

**TOZ METAL ALÜMİNYUM MALZEMELERİN SÜRTÜNME
KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE KAYNAKLANABİLİRLİĞİ**

Mustafa ÇAKIR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2007
ANKARA**

Mustafa ÇAKIR tarafından hazırlanan TOZ METAL ALÜMİNYUM MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAGI İLE KAYNAKLANABİLİRLİĞİ adlı bu tezin YÜKSEK LİSANS tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Adem KURT
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

Üye : Prof. Dr. Adem KURT

Üye : Doç.Dr. Ramazan KAÇAR

Tarih : 22/06/2007

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Mustafa ÇAKIR

**TOZ METAL ALÜMİNYUM MALZEMELERİN SÜRTÜNME
KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE KAYNAKLANABİLİRLİĞİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Mustafa ÇAKIR

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2007**

ÖZET

Toz metal parçaların günümüzde kullanım alanlarının artması sebebiyle birleştirilmesine de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılması amacıyla yapılan bu çalışmada 45x55x5 mm boyutlarında alüminyum toz metal bloklar 290, 330, 370, 410 MPa basınçlar kullanılarak üretilmişlerdir. Üretilen bu bloklar 600 °C’de vakum atmosferinde 60 dakika süre ile sinterlenmişlerdir. Sinterlenmiş numuneler alın alına sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmişlerdir. Birleştirilen bu numunelere mikrosertlik, çapraz kırılma gibi mekanik testler ile metalografik incelemeleri yapılarak presleme, sinterleme ve kaynak parametrelerinin etkileri araştırılmıştır.

Bilim Kodu : 710. 3.019

Anahtar Kelimeler : Toz metalurjisi, Al alaşımları, sürtünme karıştırma kaynağı, Toz metal parçaların kaynaklanabilirliği.

Sayfa Adedi : 89

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Adem KURT

**WELDABILITY OF POWDER METAL ALUMINIUM MATERIALS BY
FRICTION STIR WELDING**

(M.Sc. Thesis)

Mustafa ÇAKIR

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2007

ABSTRACT

The fields of application for powder metal parts have increased today, so as the need to join them. In this study, in order to investigate the weldability of powder metal materials by friction stir welding techniques, aluminium powder metal parts of 5x45x55 mm in size were compacted at 290, 330, 370, 410 MPa pressures. In this study the blocks were sintered at 600 °C in a vacuum atmosphere for 60 minutes. The samples were then joined at different parameters by friction stir butt welding method. Mechanical tests such as microhardness, three point bending strength together with microstructural investigation have been conducted on the joint samples and the effect of pressing, sintering and welding parameters have been investigated.

Science Code : 710. 3.019

Key Words : Powder metallurgy, Al alloys, friction stir welding, weldability of powder metal parts.

Page Number: 89

Adviser : Prof. Dr. Adem KURT

TEŞEKKÜR

Tez konumun belirlenmesinde, gerekli materyallerin temin edilmesinde büyük katkıları olan, yoğun çalışmaları arasında bana zaman ayırarak rehberlik eden ve beni yönlendiren danışmanım, hocam, Sayın Prof. Dr. Adem KURT'a, Yüksek Lisans öğrenimim boyunca yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Mehmet TÜRKER ve Yard. Doç. Dr. Behçet GÜLENÇ hocalarıma, Abidinpaşa Endüstri Meslek Lisesi Müdürü, Sayın Hayati İPEK'e Müdür yardımcısı arkadaşlarıma, deneysel çalışmalara yardımcı olan Bilgisayarlı Nümerik Kontrol Bölüm Şefi Hasan YILDIRIM'a yardımlarını esirgemeyen Müdür yardımcısı arkadaşlarım Ayhan GÜZEL'e, Hikmet ULUTAŞ'a, ve manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim aileme, eşime ve kızıma teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. TOZ METALURJİSİ.....	5
2.1. Toz Metal Üretim Teknikleri.....	5
2.1.1. Mekanik toz üretimi	5
2.1.2. Elektrolitik toz üretimi.....	6
2.1.3. Kimyasal yöntemler	7
2.1.4. Atomizasyon.....	8
2.2. Toz Metalurjisi ile Elde Edilen Tozların Özellikleri.....	13
2.3. Toz Metal Parça Üretimi.....	14
2.3.1. Karıştırma.....	14
2.3.2. Presleme.....	14
2.3.3. Sinterleme.....	16
2.3.4. Sinterleme sonrası işlemler.....	17

	Sayfa
2.4. Toz Metalurjisi Uygulama Alanları.....	20
2.5. Toz Metalurjisi Avantajları.....	21
2.6. Toz Metalurjisi Dezavantajları.....	21
3. KATI HAL KAYNAK TEKNİKLERİ.....	22
3.1. Sürtünme Kaynağı.....	22
3.1.1. Sürtünme kaynak çeşitleri.....	24
3.1.2. Sürtünme kaynağının avantaj ve dezavantajları.....	25
3.1.3. Sürtünme kaynağı yapılabilen malzemeler.....	25
3.2. Ultrasonik Kaynak.....	26
3.3. Difüzyon Kaynağı.....	27
3.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağı.....	29
4. TOZ METAL MALZEMELERİN KAYNAKLANABİLİRLİĞİ.....	30
4.1. Toz Metal Malzemelerin Özellikleri.....	31
4.1.1. Isıl iletkenlik.....	31
4.1.2. Sertleşebilirlik.....	32
4.1.3. Gözeneklilik.....	32
4.2. Kaynak Öncesi Alınması Gereken Önlemler	32
4.3. Toz Metal Malzemeleri Birleştirme Teknikleri.....	32
4.3.1. Ergitmesiz birleştirme yöntemleri.....	33
4.3.2. Ergitmeli birleştirme yöntemleri.....	34
5. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI.....	38
5.1. Kaynağın Uygulanışı.....	38
5.2. Kaynak İşleminin Temel İlkesi.....	39

	Sayfa
5.3. İşlem Karakteristikleri.....	41
5.3.1. İşlem karakteristiklerini etkileyen faktörler.....	42
5.4. Kaynak Dikiş Formu ve Metalurjik Yapı.....	42
5.5. Karıştırıcı Uç ve Tasarımı.....	44
5.6. Kaynak İlerleme ve Devir Hızı.....	50
5.7. Kaynak Güvenirliliği.....	51
5.8. Kaynak Pozisyonu ve Birleştirme Türleri.....	52
5.9. SKK ile Birleştirilebilen Malzemeler.....	52
5.10. Uygulama Alanları.....	53
5.10.1. Demiryolu ve taşımacılık endüstrisi.....	53
5.10.2. Gemi endüstrisi.....	54
5.10.3. Havacılık endüstrisi.....	55
5.10.4. Otomobil endüstrisi.....	55
5.10.5. İnşaat endüstrisi.....	56
5.10.6. Elektrik sanayi.....	57
5.11. Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniğinin Avantajları.....	57
5.12. Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniğinin Dezavantajları.....	58
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	59
6.1. Malzeme.....	59
6.2. Tozların Preslenmesi.....	60
6.2.1 Preslenen numunelerin ham yoğunluklarının ölçülmesi.....	61
6.3. Numunelerin Sinterlenmesi.....	61
6.3.1 Sinterlenmiş numunelerin yoğunluklarının ölçülmesi	62

	Sayfa
6.4. Karıştırıcı Uç.....	62
6.5. Kaynak İşlemleri ve Kaynak Parametreleri.....	64
6.6. Kaynaklı Birleştirmelerde Test Numunelerinin Hazırlığı.....	67
6.6.1. Çapraz kırılma numunelerinin hazırlığı.....	67
6.6.2. Mikro yapı numunelerinin hazırlığı.....	68
6.6.3. Mikro sertlik numunelerinin hazırlığı	69
7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	70
7.1. Sinterleme Sonrası Yoğunluk	72
7.2. Mikro Sertlik Değerleri	73
7.3. Çapraz Kırılma Deney Sonuçları	74
7.4. Mikro Yapı Deney Sonuçları	78
7.4.1. Esas malzeme mikro yapısı	78
7.4.2. Kaynak metali ve geçiş bölgesi mikro yapısı	79
7.5. Kaynak Metali Makro Yapısı	81
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	83
KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ.....	89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Üretim yöntemine göre toz özellikleri.....	13
Çizelge 6.1. Alüminyum tozlarının tane boyutu.....	60
Çizelge 6.2. Deney numunelerinin kaynak işlem parametreleri.....	66
Çizelge 7.1. Üretilen toz metal malzemelerin ham ve 600 °C’de sinterlenmiş yoğunluk değerleri.....	71
Çizelge 7.2. Presleme basıncına göre mikro sertlik değerleri.....	73
Çizelge 7.3. Presleme basıncına göre çapraz kırılma değerleri.....	75

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Mekanik öğütme ile toz üretiminin şematik gösterimi.....	6
Şekil 2.2. Elektrolitik toz üretimi.....	7
Şekil 2.3. Döner disk atomizasyon yöntemi.....	10
Şekil 2.4. Döner elektrod atomizasyon yöntemi.....	10
Şekil 2.5. Vakum atomizasyon yöntemi.....	11
Şekil 2.6. Su atomizasyon yöntemi.....	12
Şekil 2.7. Gaz atomizasyon yöntemi.....	13
Şekil 2.8. TM parça üretim aşamaları.....	14
Şekil 2.9. Toz metal numune imalatında kullanılan metal kalıp.....	16
Şekil 2.10. Sinterleme sırasında metalurjik bağların oluşumu ve gözeneklerin kapanması.....	17
Şekil 4.1. Sürtünme kaynağı.....	34
Şekil 4.2. Elektron ışıın kaynağı.....	36
Şekil 4.3. Lazer kaynağının şematik görünüşü.....	37
Şekil 5.1. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin prensibi.....	39
Şekil 5.2. SKK yönteminde özel olarak tasarlanmış vida adımlı uç.....	39
Şekil 5.3. Sürtünme karıştırma kaynağı işlemi.....	41
Şekil 5. 4. Döner takım ve karıştırıcı ucun dinamik yörüngesinin üstten görünümü.....	41
Şekil 5.5. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan iç yapının şematik görünümü.....	43
Şekil 5.6. Çeşitli whorl™ takım konfigürasyonları.....	47

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. 75 mm kalınlığındaki AA6082T6 alaşımının kaynağında whorl™ takımının kullanılması, kaynağın bitmiş hali ve kaynak dikişinin görüntüsü.....	47
Şekil 5.8. MX Triflute™ takımın resim ve şematik çalışma şekli.....	48
Şekil 5.9. MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ takım dizaynları.....	48
Şekil 5.10. Flared triflute takım ile yapılmış olan bindirme kaynağında kaynak ara yüzeyinin görünümü.....	49
Şekil 5.11. Whorl™ ve MX Triflute™ takımlarının omuz profilleri.....	50
Şekil 5.12. Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi uygulanarak gerçekleştirilen birleştirmeler.....	52
Şekil 5.13. Hızlı trenlerde kullanılan alüminyum panellerinin SKK ile birleştirilmesi.....	54
Şekil 5.14. Yüksek hız feribotlarında kullanılan alüminyum ekstrüzyon panellerinin SKK ile birleştirilmesi.....	55
Şekil 5.15. SKK yöntemi kullanılarak üretilmiş tekerlek jant örneği.....	56
Şekil 6.1. Alüminyum tozlarının tane boyutu	60
Şekil 6.2. İmal edilen toz metal parçaların şematik olarak gösterimi.....	61
Şekil 6.3. Toz metal levha imalatında kullanılan kalıp.....	61
Şekil 6.4. Sinterlemede kullanılan deney düzeneği.....	62
Şekil 6.5. Deneylerde kullanılan karıştırıcı uç ve ölçüleri.....	63
Şekil 6.6. Numune alma bölgelerinin şematik görünüşü.....	67
Şekil 6.7. Çapraz kırılma testinin şematik gösterimi.....	68
Şekil 6.8. Mikrosertlik ölçümlerinin yapılışının şematik gösterimi.....	69
Şekil 7.1. Presleme basıncına bağlı olarak malzemenin ham yoğunluk değerindeki değişim.....	72
Şekil 7.2. Presleme basıncına göre sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimi.....	73

Şekil	Sayfa
Şekil 7.3. Presleme basıncına göre esas metal, termo mekanik bölge ve kaynak metalindeki mikro sertlik değişimi.....	74
Şekil 7.4. Presleme basıncına göre esas metal ve kaynaklı birleştirmenin çapraz kırılma mukavemetindeki değişim.....	76

