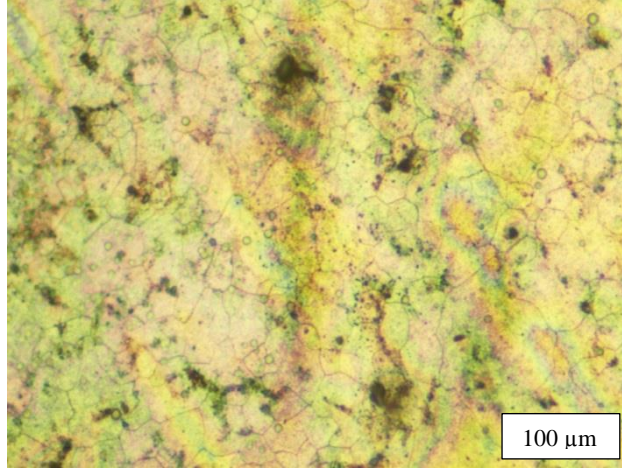
Şekil 6.12: 6 nolu numune optik mikrografları a) Karışım bölgesi b) Termomekanik olarak etkilenen bölge c) Ana malzeme



a) Karışım bölgesi



b) Termomekanik olarak etkilenen bölge



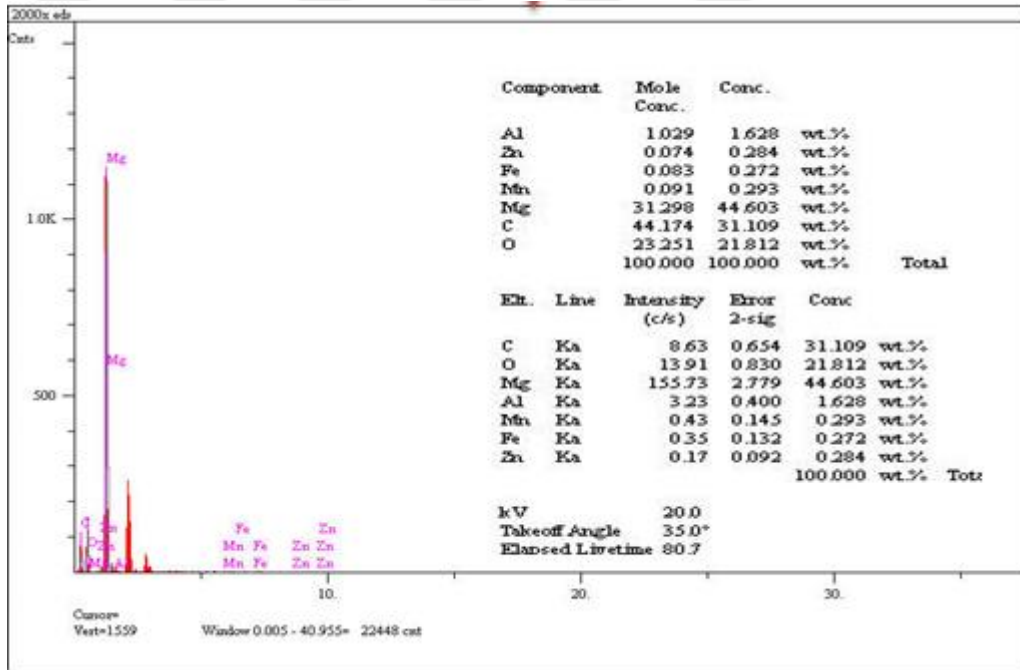
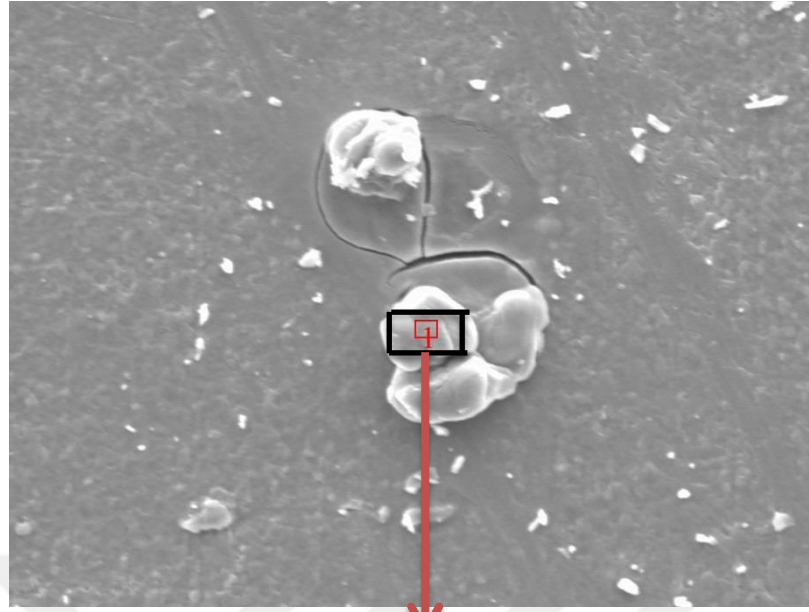
c) Ana malzeme

Şekil 6.13: Doğrulama numunesi optik mikrografları a) Karışım bölgesi
b) Termomekanik olarak etkilenen bölge c) Ana malzeme.

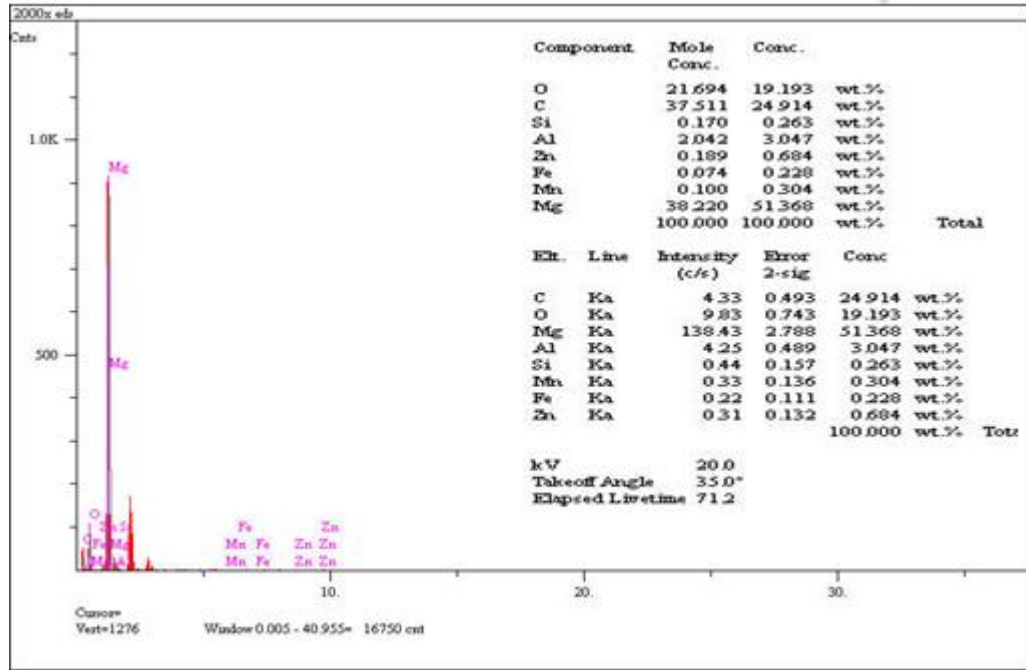
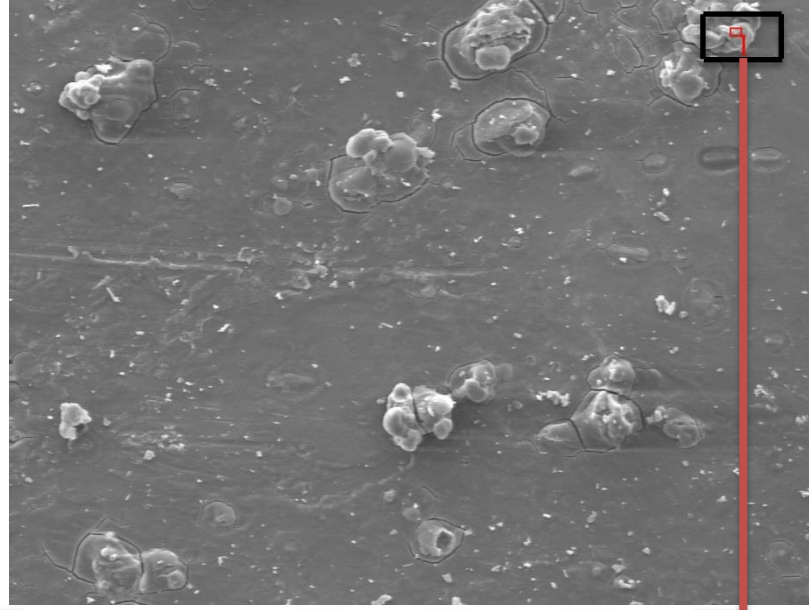
Dayanım değeri düşük olan 6 nolu numunenin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde homojen olmayan bir karışım bölgesinden oluştuğu görülmektedir. Doğrulama numunesinde çekme dayanımlarını ve sertlik değişimlerini etkilediği düşünülen intermetalik fazların daha iri yoğunlukta olduğu söylenebilir.