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Kaynak hızı ile SKK kaynak metali mikro yapıları arasındaki ilişki	51
Resim 6.1. Deneylerde kullanılan karıştırıcı uç	63
Resim 6.2. Kaynak işleminin gerçekleştirildiği freze tezgahı	64
Resim 6.3. Kaynak işleminin detay görünüşü	65
Resim 6.4. Çapraz kırılma testinde kullanılan kalıp düzeneği	68
Resim 7.1. Farklı presleme basınçlarında çapraz kırılma testi uygulanmış esas malzemeler.....	77
Resim 7.2. Farklı presleme basınçlarında çapraz kırılma testi uygulanmış kaynaklı birleştirmeler	77
Resim 7.3. 900 dev/dak 6 mm/dak. kaynak hızında esas malzeme mikro yapısı.....	78
Resim 7.4. 900 dev/dak 6 mm/dak. kaynak hızında kaynak geçiş bölgesi mikro yapısı.....	79
Resim 7.5. 900 dev/dak 6 mm/dak. kaynak hızında kaynak bölgesi mikro yapısı	80
Resim 7.6. 900 dev./dak 6 mm ilerleme hızında yapılan kaynağın makro görünüşü	81

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
Al	Alüminyum
CO	Karbonmonoksit
CO₂	Karbondioksit
Cr	Krom
Cu	Bakır
Fe	Demir
Fe₃O₄	Demir Oksit
He	Helyum
Hv	Hardness Sertlik Birimi
Hz	Frekans birimi
max	Maksimum
Mg	Magnezyum
MnS	Mangan Sülfür
MPa	Çekme Akma Basma Gerilim Birimi
Ni	Nikel
SO₄	Sodyum Nitrat
w	Güç Birimi (Watt)
µm	Mikrometre
Ø	Çap

Kısaltmalar	Açıklama
DKB	Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge
EIK	Elektron Işın Kaynağı
EKE	Edison Kaynakçılık Enstitüsü

Kısaltmalar**Açıklama****GDYS**

General Dinamik Yer Sistemleri

IEB

Isıdan Etkilenmiş Bölge

ITAB

Isı Tesiri Altındaki Bölge

MAG

Metal Active Gas

MIG

Metal Inert Gas

SKK

Sürtünme Karıştırma Kaynağı

TIG

Tungsten Inert Gas

TKB

Termodinamik Yeniden Kristalleşen Bölge

TM

Toz Metalurjisi

TWI

İngiliz Kaynakçılık Enstitüsü

1.GİRİŞ

Malzeme üretimindeki gelişmeler farklı uygulama alanları için farklı malzemeler geliştirilmesini gerektirmiştir. Bu farklı özellikteki malzemelerden birisi de TM (Toz metalurjisi) ile üretilen malzemelerdir [1].

Toz metalurjisi çok küçük partiküllerin birbirini preslemesiyle bağlanarak parça haline getirilmesi işlemidir. Maliyet ve kalitenin hedef haline geldiği günümüzde toz metal teknikleri ile parça üretimi giderek önem kazanmaktadır Toz metalurjisinin önemi; döküm, talaşlı imalat ile şekillendirilmesi oldukça zor veya imkânsız olan parçaların bu yöntemle kolaylıkla ve kütle üretimlerde ekonomik bir şekilde üretilmesinden kaynaklanmaktadır [2].

Milattan önce 3000 yıllarında Mısır'da toz metalurjisi ile üretilmiş küçük parçalara rastlanmasına rağmen ilk önemli kullanımı 1920 yılında tungsten-karbür kesici takımlarının üretimi şeklinde gerçekleşmiştir. Modern anlamda yeni bir parça üretim tekniği olarak teknolojiye yerini İkinci Dünya Savaşından sonra almıştır. Toz metalurjisi ürünlerinin % 70'i otomotiv endüstrisinde, %12'si iş makinelerinde, % 5'i tarım aletlerinde ve % 13'lük oranı da güncel araç gereçte kullanılmaktadır. Bununla birlikte uçak endüstrisi, ileri teknoloji kompozitleri, elektronik parçalar magnetik malzemeler ve talaşlı imalatta kullanılan kesici takımların üretiminde kullanımı hızlı bir büyüme göstermektedir. Dünyada toz metal piyasası yılda % 12 oranında büyüme göstermektedir. En çok kullanılan metal tozu % 85 ile demir tozudur. İkinci sırada % 6–7 ile bakır alaşımları gelir.

Bu üretim yönteminde ince partikül şeklindeki saf metaller, alaşımlar, karbon, seramik ve plastik malzemeler birbiriyle karıştırılarak basınç altında şekillendirilirler. Daha sonra bu parçalar ana bileşenin ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta sinterlenerek partiküllerin temas yüzeyleri arasında kuvvetli bir bağ oluşturulur ve böylece istenilen özellikler elde edilir [3].

Toz metalurjisi küçük, karmaşık ve boyutsal hassasiyeti yüksek parçaların seri imalatına oldukça uygundur. Malzeme kaybı çok azdır. Bu yöntemde ergime kayıpları yoktur, yakın toleranslar ve düzgün yüzeyler elde edilir. Tüm bu olumlu özelliklerin yanında tozların kalıp içerisindeki akıcılığının sınırlı olması yapılacak parçanın şekli için kısıtlayıcı bir faktördür. Ayrıca ilk yatırım maliyetleri (presler, sinter teçhizatları) oldukça pahalıdır. Seri üretim yapılmadığı takdirde amortisman değerleri yüksek olur [3].

Klasik yöntemlerle üretilen parçalarda kaynaklı birleştirme tekniklerine toz metal parçalarda da ihtiyaç duyulmaktadır. Toz metal parçaların gözenekli malzemeler olması nedeniyle toz metal parçaların kaynağı konusu ikinci planda kalmıştır. Ancak toz metal parçaların birleştirilmesi günümüzde ihtiyaç haline gelmektedir. Yapılan çalışmalarda kaynak yöntemlerinin toz metal parçalarda da uygun yöntemler ve kaynak parametrelerinde başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir [5].

Bununla birlikte TM malzemelerin kaynağı diğer yöntemlerle üretilmiş malzemelerin kaynağından bazı farklılıklar gösterir. Bu malzemelerin birleştirilme işleminde farklılığa neden olan en önemli özellik gözenekliliktir. Gözenek hacmi ve nispi yoğunluk kaynak işlemini ve karakterini etkilemektedir [1].

Gözeneklilik, malzemenin ısı iletkenlik ve sertleşebilirlik özelliğini değiştirmekte, yapı içerisinde kalan oksit ve impürütelerden dolayı kaynak işlemini ve karakteristiğini etkilemektedir. Gözenek miktarının değişmesi ile malzemede ısı transferi de değişmektedir. Isı transferinin değişimi doğal olarak kaynak parametrelerini ve özelliğini etkilemektedir. Malzemenin gözenek miktarındaki değişim ısı iletkenliğini değiştirmesinin bir sonucu olarak sertleşebilirlik özelliği de değişmektedir. Çünkü gözenekler ısı transferini yavaşlatmaktadır. Böylece kaynak işlemi esnasında ve sonrasında malzemenin soğuma hızı azalmakta ve bunun sonucu olarak sertleşme eğilimi azalmaktadır [4,5].

Toz metal parçaların kaynakla birleştirilmelerinde dikkat edilmesi gereken en önemli noktalar tasarım, malzeme seçimi ve birleştirme tekniğidir. Öncelikle birleştirme

yapılacak parçalardaki amaçların ne olduğuna karar verilmiş olması gerekir. Bunlar dayanım, boyut sınırları, çevresel faktörler, görünüm ve ekonomiktir [1].

Kaynaklı birleştirmeler tarih boyunca insanların ihtiyacı olan araç ve gereçleri elde etme çalışmaları ile ortaya çıkmıştır. İhtiyaçların sınırsız olması teknolojiye gelişmenin başlıca sebeplerindendir. Kaynaklı birleştirmeler, başlangıçta iki metal malzemenin birbirleriyle birleştirilmesi ihtiyacından doğmuştur. Ancak daha sonraları insanlar sadece birleştirmenin yeterli olmayacağı, birleştirmenin malzeme özelliklerini etkilemeden gerçekleştirebilmesini araştırmışlardır. Buradan hareketle kaynak teknikleri ergitmeli ve ergitmesiz kaynak metotları olarak iki şekilde gruplandırılmışlardır. Ergitmeli kaynak yöntemlerinde birleştirilen metalik malzemelerin birleşme yüzeylerinin ergimesi ve ergiyik karışımının katılaşması sonucu metaller birleştirilirken, ergitmesiz kaynak yönteminde metalik malzemeler ergitilmeden, malzemelerin ergime sıcaklıklarının altında bir sıcaklıkta malzeme katı halde iken birleşme sağlanmaktadır. Günümüzde, ileri teknolojilerin uygulandığı gelişmiş makine elamanlarının kaynaklı birleştirilmelerinde faz dönüşümleri ve plastik deformasyon istenmeyen bir durumdur. Bu olumsuzlukları gidermek, ancak malzemelerin mekanik ve metalurjik özelliklerini etkilemeyecek kadar düşük sıcaklıklarda yapılan birleştirme işlemleri ile mümkündür [6].

Günümüzde uçak, tren, roket, otomobil, gemi ve helikopter gibi araçların imalatında hafif ve mekanik özellikleri çok iyi olan alüminyum alaşımlar büyük oranda kullanılmaktadır. Ancak alüminyum ve alaşımlarının ergitme kaynak teknikleri hem problemlidir hem de zordur. Bu problemlerin çözümü için yeni birleştirme tekniklerinin geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Bu amaçla sürtünme karıştırma kaynak yöntemi, alüminyum alaşımlarının problemsiz ve kolay birleştirilmesi amacıyla geliştirilmiş ve endüstrideki uygulamalarına başlamış bir birleştirme tekniğidir. Bu yöntem katı hal kaynak tekniği olup malzemelerin ergime derecelerinden daha düşük bir sıcaklıkta birleşme işlemini gerçekleştirmektedir [7,8].

SKK (Sürtünme karıştırma kaynağı) tekniği İngiltere, Cambridge’de TWI (İngiliz Kaynakçılık Enstitüsü) tarafından keşfedilen, patenti alınan, klasik sürtünme

kaynağının bir türevi olup, kaynak sonrası çok az deformasyonlu, uzunluğuna birleştirilen veya bindirme parçalarının imalatına uygulanacak katı hal kaynağının avantajlarına imkân vermektedir. Özellikle kaynak yapılması çoğu zaman zor olan alüminyum alaşımların birleştirilmesinde, sürtünme-karıştırma kaynağı başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı düz ve bindirmeli alüminyum alaşım kaynakları için yeni ve başarılı bir kaynak tekniğidir [9].

Alüminyum ve alaşımları kaynak edilmesi esnasında özel tedbirler alınması gereken malzemelerdir. Ergitme kaynak yöntemleri (Ark, lazer ve elektron kaynağı) ile alüminyum ve alaşımlarının (Özellikle yaşlandırma sertleştirilmesi yapılmış olanların) kaynağında yüksek miktarlarda çatlak ve gözenek oluşumu gibi problemler mevcuttur. Alüminyum ve alaşımlarının ark kaynağında karşılaşılan diğer güçlük bu alaşımların kolay oksitlenmeleri ve ısı iletkenlik katsayılarının yüksek olması nedeniyle ısının kaynak bölgesine çok hızlı bir şekilde uygulanması gerekir. SKK yöntemi ile alüminyum ve alaşımlı levhaların alın ve bindirme kaynağında ergitme kaynak metodlarından ve klasik kaynak yöntemleriyle yapılan kaynaklardan daha iyi sonuçlar alındığı literatürlerde belirtilmiştir [10].

Bu çalışma, ergitme kaynağı ile birleştirilmesi çok özel şartlarda yapılabilen toz metal alüminyum malzemelerin SKK yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılması amacı ile yapılmıştır.

2. TOZ METALURJİSİ

Toz metalurjisi çok küçük partikülleri birbirine bağlayarak parça haline getirme işlemidir [3]. Daha geniş bir ifade ile toz metalurjisi, toz şeklindeki malzemelerin preslenmesi ve takiben yüksek sıcaklıkta sinterlenmesi ile parça imalatını kapsamaktadır.

Toz metalurjisinin amacı, metal ve metalsel tozları ergitmeden basınç ve sıcaklık yardımıyla, dayanıklı cisimler haline getirmektir. Sinterleme denilen bu ısıl işlem, ergime noktasının altındaki bir sıcaklıkta yapılmaktadır. Sinterlenen tozlar 1-4 mikron gibi oldukça küçük boyutlara kadar inebilen metal tanelerinden ibarettir [11].

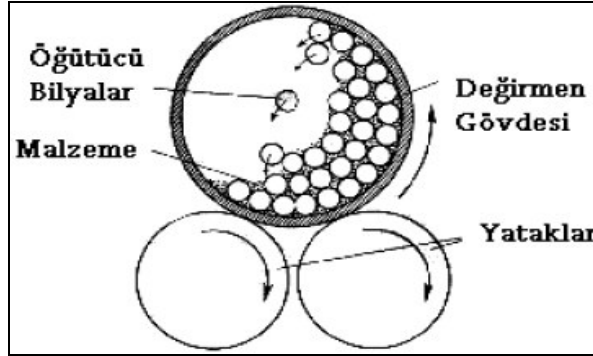
2.1.Toz Metal Üretim Teknikleri

TM de ortalama boyutları birkaç mikrondan birkaç yüz mikrona kadar parçalanmış partiküller, toz olarak tanımlanmıştır. Tozun geometrik şekli üretim yöntemine bağlı olarak küreselden, dendritik formlara kadar çok farklı olabilmektedir. Aynı şekilde tozun yüzey durumunun düzgün veya gözenekli olması da yine üretim yöntemine göre değişiklik göstermektedir. Tozun ortalama boyutları, şekli ve yüzey durumu parça imalatı açısından önemlidir. Toz üretimini esas olarak mekanik, fiziko-kimyasal, kimyasal ve elektrokimyasal olmak üzere dört ana grupta toplamak mümkündür [12].

2.1.1 Mekanik toz üretimi

Bu yöntemde malzeme, mekanik ya da pnomatik olarak kırma, çarpma ve öğütme şeklinde parçalanarak toz haline getirilir. Bu amaçla kullanılan makineleri kırıcılar, kaba ve ince öğütücüler olarak gruplandırabiliriz. Kırıcılar, genellikle cevher hazırlamada kullanılır. Kaba ve ince öğütücüler ise birkaç mikrona kadar değişen boyutlarda toz hazırlamada kullanılır. Seramik malzemeler, metaller arası bileşikler, ferro alaşımlar, ferrosilis, ferrokrom gibi gevrek malzemeler bilyalı değirmenlerde öğütülür ve toz haline getirilir. Şekil 2.1’de Mekanik öğütme ile toz üretiminin

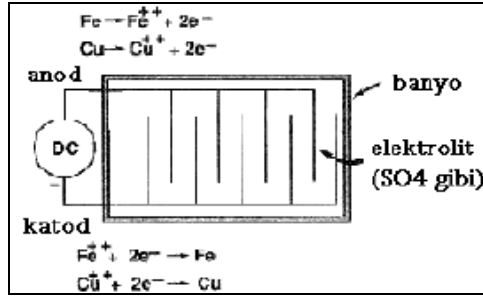
şematik resmi görülmektedir. Gevrek olmayan malzemelerin kırılması zor olduğu için öğütme işlemi genellikle bu tür malzemelere uygulanmaz [12].



Şekil 2.1. Mekanik öğütme ile toz üretiminin şematik gösterimi [12]

2.1.2 Elektrolitik toz üretimi

Bu metot da tozlar doğrudan elektrolitik banyoda çökeltilir ya da iyi kırılabilme özelliğinde katot da toplanır. Bu yöntemle üretilen demir veya bakır tozları elektrolitin bulunduğu tekne içerisindeki paslanmaz çelik olan katot da ortalama 48 saatte 2,5 mm kalınlığında toplanır. Katotta biriken Cu veya Fe tozları sıyrılarak alınır, yıkanır, kurutulur ve gerekirse öğütme işlemi yapılarak toz tane ebadı küçültülebilir. Bu yöntemle elde edilen tozlar indirgeyici gazlar ile tavlansak sıkıştırılabilme özellikleri artırılır. Elektroliz yolu ile genel olarak bakır tozu üretilir. Bu yöntemle demir tozları elde etmek mümkün olmakla beraber, maliyetinin yüksek olması nedeni ile demir tozu üretiminde diğer yöntemler daha avantajlıdır. Bu yöntemle sadece saf element tozları üretilir, alaşım tozları üretilmez. Üretilen tozlar dendritik yapıya sahiptir [13]. Şekil 2.2’de Elektrolitik toz üretiminin şematik resmi görülmektedir.



Şekil 2.2. Elektrolitik toz üretimi [13]

2.1.3 Kimyasal yöntemler

Bu yöntemle bütün metal tozları üretilebilir. Kimyasal yöntemlerde işlem parametrelerinin kontrolü ile istenilen şekilde ve ebatta toz üretilebilir.

Gaz fazı ile ayrıştırma

Bu yöntemde (Demir, bakır, tungsten, molibden, vb.) malzeme oksitleri, redükleyici gazlar (Hidrojen veya katı karbon eriyiği) ile indirgenerek metal tozu haline getirilirler. Halen tungsten ve molibden gibi bazı metaller için tek üretim yolu olarak bilinir. Oksit ve karbonun maliyetinin düşük olması, gözenekli toz imal imkânı, oksit ve parçacık boyutunun kontrolü bu yöntemin avantajlarıdır. İndirgeyici gazların maliyetinin yüksek olması, toz saflığının oksit saflığına bağlı olması, alaşım tozlarının üretim imkânsızlığı bu yöntemin dezavantajı olarak bilinir [14].

Termal ayrıştırma

Bu yöntemle demir, nikel ve CO gazı etkisinde karbonillerini veren metallerin tozları yüksek saflıkta, düzgün dağılmış ve küresel olarak elde edilirler. Fe, Cu, Cr, Mg, Ni, Co uygun sıcaklıkta CO gazı etkisinde karbonille parçalanır ve tane boyları 2–10 µm olan yeterince ince tane şekilli tozlardır [13].

Sıvı fazdan çökeltme

Çeşitli sıvılardan faydalanarak kimyasal yollarla metal tozları üretmek mümkündür. Metal iyonları kapsayan, nitratlar, klorürler ve sülfatlar gibi eriyiklerden daha az asal olan başka bir eleman ile kimyasal yer değiştirme suretiyle metal tozları üretilir.

Nikel tozları cevherden doğrudan çökeltme ile üretilirler. Cevherlerin saflaştırılması ile elde edilen sülfat eriyiği karıştırılmakta olan indirgeme otoklavına konulur ve ısınmakta olan eriyiğe nikel tozu ilave edilerek, 14 atmosfer basınçta hidrojen gazı gönderilir. Karıştırmaya son verildiğinde nikel tozu otoklav dibine çöker. Bu yöntemle elde edilen tozlar % 99,8 saflıkta olup yüksek yoğunluk ve akma hızına sahiptir. Reaktif metaller erimiş tuz eriyiklerinden çökeltme ile de imal edilirler. Bu yöntemle toprak halinde, ince ve saflık oranı yüksek tozlar elde edilir [13].

Gaz fazdan çökeltme

Gaz bileşiklerinin oluşturduğu kimyasal tepkimelerin sonucunda reaktif metallerden ve nano ölçekli partiküllerden tozlar üretilir. Gaz esaslı tepkimelerin en büyük avantajı, tepkime sırasında, toz üretiminde ergitmenin ortadan kalkması sonucu potanın kirlenmemesi ve yeniden kullanılabilir olmasıdır. Bu tür üretim sürecine en iyi örnek molibden trioksit'in saf hidrojen ile tepkimeye girerek metalik molibden tozunun üretimidir. Bu yöntemle, vanadyum, niyobyum, volfram, hafmiyum, gümüş, nikel ve zirkonyum metallerinin klorürleri, florürleri ve hatta oksitleri işleme sokularak çok küçük tane boyutlarında metalik tozlar üretilir [15].

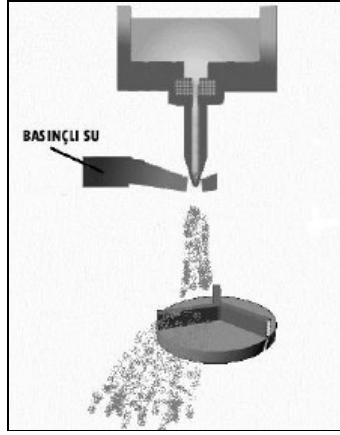
2.1.4. Atomizasyon

Bu yöntemde metal tozları, sıvı haldeki metalin başka bir katı yüzeye çarpmadan önce küçük damlacıklar halinde hızlı bir şekilde katılaşması ile elde edilir. Bu yöntem, sıvı metalin bir gaz veya sıvı akışkan jeti ile parçalanmasını sağlamak suretiyle gerçekleştirilir. Kullanılan gaz çeşitleri genellikle argon, azot veya hava, sıvı olarak ise su kullanılır. Püskürtme açısı ve konisi, akışkan hızı, debisi, akan

metalin kalınlığı gibi birçok parametrenin kontrolü ile çok farklı boyutlarda toz üretimi mümkündür. Katılma hızına bağlı olarak parçacığın şekli küresel halden, daha düzensiz parçacığa kadar farklılık gösterebilir. Pratikte bu yöntem ergitilebilen bütün metallere uygulanabilir. Ticari olarak üretilebilen tozlar arasında demir, takım çelikleri, alaşımlı çelikler, bakır, pirinç, bronz, alüminyum, kurşun, kalay çinko ve kadmiyum gibi diğer düşük ergime dereceli metal tozları sayılabilir. Atomizasyon yönteminin avantajlarından biri de alaşım tozlarının ergitilmesinde rahatlıkla kullanılabilmesidir. Bu yöntemle üretilen tozların bileşimleri her bir toz tanesinde aynı kalmaktadır [12].

Döner disk yöntemi

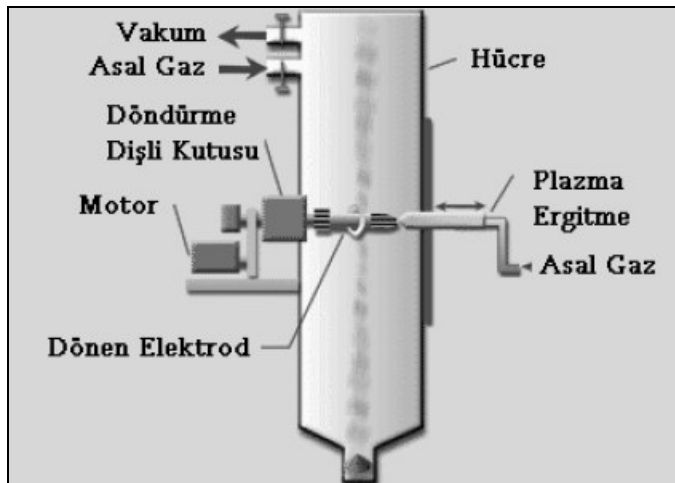
Atomizasyon için değişik yöntemler kullanılmaktadır. Bunların içinde önemli bir yer tutan yöntem, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle toz metal üretimini sağlayan döner disk yöntemidir. Bu yöntem içinde de iki ayrı üretim tekniği vardır, bunlardan biri belli bir miktarda sıvı metal toz oluşturacak kadar merkezkaç kuvvetine tabi tutulur. Diğer yöntemde ise ergimiş metal sürekli olarak dönen bir disk veya koni üzerine akıtılarak saçılan metalin toz haline gelmesi sağlanır (Şekil 2.3). Bir potadan tandişe aktarılan sıvı metal, tandiş altındaki memeden dönen bir disk üzerine akıtılır. Disk üzerindeki set ve yarıklara çarpan sıvı metal parçalanarak şekildeki gibi saçılır. Saçılan metal parçacıklar nozülde çıkışta bazen su ile soğutularak birbirine yapışmadan katılaşmaları sağlanır. Sıvı metali mekanik olarak parçalamak için uygulanan basit bir yol da katılma sırasında karıştırmaktır [12].



Şekil 2.3. Döner disk atomizasyon yöntemi [12]

Döner elektrod yöntemi

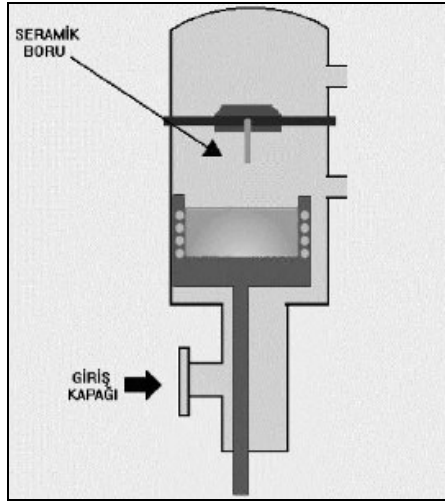
Bu yöntemde tozu elde edilecek metalden yapılmış bir elektrod ile ergimeyen tungsten elektrod arasında ark oluşturulur (Şekil 2.4). Ergiyen elektrodun döndürülmesiyle, elektrik arkı altında oluşan metal damlaları savrularak parçalanır ve tankta toplanır. Oksidasyonu önlemek için toz toplama tankı genellikle helyum, argon gibi bir asal gazla doldurulur. Bu yöntemle küresel ve oldukça eşit tane iriliğinde metal tozu üretmek mümkün olmaktadır [12].