6.4 SEM-EDS ve XRD Analiz Sonuçları

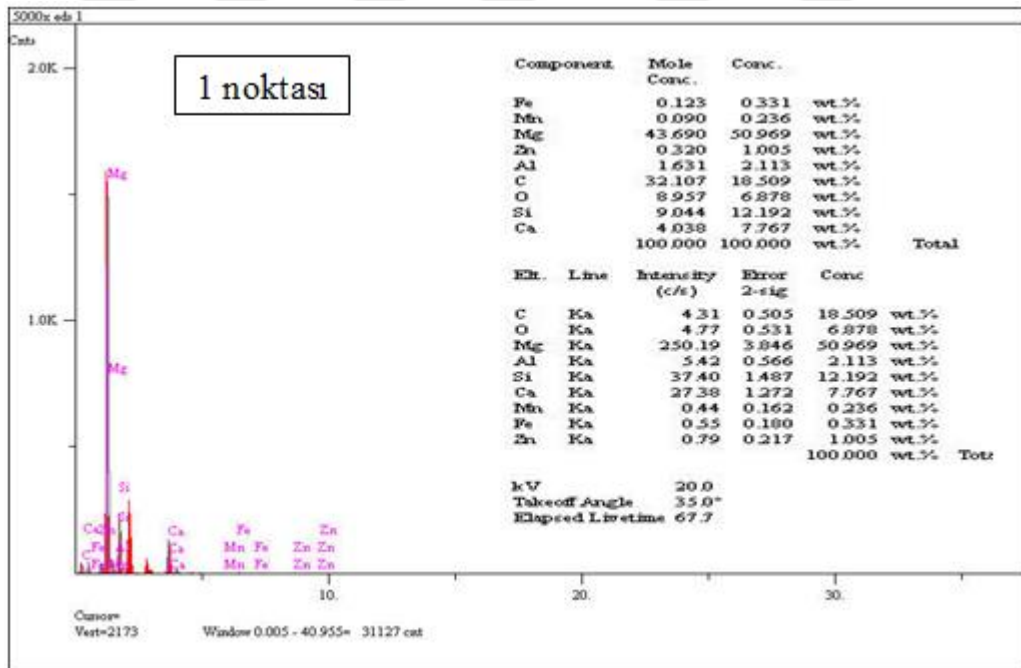
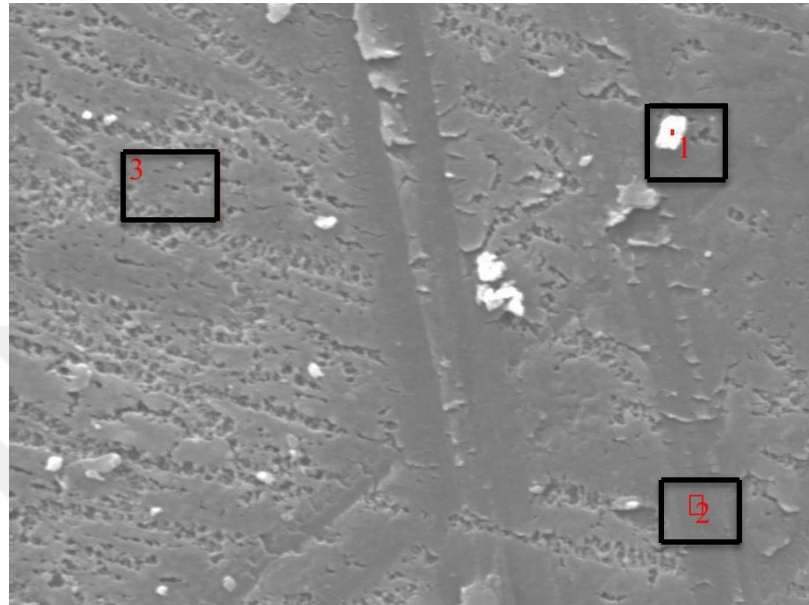
Şekil 6.14-16 de 3 nolu, 6 nolu ve doğrulama numunelerinin sürtünme karıştırma kaynağına ait karıştırma bölgesinden alınan SEM görüntüleri verilmiştir. Fotoğraflardaki kırmızı numara verilen noktalara EDS noktasal analizler yapılmıştır. Noktasal analiz sonucunda karışım bölgesinde bulunan elementlerin yoğunlukları grafik içindeki tablo da verilmiştir.

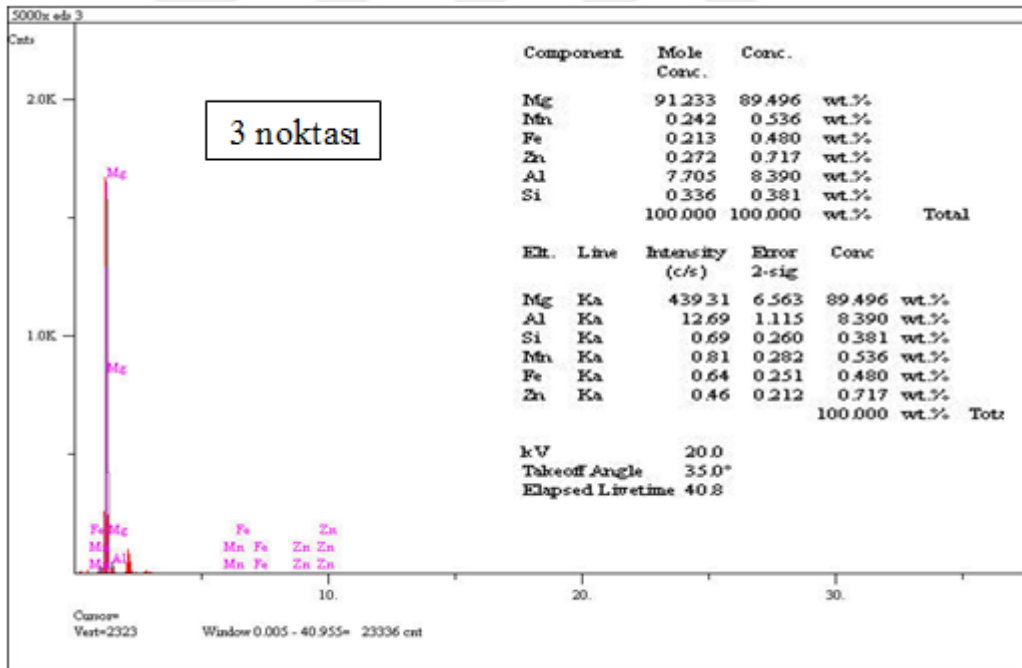
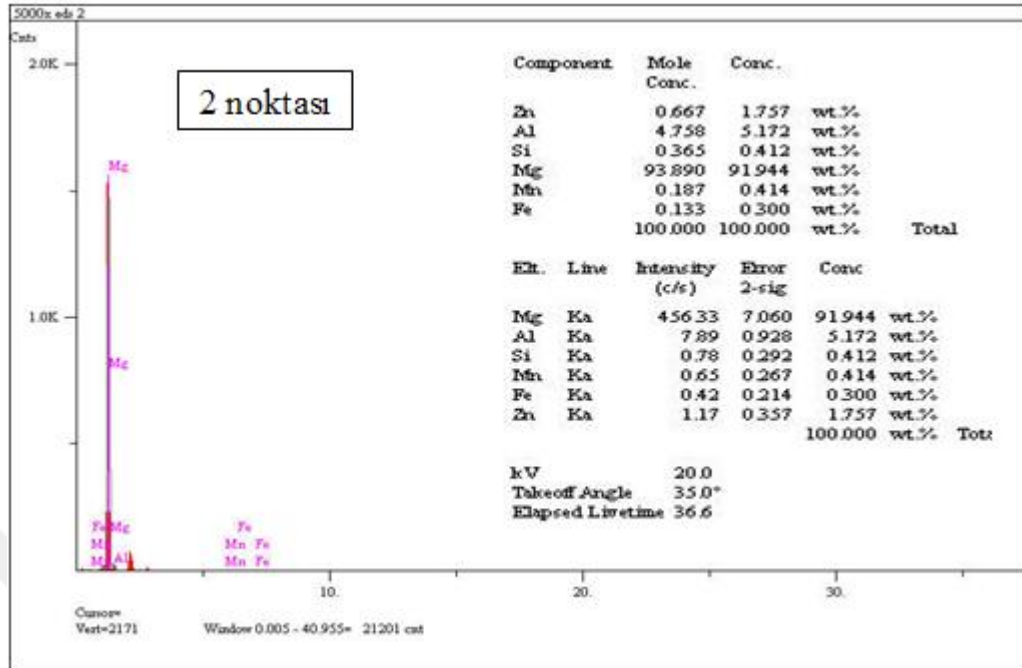


Şekil 6.14: 3 nolu numunenin karışım bölgesine ait 1 noktasının noktasal analizi.