Şekil 2.4. Döner elektrod atomizasyon yöntemi [12]

Vakum atomizasyon yöntemi

Bu yöntemde Şekil 2.5'te görüldüğü gibi silindirik bir tankın alt kısmında sıvı metal potası, üst kısmında da vakum atomizasyon odası bulunmaktadır. Her iki bölüm sıvının geçeceği memeyi taşıyan bir plaka tarafından bölünmüştür. Memenin alt kısmında ona bağlı bir seramik boru bulunmaktadır. Vakum altındaki sıvı metal önce belirli bir sıcaklığa kadar indüksiyon akımı ile ısıtılır, sonra bu bölüme hidrojen gazı doldurulur. Potadaki sıvı metal de bu hidrojen gazı çözündükten sonra taşıyıcı mil potayı yukarı iterek seramik boruyu potaya daldırır. Üst kısımda vakum olduğu için ergimiş sıvı metal memeden geçerek parçalanarak pulverize olur ve soğur. Böylece metal ve alaşımlarından ince küresel tozlar üretilebilmektedir [12].

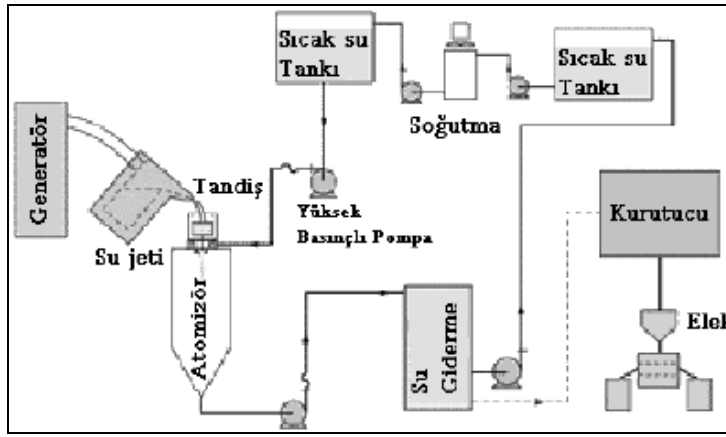


Şekil 2.5. Vakum atomizasyon yöntemi [12]

Su atomizasyon yöntemi

Sıvı metali pulverize etmek için bu yöntemde basınçlı su kullanılır. Şekil 2.6'da yöntemin temel prensibi şematik olarak gösterilmektedir. Ergitme ocağından tandişe, akıtılan sıvı metal, buradan da bir nozülde geçerek, sıvı metal demetine belirli açıda basınçlı su püskürtülerek pulverize olması sağlanır. Kimyasal ve fiziksel özelliklerini değiştirebilmek için suya bazı katkıları yapılabilir. Özel memelerden püskürtülen

suyun basıncı 5,5–20 MPa, hızı 70-230 m/s, debisi ise 110–380 litre/dakika değerleri arasında değişir. Su filtre edilip soğutulduktan sonra tekrar kullanılabilir. Atomize edilen sıvı metal, paslanmaz çelikten yapılan bir tankta toplanır. Metal tozunu oksidasyondan korumak için tanka azot gazı doldurulabilir. Sıvı metalin aktığı memenin şekli ve suyu püskürten üfleçlerin tipi elde edilecek metal tozunun boyutlarını, boyut dağılımını ve şeklini etkilemektedir [12].

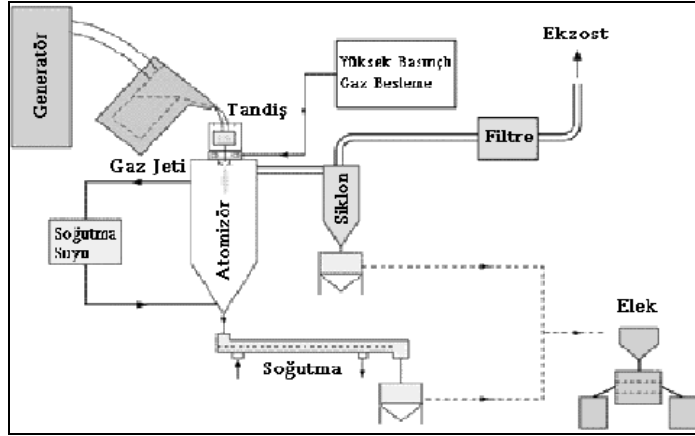


Şekil 2.6. Su atomizasyon yöntemi [12].

Gaz atomizasyon yöntemi

Basıncı gaz ile atomizasyon da prensip olarak su atomizasyon yöntemine benzer. Bu yöntemde akışkan olarak su yerine gaz kullanılır. Sistemin, birbirine püskürtme memesi ile irtibatlı düşey olarak üst üste bulunan iki odası vardır (Şekil 2.7). Üstteki odada sıvı metal potası bulunmakta, alttaki odada ise atomizasyon işlemi yapılmaktadır. Her iki oda da vakum pompasına bağlantılı olup oksidasyonu engellemek için işlem vakum altında yapılmaktadır. Sıvı metal potası ve atomizasyon memesi yüksek frekanslı indüksiyon bobinleri ile sıcak tutulmaktadır. Atomizasyon odasında oluşan fazla buharı ve yüksek basıncı atmak için emniyet ventilinden yararlanılmaktadır. Basıncı gaz tüpünden boru ile memeye ulaşan gaz potadaki sıvı metali beraberinde sürükleyerek atomizasyon odasına pulverize ederek dağıtır. Soğuyan metal tozu bu odanın tabanındaki bir hazne içinde toplanır. Pulverize edilen

metal tozlarının birbirine yapışmaması şekillerinin bozulmaması için atomizasyon odasının boyutları dikkatli seçilmelidir [12].



Şekil 2.7. Gaz atomizasyon yöntemi [12].

2.2. Toz Metalurjisi ile Elde Edilen Tozların Özellikleri

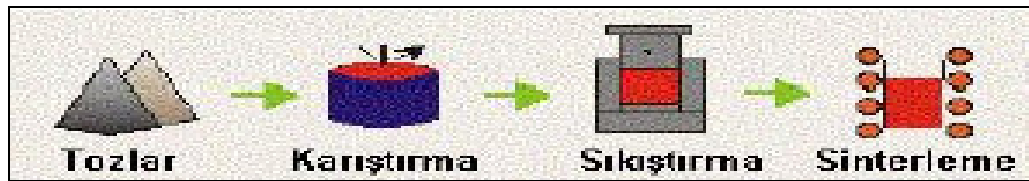
Tozun şekli daha önce bahsedildiği gibi tozun ısı transferi ve püskürtme karakteristiklerine bağlı olarak farklılık gösterir. Genellikle şekil sınıflandırmasında düzensiz şekilli, kitle halinde veya küresel halden bahsedilir. Düzensiz şekiller, daha çok kübik veya iğnemsî yapıdaki malzemeleri ifade eder. Kitle halinde toz ise en büyük ve en küçük tane boyutunun birbirine yakın olduğu tozları, küresel olanlar ise büyük oranda küresel formda olan tozları ifade eder. Üretim şekline bağlı olarak elde edilebilecek tane şekli Çizelge 2.1'de gösterilmiştir [12].

Çizelge 2.1. Üretim yöntemine göre toz özellikleri [12]

Üretim Yöntemleri	Tozların Özellikleri				
	Düzensiz Gözenekli	Düzensiz Yoğun	Kitlesel Yoğun	Küresel Gözenekli	Küresel Yoğun
1-Mekaniksel	x	x			
2-Fiziko- kimyasal	x	x	x	x	x
3-Kimyasal	x	x	x	x	x
4-Atomizasyon					x

2.3. Toz Metal Parça Üretimi

Toz metalurjisi parça üretimi nihai ölçülerde ve hassas boyutlarda parça üretimine imkân verdiğinden çok önemli ve üretim miktarı ve karmaşıklığı göz önüne alındığında oldukça ekonomik sayılabilecek bir üretim tekniğidir. TM parça üretimi çeşitli aşamalardan oluşmaktadır (Şekil 2.8). Bunlar, karıştırma, presleme, sinterleme ve sinterleme sonrası işlemlerdir [12].



Şekil 2.8 TM parça üretim aşamaları [16].

2.3.1. Karıştırma

Metal tozuna istenen alaşım elementleri ilave edilir. Tozlarla birlikte uygun bir yağlayıcı da belirli oranlarda (max % 0,5–1,5) olmak üzere ilave edilir. Yağlayıcı olarak metal stearatlar ve mum kullanılır. Yağlayıcı kullanılmasının temel nedeni, sıkıştırma esnasında tozun kalıp cidarlarına yapışmasını engellemek ve tozların birbiri üzerinde daha rahat kaymasını ve şekil almasını ve preslenmiş parçanın kalıptan çıkışını kolaylaştırmaktır. Bunun faydası yoğunluğun her tarafta mümkün olduğunca aynı olmasını sağlamaktır [12].

2.3.2. Presleme

Presleme genellikle oda sıcaklığında özel şekilde hazırlanmış çelik kalıpta yapılır. Toza, plastik şekil değiştirme özelliğine göre $1\text{--}10\text{ ton/cm}^2$ arasında değişen basınç tatbik edilir. Geleneksel toz sıkıştırılması işleminde tek eksen boyunca uygulanan basınç sonucu, kalıbı dolduran tozlar preslenerek şekillenir. Toz doldurulduktan sonra, üst baskı plakası (Dalgıç piston) ile basma gerçekleşir ve sıkıştırılmış toz metal blok parça alt pistonun hareketi ile çıkarılır. Kalıp duvarlarının aşınmasını

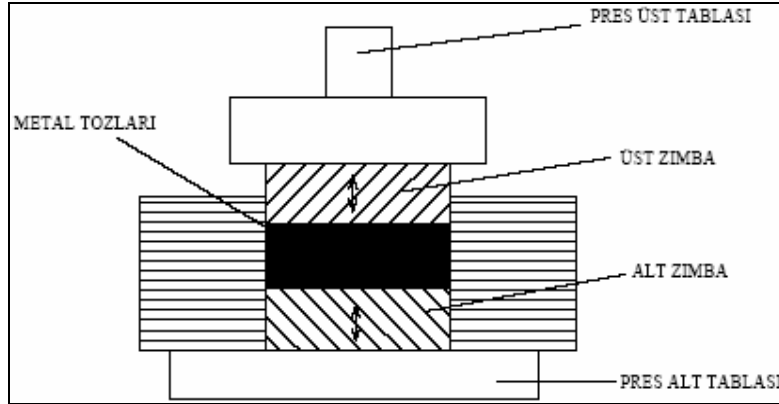
engellemek ve tozların kolay sıkıştırılabilirliği için tozlara ve kalıp duvarlarına yağlayıcılar eklenir.

Tek yönlü preslemede uygulanan basınç arttıkça toz kütesinin yoğunluğu artar. Yani bünyedeki gözeneklilik düşer. Tek yönlü presleme ekonomik bir yöntem olmasına karşın, bazı dezavantajları ve sınırlılıkları vardır. Karmaşık şekillerdeki parçalar ile boy/en ($L/D > 2,5$) oranı yüksek olan metalik parçalarda istenen ham yoğunluklar gerçekleşemez. Bu yüzden karmaşık ve boy/en oranı fazla olan şekillerdeki parçaları basmak amacıyla Soğuk İzostatik Presleme ile tozların preslenmesi işlemleri gerçekleştirilir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen Soğuk İzostatik Presleme işleminde, tozlar kauçuk bir kalıba doldurularak yağla dolu basma hücresinin içerisine yerleştirilir. Basma pistonu veya dalgıcı sayesinde yağ, kalıba her yönden eşit baskı yapar ve bu sayede basılmış numunelerin her tarafı aynı yoğunlukta olur [15].

İzostatik presleme, hedeflenene yakın boyut ve şekillerdeki TM parçalarını üretmek için kullanılır. Geleneksel presleme veya kalıplamadan farklı olarak izostatik presleme, yağ, gaz veya su gibi bir basınçlı sistemde gerçekleştirilir.

İzostatik preslemenin faydaları:

- a) Karmaşık şekil kabiliyeti,
- b) En aza indirilmiş pahalı toz girişi,
- c) Azaltılmış malzeme kaybı (karmaşık şekil yapımında),
- d) Preslenmesi zor parçaları üretebilme,
- e) Genellikle bağlayıcıya ihtiyaç yoktur,
- f) Parçayı son şekil ve boyutuna yakın üretebilme,
- g) Homojen yoğunluk ve özellikler sıralanabilmektedir [17].



Şekil 2.9. Toz metal numune imalatında kullanılan metal kalıp [3]

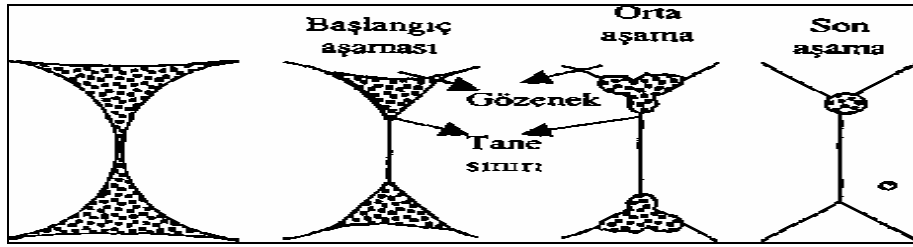
2.3.3. Sinterleme

Sinterleme, dayanımı artırma amacı ile toza veya sıkıştırılmış kütleye esas bileşenin ergime noktası altındaki bir sıcaklıkta uygulanan bir ısıtma işlemidir [14].