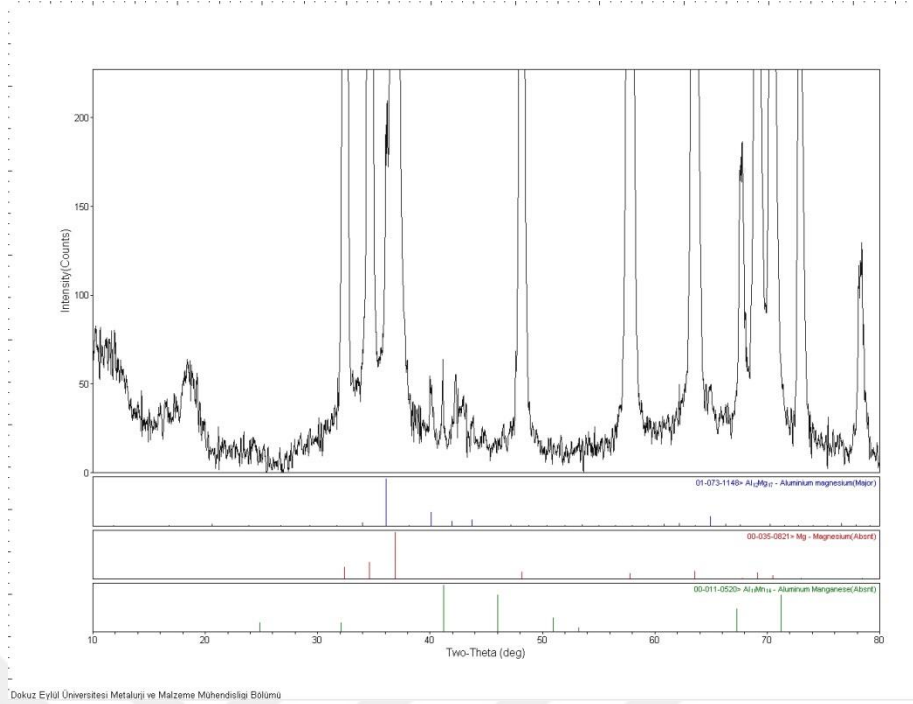


Şekil 6.15: 6 nolu numunenin karışım bölgesine ait 1 noktasının noktasal analizi.





Şekil 6.16: Doğrulama numunesinin karışım bölgesine ait 1, 2 ve 3 noktalarının noktasal analizi.



Şekil 6.17: Karışım bölgesine ait XRD analizi.

Kaynak bölgesinde yapılan XRD faz analiz sonucu ise Şekil 6.17 da verilmiştir. Görüldüğü gibi kaynaklı bölgede (Al₁₂ Mg₁₇ ve Al₁₁Mn₁₄) intermetalik fazlarının oluştuğu görülmektedir. Difüzyon yoluyla Al ve Mg atomlarının aralarında sıcaklık etkisiyle bu intermetalik fazlar oluşmaktadır.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- AZ31-B H24 Mg alaşımının başarılı bir şekilde sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile kaynaklandığı görülmüştür.
- Devir sayısına ve ilerleme hızına bağlı kaynak yüzey kalitesinin değiştiği görülmüştür.
- Düşük devir sayısı ve omuz çaplarında, yüksek ilerleme hızlarında yeteri kadar yüksek sıcaklıklara erişilemediğinden metalde iyi bir kaynaklanma sağlanamamıştır. Isı girdisi devir sayısı ve omuz çapı ile doğru, kaynak hızı ile ters orantılıdır.
- İntermetalik fazların oluşumu ısı girdisi ile doğru orantılıdır. Isı girdisi gereğinden fazla olduğunda intermetalik fazların oluşumu söz konusu olmaktadır. Bu çalışmada da bazı kaynaklarda AlMg fazları belirlenmiştir.
- Kaynak bölgesinde sıcaklık etkisi ile oluşan $Al_{12}Mg_{17}$ ve $Al_{11}Mn_{14}$ intermetalik fazların kırılma yapısı sebebiyle çekme dayanımına negatif, sertliğe ise pozitif etkisi vardır.
- Isı girdisinin azalması yetersiz karışım ve kaynak bölgesinde boşluklara neden olmakta bu da mekanik özellikleri (çekme dayanımı) düşürmektedir.
- Yapılan kaynaklarda en yüksek çekme mukavemet değeri 1400 dev/dak dönme hızı ve 50 mm/dak ilerleme hızında 3 nolu numunede elde edilmiştir.
- Takım devir sayısı, ilerleme hızı ve takım omuz çapı karıştırma bölgesinin mikroyapısını ve kaynak sürecinin özelliklerini etkileyen önemli parametrelerdir. Kaynak sırasında oluşan ısı, karıştırma

bölgesinin tane yapısını etkilemekte ve buna bağlı olarak dayanım, sertlik ve mikroyapıda değişmektedir. Bu nedenle SKK kaynak parametrelerinin çok iyi ayarlanması gerekmektedir.

Magnezyumun sürtünme karıştırma kaynaklı bağlantılarının geliştirilebilmesi için sonraki çalışmalarda aşağıdaki önerilerin uygulanması tavsiye edilebilir:

- Mg un farklı malzeme kalınlıkları için SKK yapılabilir.
- SKK dan önce malzemelere ön ısıtma işlemi uygulanabilir.
- Takım pim profilinin kaynak kalitesine etkisi araştırılarak mikroyapı ve dayanıma etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Oğuz, B., “*Demir Dışı Metallerin Kaynağı*”, OERLIKON Yayını, İstanbul, (1991).
- [2] Kaçar İ. ve Öztürk F., “Magnezyum Alaşımlarının Şekillendirilmesindeki Son Gelişmeler”, *TİMAK Tasarım İmalat Analiz Kongresi*, Balıkesir, 354-360, (2006).
- [3] Chowdhury, S.H., Chen, D.L., Bhole, S.D., Cao, X. and Wanjara, P., “Friction Stir Welded AZ31 Magnesium Alloy: Microstructure, Texture and Tensile Properties”, *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, (2012).
- [4] Rose, A. R., Manisekar, K. and Balasubramanian, V., “Influences of Welding Speed on Tensile Properties of Friction Stir Welded AZ61A Magnesium Alloy”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(2), 257-265, (2012).
- [5] Rajakumar, S., Balasubramanian, V. and Razalrose, A., “Friction stir and pulsed current gas metal arc welding of AZ61A magnesium alloy: A comparative study”, *Material and Design*, 49, 267-278, (2013).
- [6] Ugender, S., “Influence of tool pin profile and rotational speed on the formation of friction stir welding zone in AZ31 magnesium alloy”, *Journal of Magnesium and Alloys*, 6 (2), 205-2013 (2018).
- [7] Yong, Z., Xudan, H., W. And J.Dong., “Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Magnesium Alloy”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, (2014).
- [8] Naik, B. S., Cao, X., Wanjara, P., Friedman, J. and Chen, D., “Residual Stresses and Tensile Properties of Friction Stir Welded AZ31B-H24 Magnesium Alloy in Lap Configuration”, *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, (2015).
- [9] Sevvell, P. and Jaiganesh, V., “Characterization of Mechanical Properties and Microstructural Analysis of Friction Stir Welded AZ31B Mg alloy Through Optimized Process Parameters”, *Procedia Engineering*, (2014).

- [10] Kainer, K.U., “*Magnesium Alloys and Technology*”, John Wiley & Sons, New York, (2003).
- [11] Akdoğan Eker, A., “Magnezyum ve Alaşımları”, *Ders Materyali*, (2008).
- [12] Aydoğanlı, O. ve Güvenirgil, E., “*Manganez Derlemesi*”, MTA Enstitüsü Yayını, Ankara, (1967).
- [13] Tanrıverdi, A., “Magnezyum alaşımı AZ91’in korozyon davranışına katılma hızı ile Si ve Y katkı elementlerinin etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2005).
- [14] Xunhong, W. and Kuaishe, W., “Microstructure and properties of friction stir but welded AZ31magnesium alloy”, *Materials Science and Engineering*, 114-117, (2006).
- [15] Çelik, S., Doğmuş, H., Duran, D.A., Fidaner S. ve Süzen C., “*Genel Dökümcülük Bilgisi Cilt 3*”, MEB Yayınları, Ankara, (1991).
- [16] Vanlı, A. S. ve Akdoğan, A., *Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Dökümü*, 188, 368-372, (2013).
- [17] You, S. and Huang, Y., “Recent research and developments on wrought magnesium alloys”, *Journal of Magnesium and Alloys*, 5(3), 239–253, (2017).
- [18] Koç, E., “Alaşım Elementlerinin Magnezyum Döküm Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, (2008).
- [19] Woo, W., Choo, H., Brown, D.W., Liaw, P.K. and Feng, Z., “Texture variation and its influence on the tensile behavior of a friction-stir processed magnesium alloy”, *Scripta Materialia*, 54(11), 1859-1864, (2006).
- [20] Demirci M., Vanlı S.A. ve Akdoğan A., “Savunma Sanayinde Kullanılan Magnezyum Alaşımları ve Uygulama Alanları” *International Journal of Engineering Research and Development*, 7(4), (2015).
- [21] MakineTek <http://www.makinatek.com.tr/assets/uploads/yazigorsel/5c2b3-h2.jpg>
- [22] Kandemir, K. ve Can, Ç.A., “Otomotiv Endüstrisi için Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Potansiyeli”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Pamukkale University Engineering College Mühendislik Bilimleri Dergisi Journal of Engineering*, 37-45, (2003).
- [23] Oğuz, B., “*Demir Dışı Metallerin Kaynağı*”, OERLIKON Yayını, (1991).

- [24] Chi, C. T. and Chao, C. G., “Characterization on electron beam welds and parameters for AZ31B-F extrusive plates”, *Journal of Materials Processing Technology*, 182, 369–373, (2007).
- [25] Chi, C. T., Chao, C. G., Liu, T. F. and Wang, C. C., “A study of weldability and fracture modes in electron beam weldments of AZ series magnesium alloys”, *Materials Science and Engineering A*, 435–436, 672–680, (2006).
- [26] Naik, B.S., Cao, X., Wanjara P. and Chen D., “Residual stresses and tensile properties of Friction stir welded AZ31B- H24 Mg alloy in lap configuration”, *The Minerals, Metals and Materials Society*, (2015).
- [27] Khairuddin, J.T., Abdullah, J., Hussain, Z. and Almanar, I.P., *Principles and Thermo-Mechanical Model of Friction Stir Welding*, London : Intechopen Limited, (2012).
- [28] Gibson, B.T., Lammlein, D.H., Prater, T.J., Longhurst, W.R., Cox, C.D., Ballun, M.C., Dharmaraj, K.J., Cook, G.E. and Strauss, A.M., “Friction stir welding: Process, automation and control”, *Journal of Manufacturing Processes* 16, 56–73, (2014).
- [29] Christner, B., Hansen, M., Skinner, M. and Sylva, G., “Friction stir welding system development for thin gauge aerospace structures”, *In: Proceedings of the 4th international symposium on friction stir welding*, TWI, (2003).
- [30] Asadi, P., Choobi K.K. and Elhami, A., “Friction stir processing – State of the art”, *Marek Stanisław Węglowski Instytut Spawalnictwa (Institute of Welding)*, 16-18 (44-100), (2006).
- [31] Mishra, Rajiv S. and Mahoney, Murray W., *Friction Stir Welding and Processing*, Ohio: ASM International, (2007).
- [32] R.S. Mishra., and Z.Y. Ma., “*Materials Science and Engineering*”, 1–78, (2005).
- [33] Cederqvist, L., “Friction Stir Welding of Copper Canisters Using Power and Temperature Control”, PhD Thesis, Division of Machine Design, *Department of Design Sciences Faculty of Engineering LTH*, Lund University (2011).
- [34] “Friction stir welding process”, *Gujarat University Library*, Ahmedabad, India, 7-821, (2008).
- [35] Thomas, W.M., Braithwaite, A.B.M. and John, R., “Skew-Stir Technology”, *Proceed34 / Friction Stir Welding and Processing ings of the Third International Conference on Friction Stir Welding*, (2001).

- [36] Collier, M., Steel, R., Nelson, T., Sorensen, C. and Packer, S., “Grade Development of Polycrystalline Cubic Boron Nitride for Friction Stir Processing of Ferrous Alloys”, *Proceedings of the Fourth International Conference on Friction Stir Welding*, (2003).
- [37] Lienert, T.J., Stellwag, W.L., B.B. Grimmer, Jr. and Warke, R.W., “Friction Stir Welding Studies on Mild Steel”, *Weld. J.*, 1-9, (2003).
- [38] Nelson, T.W., Sorensen, C.D., Sato, Y.S., Sterling, C.J. and Packer, S.M., “Friction Stir Welding of Stainless Steel and Nickel Base Alloys R.J. Steel”, *Megastir Technologies*, (2007).
- [39] Sorenson, C.D., Nelson, T.W., Packer, S.M., and Steel, R.J., “Innovative Technology Application in FSW of High Softening Temperature Materials”, *Proceedings of the Fifth International Conference on Friction Stir Welding*, (2004).
- [40] Record, J.H., Covington, J.L., Nelson, T.W., Sorensen, C.D. and Webb, B.W., “Fundamental Characterization of Friction Stir Welding”, *Proceedings of the Fifth International Conference on Friction Stir Welding*, (2004).
- [41] Stahl, A.L. and Sorensen, C.D., Experimental Measurements of Load Distributions on Friction Stir Welding Pin Tools, Friction Stir Welding and Processing III, K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, and T.J. Lienert, Ed., TMS, 179–190, (2005).
- [42] MegaStir, Products & Service, Catalog, <http://www.slb.com/-/media/Files/megastir/catalog.pdf?la=en&hash=B662624BCDE37AB7C23728F7DCB100E21FDC3C61>
- [43] Cederqvist, L., “FSW to Seal 50 mm Thick Copper Canisters—A Weld That Lasts for 100,000 Years”, *Proceedings of the Fifth International Conference on Friction Stir Welding*, Metz-France, (2004).
- [44] Mahoney, M.W., Fuller, C.B., Bingel, W.H. and Calabrese, M., “Friction Stir Processing of Cast NiAl Bronze,” *THERMEC 2006*, Vancouver-Canada, (2006).
- [45] Liu, H.J., Fujii, H. and Nogi, K., “Wear Behavior of Hard Alloy Tools in the Friction Stir Welding of AC4A + 30 vol.% SiCp Aluminum Matrix Composite”, *Proceedings of the Fifth International Conference on Friction Stir Welding*, Metz-France, (2004).
- [46] Yasui, T., Ishii, T., Shimoda, Y., Tsu baki, M., Fukumoto, M. and Shinoda, T., “Friction Stir Welding Between Aluminum and Steel with High Welding