Sinterleme, yüksek sıcaklıklar kullanılarak preslenmiş ham sıkıştırılmış toz parçacıklarının birleştirilmesi işlemi olarak tanımlanır. Sinterleme süreçlerinde kullanılan sıcaklıklar genellikle sinterlenecek olan parçada katı hal atom yayınma ve ergime sıcaklığının altında seçilirse de özellikle çok sistemli alaşımlarda sıvı-faz sinterlenmesi olarak bilinen bir sıvı fazın varlığında da gerçekleşebilir. Toz parçacıkların yüksek yüzey enerjileri aşarak ya da ortadan kaldırılarak gerçekleşen sinterleme sonucu parçacıklar arasında tam ve mükemmel bağlar oluşur ki bu suretle içyapıdaki gözeneklilik sıfıra düşer. Hacim başına düşen yüzey enerjisi toz parçacık çapının tersi ile doğru orantılı olduğundan, küçük toz parçacıkları büyüklere kıyasla daha kolay sinterlenirler. Sinterleme işlemi kullanılırken sinterleme esnasında, birleştirme ve sıcaklık şartları istenilen özellikleri elde edebilmek için kontrol altında tutulur. Malzemenin sinterlenmesi esnasında birçok işlem basamakları da (Oksit indirgenmesi, bağlayıcıların kaldırılması veya kimyasal reaksiyonlar) meydana gelir. Mesela; Demirin sinterlenmesi esnasında, oksit indirgenmesi, yağlayıcıların dağılımı, karbon kaybı olması, sıcaklığa bağlı olarak azot çözünebilirliği ile değişir. Yüzeyin gazı dışarı atması (desorption) α 'dan γ fazına dönüşüm, 900 °C üzerindeki tane

büyümesi ve sıcaklığa bağlı olarak difüzyon artışı meydana gelir. Aynı zamanda boşluk morfolojisi değişir.

Sinterleme sırasında metalurjik bağların oluşumu ve gözeneklerin kapanması yayınmaya bağlı olarak Şekil 2.10'da görüldüğü gibi ilk, orta ve son aşamaları olan bir geometrik sıra takip eder [19].



Şekil 2.10. Sinterleme sırasında metalurjik bağların oluşumu ve gözeneklerin kapanması [14]

2.3.4. Sinterleme sonrası işlemler

Gözeneklerin doldurulması

Parçanın yapıldığı malzemenin sinterleme sıcaklığından daha düşük ergime sıcaklığına sahip metal ile gözeneklerin doldurulması esasına dayanır. Örneğin; demir esaslı alaşımlarda genellikle sinterleme esnasında bakır kullanılarak gözeneklerin dolması sağlanır. Gözeneklerin doldurulması, geçirgenliği azaltır ve mekanik özelliklerin iyileşmesini sağlar. Göz önüne alınması gereken bir konu da parça boyutlarında değişim görülmesidir. Bu işlemin diğer bir faydası da ısıtılma sırasında istenen tabaka kalınlığının hesaplanmasında porozite olmadığı için kolaylık sağlamasıdır [12].

Yağ emdirme

Sinterlenmiş parçaların korozyona karşı direncini artırabilmek için yağ veya metal olmayan maddelerin emdirilmesi yoluna gidilebilir. Kendinden yağlamalı yataklar

sadece TM metodu ile yapılabilir. Bu yataklarda porozitelerin içine yağ emdirilmek suretiyle yağlamasız yatak yapımı gerçekleştirilir [12].

Son ölçüye getirme ve baskı

Son ölçüye getirme ve baskı sinterleme sonrası uygulanan ilave presleme işlemleridir. Son ölçüye getirebilmek ve yüzey kalitesini artırabilmek için orta kuvvette presleme işlemi yapılarak, çok hafif plastik deformasyon sağlanır. Baskı işleminin iki amacı vardır; hem boyut hassasiyetini artırmak, hem de parça yoğunluğunu artırmaktır [12].

Buharla işlem

Sadece demir esaslı alaşımlara uygulanır, bunun için parçalar 550 °C sıcaklığa kadar ısıtılır ve sonra parça üzerine su buharı gönderilir, böylece parça üzerinde ve boşluklarında Fe₃O₄ oluşması sağlanır. Bu işlemle parçanın korozyon direnci, sertliği, aşınma direnci ve basma yüklerine karşı direnci artırılmış olur [12].

Tekrar presleme

Malzeme, mekanik ve manyetik özellikler açısından bir önem arz ediyorsa parçaya tekrar presleme işlemi uygulanır. Böylece istenen özelliklerin elde edilmesi sağlanır. Preslenmiş parçaların 700–800 °C'de ön sinterlenmesinde ilave edilen yağlayıcılar yanarak uzaklaşır ve parçada yeniden kristalleşme gerçekleşir. İşlem sırasında oluşan sertleşme ve iç gerilimler sonrası parçaya tekrar eski sünekliğinin ve yoğunluğunun daha fazla artırılması gerekir. Bu nedenle presleme yapılır ve parça bundan sonra sinterlenir [12].

Talaş kaldırma işlemleri

TM ile üretilmiş parçalar her ne kadar karmaşık şekilli ve hassas toleranslarda yapılabilirler de yine de bazı kısıtlamalar olabilir. Bu nedenle delme, talaş kaldırma,

diş açma gibi bazı talaşlı imalat metotlarının şekillendirme kalıpları üzerinde bulunması mümkün değildir. Sinterlenmiş parçalar için uygulanan işlem hızları aynı bileşimde dövme olarak imal edilmiş parçalara göre daha düşüktür. Bu nedenle işlem hızları seçilirken buna dikkat edilmesi gerekir.

Kesici takım ömrünün artırılması için tozların içine talaşlı imalatı kolaylaştırıcı MnS ilave edilir. Sinterleme sonrasında da yapıda bu katkılar kaldığı için talaşlı imalatı olumlu yönde etkiler [12].

Çapak alma

Çapak alma işlemi presleme sonrası parça üzerinde oluşan çapakların giderilmesi işlemidir. En genel uygulama tambur içinde aşındırıcı toz kullanarak yapılan çapak alma işlemidir [12].

Birleştirme ve montaj

Büyük ve karmaşık şekilli parçalar birleştirmek suretiyle gerçekleştirilebilir. Birleştirme için kullanılan yöntemler; difüzyonla birleştirme, sinter lehim veya lazer ile kaynaktır [12].

Isıl işlem

TM ile üretilmiş parçada faz dönüşümleri parça içindeki porozite ile değil, parçayı oluşturan tozların bileşimi ve homojen olması ile ilgilidir. Bu nedenle her türlü TM ile üretilmiş parçaya ısıtma işlemi uygulanabilir. Su verme ile sertleştirme ve temperleme işlemleri sonucu TM parça mukavemetinde, aşınma direncinde artış olurken sünekliğinde ise azalma görülür. TM ile üretilmiş parçalara genellikle karbürleme, karbonitrürasyon gibi yüzey sertleştirme işlemleri uygulanır [12].

Yüzey kaplama işlemi

Eğer malzemenin korozyona karşı daha dirençli olması isteniyorsa elektroliz ile yüzey kaplaması yapılabilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta elektrolitin TM parçanın boşluklarına girerek olumsuz etkilere neden olmasını engellemek için porozitenin daha önce bahsedildiği gibi gözeneklerin doldurulması gerekir [12].

2.4 Toz Metalurjisi Uygulama Alanları

Çağın ekonomik dengeleri iletişim, yeni malzeme, biyoteknoloji, nükleer, uzay ve havacılık teknolojileri olmak üzere beş teknoloji üzerine kurulmuştur. Yeni veya ileri malzeme teknolojisi, aslında diğer teknolojilerin de temelidir. Çünkü bütün teknolojilerin gelişmesi, yeni üretilen malzemelerin özellikleri ve performansı üzerine kurulmuştur. Diğer teknolojilerle de iç içe olan malzeme teknolojisindeki başlıca atılım, doğal kaynaklarla rekabet eden sentetik malzeme kaynaklarının bulunmuş olmasıdır. Maddenin moleküler yapıda kontrolü sayesinde yeni özellikleri olan malzemeler gündeme gelmektedir. Yeni veya ileri malzeme teknolojisinin de temeli toz metalurjisidir. Çünkü pek çok özelliklere sahip sentetik malzeme üretimi ancak metal tozlarının karışım teknolojisi ile mümkün olmaktadır [18].

TM parçaları; otomobillerin hareket sistemleri, çamaşır makineleri, güç makineleri, spor malzemeleri, fotokopi makineleri, yol ekipmanları, av malzemeleri, hidrolik sistemler, x ışınlarının korunma sistemleri, petrol ve gaz kuyularının kapama sistemleri ile kasetçalar gibi pek çok yerde kullanılmaktadır. İmalat endüstrisinde kullanılan TM parçaları büyük ölçüde demir, çelik ve alaşımları, bakır ve bakır esaslı alaşımlar (Prinç, tunç ve nikel, gümüş), alüminyum, paslanmaz çelik, nikel ve kalay esaslı tozlardan elde edilen alaşımlardır [19].

Dünya çapında üretilen tüm metalik tozlardan imal edilen sinter parçaların pazar paylarının en büyük kısmı, % 86 ile demir-çelik esaslı sinter parçalar almaktadır. İkinci sırada % 11 pazar payı toplamı ile bakır ve bakır esaslı sinter parçalar, üçüncü sırada % 0,6 ile alüminyum takip eder [15].

2.5. Toz Metalurjisi Avantajları

- a) İşlemeyi (talaş kaldırma) en aza indirir,
- b) Yakın toleranslar ve düzgün yüzeyler elde edilir,
- c) Yoğunluk ve ergime noktalarındaki farklılıklardan dolayı başka yollarla imkânsız olan alaşım ve karışımların veya karmaşık parçaların üretimi mümkündür,
- d) Metal olmayan malzemeler, metal asıllı ürünlerin içinde ince ve homojen şekilde dağıtılabilir,
- e) Isıl işleme mukavemeti veya aşınma direnci yükseltilebilen malzemeler sağlanabilir (Gözeneklere arzu edilen yağlayıcı maddeler emdirilebilir) [17].

2.6. Toz Metalurjisi Dezavantajları

- a) İlk yatırım (takımlar, presler ve sinter teçhizatı) oldukça pahalıdır. Seri üretim yapılmazsa amortisman değerleri yüksektir,
- b) Metal tozların maliyeti, ingot halinde üretilen malzemelerden daha yüksektir.
- c) Toleranslar talaşlı işlemlere göre daha kabadır,
- d) Tozların kalıp içinde akışkanlığı sınırlıdır. Bu nedenle yapılacak parçanın şekli kısıtlayıcı bir faktör olabilir [17].

3. KATI HAL KAYNAK TEKNİKLERİ

Günümüzde, ileri teknolojinin uygulandığı gelişmiş makine elemanlarının kaynaklı birleştirmelerinde faz dönüşümleri ve plastik deformasyon istenmeyen durumlardır. Bu olumsuzlukları gidermek, ancak malzemelerin mekanik ve metalurjik özelliklerini etkilemeyecek kadar düşük sıcaklıklarda yapılan birleştirme işlemleri ile mümkündür. Örneğin: metal matrisli kompozitlerle seramiklerin, metal bir malzeme ile metal olmayan bir malzemenin birleştirilmeleri birçok durumda gerekli olmaktadır. Ayrıca birçok otomobilin motor parçalarında seramiklerle metaller bir arada birleştirilmiş şekilde kullanılmaktadır. Bu örneklerde de olduğu gibi malzemelerin düşük sıcaklıklarda birleştirilmeleri dizayn ve konstrüksiyon açısından gereklilik arz etmektedir. Sözü edilen malzemelerin ergitmeli kaynak yöntemleri ile birleştirmek zor ve bazen imkânsızdır. Bu tekniklerin uygulanması, yüksek bilgi ve teknoloji gerektiren katı hal kaynak teknikleri ile mümkündür. Ergitmesiz kaynak yönteminde metalik malzemeler ergitilmeden, malzemelerin ergime sıcaklıklarının altında bir sıcaklıkta malzeme katı haldeyken birleşme sağlanmaktadır [6].

Bu bölümde katı hal kaynak tekniklerinden;

1. Sürtünme kaynağı,
2. Ultrasonik kaynağı,
3. Difüzyon kaynağı,
4. Sürtünme karıştırma kaynakları hakkında bilgiler verilecektir.