- Speed”, *Proceedings of the Fifth International Conference on Friction Stir Welding*, Metz-France, (2004).
- [47] Konkol, P., “Characterization of Friction Stir Weldments in 500 Brinell Hardness Quenched and Tempered Steel”, *Proceedings of the Fourth International Conference on Friction Stir Welding*, Park City-UT, (2003).
- [48] Okamoto, K., Hirano, S., Inagaki, M., Park, S.C., Sato, Y.S., Kokawa, H., Nelson, T.W. and Sorensen, C.D., *Metallurgical and Mechanical Properties of Friction*, (2005).
- [49] Sato, Y.S., Nelson, T.W. and Sterling, C.J., “Recrystallization in Type 304L Stainless Steel During Friction Stirring”, *Acta Mater*, 53, 637–645, (2005).
- [50] Kumara, R., Singha, R., Ahujab, I.P.S., Pennac, R. and Feoc, L., “Weldability of thermoplastic materials for friction stir welding- A state of art review and future applications”, *Composites Part B 137*, 1–15, (2018).
- [51] Lohwasser, D. and Chen, Z., “Friction stir welding, From basics to applications”, *Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC*, 27-28, (2010).
- [52] Sutton, M.A, Reynolds, A.P., Yan, J., Yang, B. and Yuan, N., “Microstructure and Mixed Mode I/II Fracture of AA2524- T351 Base Material and Friction Stir Welds”, *Eng. Fract. Mech.*, 73 (4), 391–407, (2006).
- [53] Mahoney, M.W., Fuller, C.B., Bingel, W.H. and Calabrese, M., “Friction Stir Processing of Cast NiAl Bronze”, *THERMEC 2006*, Vancouver-Canada, (2006).
- [54] Sato, Y.S., Nelson, T.W. and Sterling, C.J., “Recrystallization in Type 304L Stainless Steel During Friction Stirring”, *Acta Mater*, 53, 637–645, (2005).
- [55] Yan, J., Sutton, M.A. and Reynolds, A.P., “Process-Structure-Property Relationships for Nugget and Heat Affected Zone Regions of AA2524-T351 Friction Stir Welds”, *Sci. Technol. Weld. Join.*, 10 (6), 725–736, (2005).
- [56] Mishra, R.S. and Mahoney, M. W., “*Friction Stir Welding and Processing, editors*”, 7-35, DOI:10. 1361/fswp, (2007).
- [57] Packer, S. and Steel R., “Megastir Technologies,” (in press), (2006).
- [58] De, P.S., Kumar, N., Su, J.Q. and Mishra, R.S., “Fundamentals of friction stir welding. ASM Handbook”, *Welding Fundamentals and Processes*, 6A, (2011).
- [59] Schmidt, H., Hattel, J. and Wert J., “An analytical model for the heat generation in friction stir welding”, *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.* 12, 143–157, (2004).

- [60] İnce, İ., “Demir esaslı malzemelerin sürtünme-karıştırma kaynağında, kaynak parametrelerinin dikiş özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi*, İstanbul, (2011).
- [61] <http://products.asminternational.org/hbk/content/V06A/D03/graphics/inline/i0082765.jpg>
- [62] Chai, F., Zhang, D. and Li, Y., "Effect of thermal history on microstructures and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy prepared by friction stir processing” *Materials*, 7, 1573-1589, (2014).
- [63] Dumpala, L. And Raju L., “Effects of Tool Pin Profile and Weld Speed on AL 6063 Alloy Joints produced by Friction Stir Welding”, *Proceedings of the World Congress on Engineering 2016*, London-UK, (2016).
- [64] Sunil, B. R., Pradeep Kumar Reddy, G., Mounika, A.S.N., Navya Sree P., Rama Pinneswaria P., Ambica , I., Ajay Babu, R. and Amarnadh , P., “Joining of AZ31 and AZ91 Mg alloys by friction stir welding”, *Journal of Magnesium and Alloys* 3, 330–334, (2015).
- [65] Azizieh, M., Alavijeh, A. S., Abbasi, M., Balak , Z. and Kim, H.S., “Mechanical properties and microstructural evaluation of AA1100 to AZ31 dissimilar friction stir welds”, *Materials Chemistry and Physics* 170, 251-260, (2016).
- [66] Bird, C., “Ultrasonic Phased Array Inspection Technology for the Evaluation of Friction Stir Welds”, *Proceedings of the Fourth International Conference on Friction Stir Welding*, Park City –UT, (2003).
- [67] Leonard, A.J. and Lockyer, S.A., “Flaws in Friction Stir Welds”, *Proceedings of the Fourth International Conference on Friction Stir Welding*, Park City – UT, (2003).
- [68] Çakır, R., “AA1050 /Cu Malzeme Çiftinin Birleştirilmesinde Sürtünme Karıştırma Kaynak Parametrelerinin Mekanik ve Mikroyapı özelliklerinin Etkisinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* , Balıkesir, (2013).
- [69] Toktaş, A., “Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminin AA 6063 Alüminyum Alaşımına Uygulanması ve Kaynak Parametrelerinin Malzeme İç Yapısı İle Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, (2006).