3.1. Sürtünme Kaynağı

Sürtünme kaynağı uzun yıllardan beri bilinmesine rağmen teknolojisi ve uygulamaları son zamanlara dayanmaktadır. Sürtünme kaynağı, uçak ve uzay sanayi parçaları, kesme takımları, ziraat makineleri, otomobil parçaları, petrol yatağı malzemeleri, çöp bidonları, askeri ekipmanlar, miller, bimetallik malzemeler ve diğer özel uygulamalarda kullanılmaktadır. Sürtünme kaynak yöntemi ile farklı ve aynı özellikteki malzemelerin kaynağında tam ergime oluşmadan birleşmeyi sağlayarak bir avantaj oluşturmaktadır.

Sürtünme kaynağı, elektrik enerjisi veya diğer kaynaklardan ısı enerjisi uygulanmadan iş parçasının yüzeyleri arasındaki mekanik dönme hareketinin ısı enerjisine dönüşmesiyle kaynak için gerekli ısının elde edilerek yapıldığı bir katı hal kaynak tekniğidir. Sürtünme kaynağı, ara yüzey kaynak sıcaklığına ulaşana kadar sabit bir iş parçasıyla dönen bir iş parçasının sabit veya belirli olarak artan basınç altında yapılır ve sonunda dönme durdurularak kaynak tamamlanır. Sürtünme ısısı iş parçasının ara yüzey sıcaklığını hızla arttırarak ergime derecesinin altında bir değere getirir ve plastik sıcaklık oranında ısınan bölgeye uygulanan basıncın etkisi altında birleştirme meydana gelir [20,21].

Katı hal birleştirme tekniklerinden olan sürtünme kaynağında birleştirme, ergimeye bağlı olmadan, birleştirilecek parçaların ara yüzeylerinde meydana gelir. Sürtünme kaynağı üç aşamada gerçekleşir. Birinci aşamada malzeme ara yüzeyleri düşük yük altında temas haline getirilir ve deformasyon işlemi sürtünme aşınması ile yönlendirilir. İkinci aşamada uygulanan yükler yavaşça arttırılır, kaynaklanacak parçaların ara yüzeyleri boyunca önemli ölçüde sürtünme ısısı oluşur ve gerilme sertleşmesi ve yumuşaması işlemlerinin bir değerine ulaşılır. Üçüncü aşamada ise sürtünme ısısı üretimi sona erer, kaynaklanacak parçaların ara yüzeylerinin her iki tarafında ısınan malzemeye uygulanan gerilme arttırılır ve çapaklar alınır [22]. Yöntemin başlangıcından bitimine kadar ara yüzey basınç altındadır. Kaynak esnasında uygulanan basınç; sabit parça, hareketli parça veya dönen her iki parça tarafından sağlanılır [23].

Sürtünme kaynağı işlemi esnasında genelde sıcaklık arttığında kaynatılmakta olan malzemenin akma mukavemeti düşer. Sürtünme kaynağında yüzey tabakaları kırılıp atıldığında önemli bir plastik akma olur. Sonuçtaki bölgesel ergimenin başladığı sıcaklığa ulaşır. Bu olayların hepsi saniyeler içerisinde meydana gelir. Bütün ergitme kaynakları kalıntı gerilmelerin üretilmesine sebep olmaktadır. Bu gerilmeler malzemenin ergime sıcaklığından daha düşük sıcaklıklardaki ısıl çevrimlerden kaynaklanmaktadır [22].

3.1.1. Sürtünme kaynak çeşitleri

Sürtünme kaynağıyla parçaları birleştirmenin üç metodu vardır.

Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı

Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı doğrudan sürtünme kaynağı olarak da bilinmektedir. Gerekli olan enerji sürekli bir tahrik grubu tarafından sağlanır. Parçalardan biri motor ünitesine bağlanır ve sabit bir hızda döner, diğer parça aksel bir basınçla temas ettirilir. Yeterli derecede ısı girdisi sağlandığında dönme frenleme etkisiyle mümkün oldukça kısa sürede durdurulur. Kaynak kuvveti yığma basıncıyla artırılır ve numune soğumaya bırakılır. Bu yöntem genellikle Avrupa'da kullanılmaktadır [23,24].

Volan tahrikli sürtünme kaynağı

Volan tahrikli sürtünme kaynağı, atalet kaynağı olarak da bilinmektedir. Parçalardan biri volana bağlanır. Volan belirlenen hızda ivmelendirilir. Böylece dönme enerjisi bu volan üzerinde toplanmış olur ve sürtünme kaynağının kendi kendine frenlemesiyle parçaya iletilir. Kaynak kuvveti aksel olarak uygulandığında dönmesi serbest bırakılan parça diğer parça ile döner ve volan enerjisi parça ara yüzeyinde sürtünmeye harcanır. Volan hızı azalırken, kaynak bölgesi ısınır ve ısı yayılır. Volan tamamen durdurulduktan sonra basınç etki ettirilir. Bu yöntem özellikle A.B.D.'de uçak ve uzay sanayiinde kullanılmaktadır [21,23].

Kombine kaynak yöntemi

Kombine kaynak yöntemi volan tahrikli sürtünme kaynağıyla, sürekli tahrikli sürtünme kaynağının ortaklaşa kullanıldığı bir yöntemdir. Büyük kapasiteli parçaların birleştirilmesinde kullanılır. Volan tahrikli sürtünme kaynağının da sürekli tahrikli sürtünme kaynağına göre avantajları aşağıda verilmiştir. Bunlar;

1. Daha dar bir ITAB oluşur.
2. Daha seri üretim yapılır.
3. Daha düşük güç gerekir.
4. Daha basit ekipman gerekir [23].

3.1.2. Sürtünme kaynağının avantaj ve dezavantajları

Sürtünme kaynağının belli sınırlamaları olduğu gibi, bilinen diğer kaynak işlemlerine göre daha fazla avantajlara sahiptir. Sürtünme kaynağının avantajları:

- a) Flux (Erimeyi kolaylaştıran malzeme) dolgu malzemesi ve koruyucu atmosfere gerek yoktur.
- b) Elektrik gücü ve toplam enerji gereksinimi diğer kaynak işlemlerinin sadece küçük bir oranı kadardır.
- c) İşlem diğer kaynak işlemlerine nazaran daha temizdir. Çok az atık vardır. Ark, gaz çıkışı oluşmaz.
- d) Isıdan etkilenmiş olan alan çok dardır ve gözenek ölçüsü ana malzemenin gözenek ölçüsünden daha küçüktür [23].

Sürtünme kaynağı uygulamalarında görülen bazı sınırlamalarda aşağıdaki gibidir;

- a) İş parçalarından birinin kaynak yüzeyi yuvarlak (silindirik) veya silindire yakın olmalı, tutulabilir ve döndürülebilir büyüklükte olmalıdır.
- b) İş parçaları torka, ısınmaya ve birleştirme esnasındaki eksenel basınca dayanıklı olmalıdır.
- c) İş parçalarını tutan cihazlar ağır şok ve tork yüklerine dayanacak güçte olmalıdır.
- d) Geleneksel sürtünme kaynağı, açısal birleşimler için pahalı değişikliklerin yapılmasını gerektirir [24].

3.1.3. Sürtünme kaynağı yapılabilen malzemeler

Birçok metalik malzeme ve alaşımlarının sürtünme kaynağı için uygulamaları ve

deneylerle elde edilmiş verileri mevcuttur. Sürtünme kaynağının özelliği, ergitme kaynağı yöntemlerinin uygulanamadığı malzeme ve malzeme bileşimlerinde de başarıyla kullanılmasıdır. Diğer kaynak yöntemleri için kaynağa uygunluğunu belirleyen kriterler, sürtünme kaynağı için her zaman kullanılmaz. Bunun nedeni, birleştirme sıcaklığının düşük, kaynak süresinin kısa ve birleştirmenin bir kuvvet altında yapılmasıdır. Buna örnek olarak çeliğin alüminyum ve bakır ile toz metalurjisi ile üretilen parçaların ve seramiklerin alüminyum ile sert ve ağır metallerin diğer metallerle sürtünme kaynağı yöntemiyle yapılan birleştirmeleri gösterilebilir [25].

3.2. Ultrasonik Kaynak

Ultrasonik kaynak yönteminde parçalar, ultrasonik alandaki mekanik titreşimler ve hafif bir basınç yardımı ile birleştirilir. Bu amaçla bir elektro-akustik dönüştürücüden yararlanılır. Bu dönüştürücüde değişken bir elektrik akımı bir nikel alaşımının manyeto-striktif etkisi yardımı ile aynı frekanstaki boyuna mekanik titreşimlere çevrilir.

Bu yöntemle, yumuşak metallerden (alüminyum, altın) ince sacların, folyoların veya tellerin (kalınlık 0,03–2 mm), daha kalın çelik, demir dışı metaller, cam veya seramik gibi malzemeler üzerine kaynağı yapılır. Sert ve tabakalar halinde kırılan bir oksit tabakasına sahip alüminyum bu yöntem için çok uygundur. Ultrasonik kaynak bu malzemelerin dışında diğer birçok metal kombinasyonlarının birleştirilmesinde de kullanılabilir.

Ultrasonik nokta kaynağı ile sıcaklığa dayanıklı yan iletken kontaktlar (silisyum üzerine alüminyum veya altın tel altın kaplanmış kontaktlar üzerine alüminyum tel) büyük sayılarda seri olarak üretilirler. Folyo haddehanelerinde alüminyum folyo bobinleri birbirleriyle ultrasonik dikiş kaynağı yardımıyla birleştirilerek kesintisiz bantlar elde edilir [25].

3.3. Difüzyon Kaynağı

Difüzyon kaynağı, özellikle uzay ve nükleer enerji alanında geniş çapta kullanılan bir kaynak yöntemidir. Prensibi çok eskiden beri bilinmesine rağmen, uygulanması ancak son otuz yıl içerisinde olmuştur.

Difüzyon kaynağı, birbirleri ile temasta olan yüzeyler arasında minimum makroskopik deformasyon ile belirli bir süre ısı ve basınç uygulayarak kontrollü difüzyonla oluşturulan katı hal kaynağıdır. Bu tanımdan görüleceği gibi difüzyon kaynağının birinci aşaması, birleştirilecek parçaların genelde bir vakum ortamında ısıtılması ve basma kuvvetinin uygulanmasıdır. İkinci aşamada ise metal atomlarının bir parçadan diğerine yayılması ve kuvvetli bir bağın oluşmasıdır. Bazı hallerde ince bir metal ara tabakada kullanılmaktadır.

Bir difüzyon kaynak donanımı, birleşme için gerekli basınç sağlayacak bir pres ve baskı ünitesi çoğunlukla mekanik veya hidrolik bir pres, parçaların bölgesel veya tamamen ısınmasını sağlayacak yüksek frekanslı indüksiyon ısıtma veya direkt direnç ısıtma ünitesi, vakum veya koruyucu gaz ortamı ve parçanın birleşme işleminin gerçekleştirildiği bir kaynak kamarasından oluşur.

Difüzyon kaynağında ana parametreler zaman, sıcaklık ve basınçtır. Kaynak genellikle, düşük basınç, yüksek sıcaklık ve diğer katı hal kaynak yöntemlerine göre daha uzun sürede yapılır. Yöntemi etkileyen bu üç esas değişkenin yanında, birleştirilecek parçanın yüzey temizliği metalurjik etkenler ve bir ara tabakanın kullanılmasının da göz önünde tutulması gerekmektedir.

Difüzyon kaynağında sıcaklık; deformasyonu, oksit çözünürlüğünü, allotropik dönüşümleri, yeniden kristalleşmeyi ve difüzyon işleminin kısa sürede yapılmasını etkilediğinden, en önemli parametredir. Aynı cins metallerin birleştirilmesinde işlem sıcaklığı $0,7 T_{ergime}$ olarak alınır. Genelde işlem sıcaklığı $(0,5-0,7) T_{ergime}$ alınmaktadır.

Difüzyon kaynağında zaman, bağımlı bir işlem parametresidir. Özellikle sıcaklıkla ilişkilidir. Birkaç saniyeden birkaç saate kadar değişebilir. Üçüncü önemli değişken basınçtır. Belirli sıcaklık-zaman değerleri için yüksek basınç iyi birleştirmeler sağlar. Çok yüksek basınç kullanıldığında, fazla deformasyondan ötürü yüzey bozulmalarına neden olmakta ve pahalı donanımlara gerek duyulmaktadır.

Birleştirilecek yüzeylerdeki bütün pislikler, yağlar ve oksitler, bir ön hazırlık işleminden geçirilerek temizlenmelidir. Yüzeylerin ısınma esnasında artan ortam şartlarından etkilenmemesi için vakumlu soy gaz veya redükleyici bir ortamda çalışılmalıdır. Kaliteli bir yüzeyin sağlanması için taşlanma yapılabilir ve çok hassas hazırlanmış yüzeyler de maliyeti arttırır. Birleştirilecek parçalardaki allotropik dönüşümlerin, beraberinde bir hacim değişikliği getirdiği, bunun da ölçü hassasiyetinin korunması ve sağlam bir bağ elde etmek için unutulmamasının gerektiği bilinmelidir.

Difüzyon kaynağının uygulanmasında özellikle farklı metal veya alaşımlarının birleştirilmelerinde bir ara tabaka kullanılır. Ara tabakalar kaynak alanındaki heterojenliği minimuma indirir ve birleştirmenin oluşumunu kolaylaştırır. Ara tabakalar ince folyolar şeklinde olduğu gibi püskürtme veya elektrolitik kaplama şeklinde de olabilir.

Difüzyon kaynağında işlemin düşük sıcaklıklarda yapılması, birleştirilecek parçalardaki deformasyonun çok azalması ve çok değişik malzeme çiftlerinin birleştirilmesi, donanımlarının basitliği bu yöntemin avantajıdır. İşlemin yavaş oluşu, büyük parçalara uygulanmasının zorluğu ve tahribatsız kontrol olanağının da sınırlı olması dezavantajlarını teşkil eder.

Alüminyumun difüzyon kaynağında, inatçı yüzey oksitleri yüzünden güçlükler meydana gelmektedir. Ancak basınç ve sıcaklığın yüksek tutulması ile bu oksit tabakasını kırmak mümkün olmaktadır [25].

3.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Tez çalışmasının konusu olan sürtünme karıştırma kaynağı 5. bölümde detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

4. TOZ METAL MALZEMELERİN KAYNAKLANABİLİRLİĞİ

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen parçalar genellikle ilave işlemlere gerek duyulmaksızın kullanıma sunulurlar. Ancak gerektiği durumlarda talaşlı işlem ve kaynaklı birleştirme işlemleri uygulanmalıdır. Bundan dolayı son yıllarda TM parçaların farklı işlem şartlarında talaşlı işlenebilirliği ve kaynak kabiliyetinin araştırılmasına ağırlık verilmektedir [26].

Malzeme üretimindeki gelişmeler farklı uygulama alanları için farklı malzemeler geliştirilmesini sağlamıştır. Malzeme üretimindeki bu gelişmeler toz metal malzemeleri hadde ve döküm yoluyla üretilen makine parçalarının sağlayamadığı bazı özellikleri sağlaması ile avantajlı kılmıştır. Bu avantajlar; üretimde ki ekonomiklik, üretimi zor alaşımları elde etme ve karmaşık geometrik şekilli parçaların imalat kolaylığı, yoğunluk kontrollü malzeme üretimi gibi özelliklerdir. Bunun yanında toz metal malzemelerin kaynaklanabilirliği ve talaşlı işlenebilirliği diğer malzeme türlerine göre aynı yeteneğe sahip değildir [1].

Toz metal parçalar; metal tozlarının basınç altında preslenmesi ve daha sonra sinterlenmesi ile elde edilmektedir. Dolayısıyla metal tozlarıyla elde edilen toz metal parçalar uygulanan basınca, toz şekline ve boyutuna bağlı olarak çeşitli yoğunluklarda olabilmektedir. Ancak demir tozları ile elde edilen toz metal parçaların yoğunluğu $7,8 \text{ gr/cm}^3$ 'e ulaşamaz. Günümüzde özel tekniklerin uygulanması ile % 99,99'a varan yoğunluklarda parçalar üretilebilmektedir. Bu yüzden toz metal parçalarda porozite (gözenek) söz konusudur. Bu porozitenin istendiği filtre gibi üretim uygulamalarında aranan bir özelliktir [3].

Toz metal parçaların kaynak işlemi ile birleştirilmesi problemlidir ve bu durum kaynak parametrelerinin ön plana çıkmasına neden olmaktadır. Kaynak parametrelerinin uygun şartlarda olmaması durumunda toz metal parçalarda; çatlama, dağılma, çökme veya hiç birleşmeme gibi sorunlarla karşılaşılabilir. Ergitme esaslı kaynak yöntemlerinde kaynak bölgesinde tamamen, ısı etkisi altındaki bölgede kısmen toz metal parça özellikleri kaybolmaktadır. Porozitenin önemli olduğu

yerlerdeki birleştirmede; ergitme kaynak metodu yerine difüzyon kaynağı gibi yöntemler kullanılmalıdır [3].

TM parçaların kaynak kabiliyetini etkileyen faktörler üretim yönteminin kendi karakteristiklerine yakından bağıdır. TM parçaların kaynak kabiliyetini etkileyen en önemli karakteristik gözeneklerin varlığıdır [5,27].

Gözenek miktarı ve gözenek dağılımı mekanik özelliklerin yanı sıra ısı iletkenlik, ısı ıl genleşme ve sertleşebilirlik özellikleri üzerinde de etkili olmaktadır. Kaynak işleminde ısı ıl özellikler, kaynak dikişı, ITAB, kaynak banyosunun büyüklüğü, kaynak parametrelerinin değışmesine neden olmaktadır. Bu tür parçaların ısı ıl iletkenliklerinin tam yoğun malzemelere göre daha düşük olması kaynak bölgesinde ısı yığılmasına neden olacaktır. Kaynak esnasında bölgesel ergime ile gözeneklilik azalır. Bu durum ITAB bölgesinde çatlak ihtimalini artıracaktır. Gözenek oranının kaynak bölgesi, ITAB ve ana metalde farklılık göstermesi sertleşebilirlik farkının oluşmasına ve ITAB’da çatlak meylinin artmasına neden olur [5].

4.1. Toz Metal Malzemelerin Özellikleri

Toz metal malzemelerin birleştirilmelerinde farklılığa sebep olan en önemli özellik bu malzemelerin gözenekliliğıdir. Gözenek hacmi veya nisbi yoğunluk birçok önemli özellikleri dolayısıyla bu özellikler de birleştirme ve kaynak karakterini etkilerler. Bu özellikler şöyle sıralanabilir [1].

4.1.1. Isıl iletkenlik

Isıl iletkenliğı malzeme içinde ısı transferi olarak da tanımlayabiliriz. Isı transferi malzemenin özelliğinin dışında, gözenek miktarına da bağıdır. Fazla miktardaki gözenek ısı transfer mekanizmasını değıştirir ve kaynak parametrelerini de etkiler [1].

4.1.2. Sertleşebilirlik

Sertleşebilirlik, malzemelerin ısı iletkenliğine veya ısının malzeme içinde dağılımına bağlıdır. Gözenekler ısı yalıtkanlık yaparlar ve ısı transferini yavaşlatırlar. Böylece toz metal malzemelerin benzer yapıdaki hadde malzemelere göre daha az sertleşmesine sebep olurlar. Isı tesiri altında kalan bölgede potansiyel yoğunluktan dolayı sertleşebilirlikte bir artış olur. Buda kaynak bölgesinde çatlama riskini artırır [1].

4.1.3. Gözeneklilik

Kaynak sırasında içerde kalan oksit ve impürütelerden dolayı kaynak performansında dalgalanmalara sebep olur [1].

4.2. Kaynak Öncesi Alınması Gereken Önlemler

Toz metal malzemelerin kaynağından önce kaynak bölgesindeki gözenek içinde kalma ihtimali olan aşağıdaki elementlerin elimine edilmesi için önlemler alınmalıdır [1].

- a) Yağlayıcı kalıntıları,
- b) Soğutma yağı veya sıvısı,
- c) İstenmeyen kalıntılar,
- d) Temizleme kalıntıları,
- e) Serbest grafit.

4.3. Toz Metal Malzemeleri Birleştirme Teknikleri

Uygun bir dizayn ile toz metal parçaları kaynakla birleştirmek mümkündür. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli noktalar; dizayn, malzeme seçimi ve birleştirme tekniğidir. Öncelikle birleştirme yapılacak parçalardaki amaçların ne olduğunun

anlaşılmış olması gerekir. Bunlar dayanım ihtiyacı, boyut sınırları, çevresel faktörler, görünüm ve ekonomiktir.

Diğer metalik malzemelerin birleştirilmelerinde olduğu gibi toz metal malzemelerin birleştirilmelerinde de ergitmeli ve ergitmesiz kaynak yöntemleri başarılı bir şekilde kullanılabilir. Düşük yoğunluklu ($<6,5 \text{ g/cm}^3$) toz metal parçaların kaynağında ergitmesiz birleştirme yöntemleri başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Orta ve yüksek yoğunluklu ($>7,0 \text{ gr/cm}^3$) toz metal parçaların kaynağında ergitmeli kaynak yöntemleri kullanılabilir [1].

4.3.1. Ergitmesiz birleştirme yöntemleri

Difüzyonla birleştirme

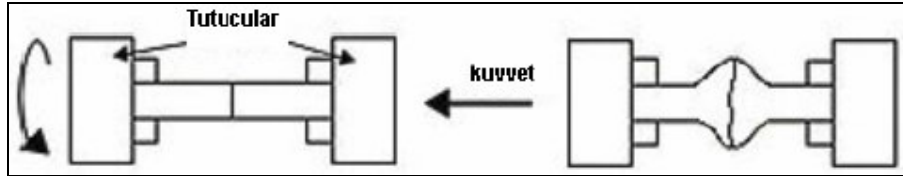
Difüzyonla birleştirme işlemi metalleri birleştirme için kullanılan en eski yöntemlerden biridir. Çok eski bazı mücevherler bu şekilde üretilmişlerdir. Ancak endüstriyel uygulamaları yakın bir geçmişte başlamıştır. Son yıllarda iyice hız kazanmış durumdadır. Difüzyonla birleştirme; difüzyon kaynağı, difüzyon lehimlemesi ve sinler birleştirme olarak üç şekilde uygulanır.

Bölüm 3.3'te geniş olarak anlatıldığı gibi difüzyon kaynağı vakum veya koruyucu atmosferde yapılır. Birleştirilecek parçalara $0,7-10 \text{ N/mm}^2$ lik bir basınç ile malzemelerin ergime derecelerinin yarısının üzerinde bir sıcaklık uygulanır. Difüzyon kaynağında yüzey hassasiyeti önemlidir. Yüzey hassasiyeti arttıkça temas alanı artacağından atomik geçiş de artar. Difüzyon lehimlemesi; birleştirilecek parçalar arasına ergime derecesi düşük bir folyo metal konularak, ara yüzeyde folyonun ergimesi ile bir sıvı meydana getirilerek uygulanır [1].

Sürtünme kaynağı

Sürtünme kaynağında; birleştirilecek parçalar belli bir yük altında bir araya getirilir ve parçalardan birisi döndürülmeye başlanır (Şekil 4.1). Temas yüzeylerinde

sürtünmeye bağlı ısı ortaya çıkar. Birleşme bölgesi artan sıcaklıkla yeterli plastikliğe ulaşınca döndürme işlemi durdurulup, yığma basıncı uygulanarak birleşme işlemi gerçekleştirilir [1].



Şekil 4.1 Sürtünme kaynağı [28]

Ultrasonik kaynak

Ultrason kaynağı; ince teller ile mikro döngülü levhaların birleştirilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Birleştirilecek parçalar bir örs üzerinde sıkıştırılır ve yanıl olarak 10–75 Hz.’lik bir frekansta ultrasonik trans-duser ile titreşime maruz bırakılır. Ara yüzeydeki oksitler titreşim etkisi ile dağılarak metal-metal teması sağlanır ve birleştirme işlemi gerçekleştirilir [1].

Direnç kaynağı

Toz metal parçalarının birleştirilmesinde en çok kullanılan bir yöntemdir. Akım geçişine karşı oluşturulan direnç malzemenin yüzeyini ısıtır ve kaynak formuna getirir. Homojen bir kaynak için birleştirme yüzeyleri temiz ve gözeneksiz olmalıdır. İyi bir sonuç için akım ve basınç gibi parametreler önceden ayarlanmalıdır [1].

4.3.2. Ergitmeli birleştirme yöntemleri

Gaz metal ark (MIG-MAG) kaynağı

Toz metal parçaların kaynağında özellikle kısa devre geçiş türü ile kaynak uygun olmaktadır. Çünkü kısa devre geçişte ısı girdisinin düşük olması ısı tesiri altında kalan bölgede distorsyonu azaltmaktadır. Sinterlenmiş çelik malzemelerin

kaynağında CO₂ gazı ile 0,8–1,0 mm çaplı yumuşak çelik tel elektrod kullanılır. Bununla birlikte yüksek karbonlu çeliklerde ITAB'daki çatlamları azaltmak için östenitik paslanmaz çelikler kullanılır [1].

Gaz tungsten ark (TIG) kaynağı

Bu yöntem birçok birleştirme işleminde uygun sonuçlar vermiştir. Kaynak hızı, ısı girdisi, dolgu metalinin tipi kontrol edilebilmektedir. Bu nedenle yüksek karbonlu ve sertleşebilirliği yüksek olan malzemeler bu yöntem ile kaynak edilebilirler. Bu yöntemle kaynak edilmiş toz metal parçalar daha yüksek ve daha dengeli bir dayanım değeri göstermişlerdir [1].

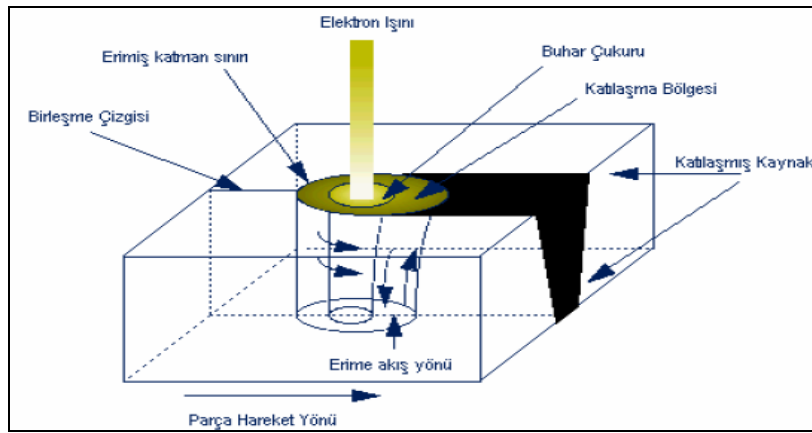
Elektron ışın kaynağı

Elektron ışın kaynağı çok dar bir alana yüksek yoğunluklu elektron ışınlarının yönlendirilmesi ile elektronların enerjilerini kaybederken açığa çıkan ısıdan faydalanılarak yapılan bir kaynak yöntemidir [1].

Elektron demetinin sahip olduğu kinetik enerjinin kaynak yapılacak parçaların küçük bir bölgesinde yoğunlaştığı için, kaynak bölgesinde enerji yoğunluğu 10⁸ W/cm² değerine erişebilmektedir. Bu yöntemde kaynak işlemi yüksek vakum, düşük vakum ve vakumsuz ortamda yapılmaktadır. Elektron ışın kaynağı ile kaynak yapılacak parçalar genellikle ilave metal kullanılmaksızın birleştirilirler ve birleştirilecek iki parçanın arasındaki boşluğun 10⁻² mm'den daha fazla olmaması gerekmektedir [26].

Elektron ışın kaynağında kaynak dikiş formu diğer yöntemlere göre farklıdır. Bu yöntemde, kaynak dikişinin (Derinlik/genişlik) (25/1) oranı yüksektir. Bu durum kalın parçaların tek pasoda kaynak yapılmasını sağladığı gibi kaynak banyosunun küçük olmasına neden olmaktadır [26]. Bunun sonucu kaynak yapılan parçanın birim uzunluk başına ısı girdisi diğer kaynak yöntemlerine göre düşüktür. Dolayısıyla dar kaynak bölgesi, daha az distorsyonu ve hatasız kaynak imkânı ortaya çıkmaktadır [29].

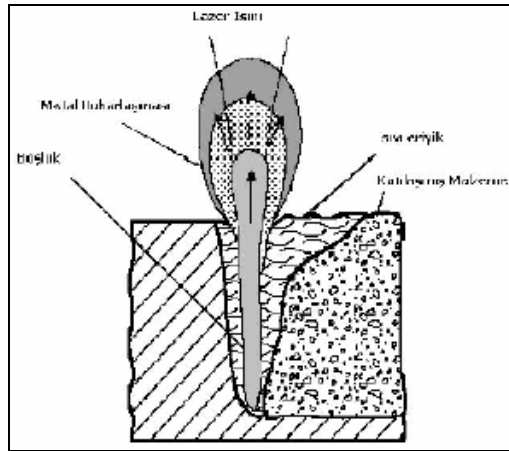
Tam yoğun malzemelerin elektron ışın kaynağında yüksek derinlik/genişlik oranı kaynak dikişinde gözenek ve kök kısmında boşluk oluşumuna neden olmaktadır. TM parçalarda bu durum büyük problemlere neden olabilir. Ayrıca ışınların odaklandığı bölgede yüksek sıcaklığın etkisiyle alaşım elemanlarının buharlaşması ortaya çıkabilir. Bu durum kaynak bölgesinde kimyasal kompozisyon farklılıklarına neden olacaktır [26]. Yüksek yoğunluklu toz metal paslanmaz çeliklerde elektron ışın kaynağı başarılı bir şekilde kullanılabilir [1].



Şekil 4.2 Elektron ışın kaynağı [28]

Lazer kaynağı

Bir dereceye kadar elektron ışın kaynağına benzer. Bu işlem; birleşme ara yüzeyine lazer ışığının odaklanması ile metalin kısa sürede buharlaşma sıcaklığına ulaşması esasına dayanır. Genellikle He gibi koruyucu gazla CO₂ lazeri kullanılır. Kaynak sırasında ilave metal kullanmak mümkün olmakla birlikte yüksek yoğunluklu parçalarda ilave metale gerek duyulmaz, ilave metal gerekip gerekmemesinde birleşme dizaynının büyük önemi vardır. Bu işlem EIK (Elektron Işın Kaynağı)'ya benzer, kaynak bölgesinin yakınında ergime-yeniden katılmanın meydana getirdiği kendini çekme olayının az olmasından dolayı önemlidir [1].



Şekil 4.3 Lazer kaynağının şematik görünüşü [16]

5. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

Yeni geliştirilmiş malzemeler genellikle modern birleştirme tekniklerine ihtiyaç duyarlar. Son yirmi yılda alaşımların geliştirilmesinde bu malzemelerin kaynağı ile ilgili büyük ilerlemeler olmuştur. 1990'ların başında geliştirilen bir katı hal kaynak yöntemi olan SKK, geleneksel ergitmeli kaynak yöntemleriyle kaynağı güç olan özellikle yaşlanma sertleştirilmesine tabi tutulmuş alüminyum alaşımlarının kaynağında başarıyla kullanılmıştır [30]. Bir katı hal birleştirme işlemi olan sürtünme karıştırma kaynağı, kaynak konstrüksiyonu güç olan malzemelerin birleştirme işlemleri için kısa kaynak süresi, minimum yüzey hazırlama ve otomasyon kolaylığı gibi kendine özgü avantajlarından dolayı uygun bir alternatif kaynak yöntemidir [31].

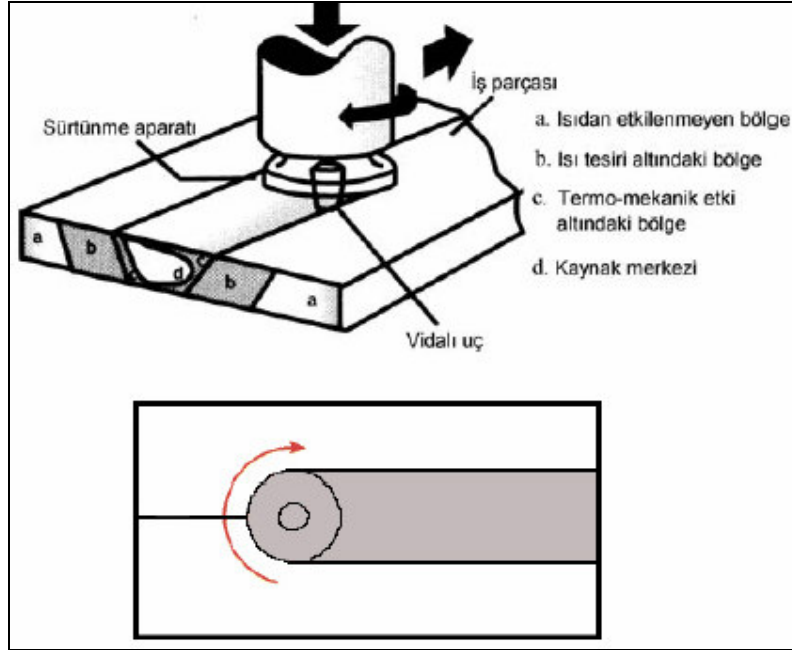
Yöntemin uygulanması sırasında duman ve ışıın oluşmaması, koruyucu gaz, toz ve ilave tele gereksinim duyulmaması, kaynak ağzı hazırlığı gerekmemesi, tüm pozisyonlarda kaynak yapılabilmesi olanağının bulunması ve otomasyona da yatkınlığı gibi daha birçok üstünlüğün bulunması, yöntemin uygulama alanlarını daha da genişletmektedir [32].

5.1. Kaynağın Uygulanışı

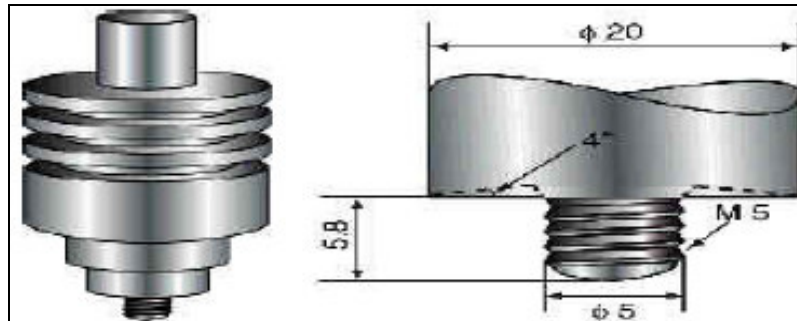
Sürtünme karıştırma kaynağının uygulanışı Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Yöntemin uygulama aşaması iki farklı şekilde olabilir. Parçaların hareketi söz konusu olabileceği gibi, takımın dönme ve ilerleme hareketi de mümkün olmaktadır [33].

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi, sürtünme kaynağından türetilmiştir. Kaynak edilen parçalar ergimezler bu yüzden yöntem katı faz kaynağı olarak adlandırılır. Bu kaynak yöntemi alın altına sabitlenmiş iki levhaya yüksek devirde dönen omuzlu bir ucun (probe) daldırılarak kaynak yapılmak istenen uzunluk boyunca belirli bir hızda ilerletilmesinden ibarettir. Şekil 5,2'de yöntem için kullanılan ve özel olarak tasarlanmış uç görülmektedir. Uç, malzemelere temas ettiğinde sürtünme kaynağındaki duruma benzer bir durum oluşarak temas noktasında ısı, sürtünmenin

de etkisiyle hızla artar ve malzemelerin plastik değişimine neden olur. Bu değişim malzemelerin akışını sağlar ve birleşme olayı gerçekleşir [34].



Şekil 5.1. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin prensibi [36]



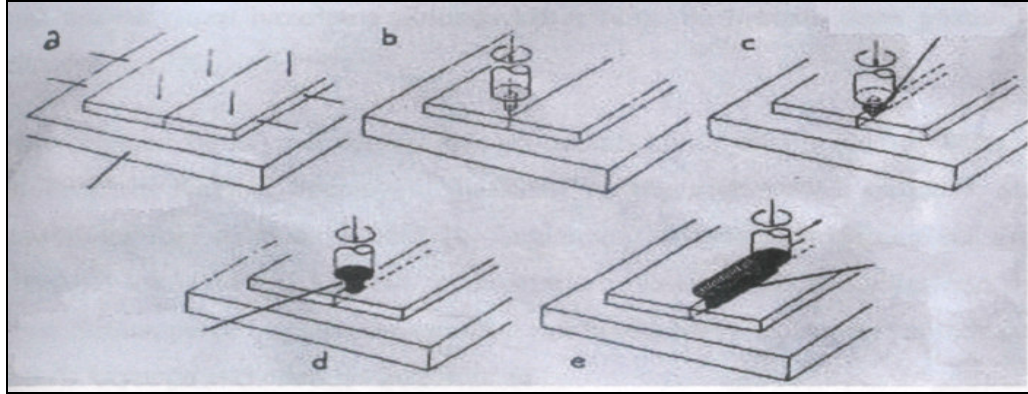
Şekil 5.2. SKK yönteminde özel olarak tasarlanmış vida adımlı uç [35]

5.2. Kaynak İşleminin Temel İlkesi

Bir sürtünme karıştırma kaynağı yapmak için birleştirilecek olan parçaların, kaynak esnasında yana, yukarıya ve ileriye doğru hareket etmelerini önlemek için, bir destek

(Şekil 5.3.a) parçasının üzerine sıkıca bağlamalı ve sabitlenmelidir. Çünkü birleştirme esnasında iş parçaları yukarıya doğru kalkmaya, yana doğru kaymaya ve ileriye doğru itilmeye çalışacaktır. Bu sabitleme işlemi çeşitli hidrolik baskı pabuçları ile de yapılabilir. Ayrıca birleştirme hattında geometrik bozuklukların önüne geçebilmek için karıştırıcı ucun her iki yanında ve önünde baskı bilyesi kullanmakta mümkündür. Ucu özel olarak imal edilmiş silindirik kademeli bir karıştırıcı ucun dönmekte olan bir karıştırıcısı (Şekil 5.3.b) yavaşça birleşme hattı üzerine bastırılır. Karıştırıcı ucun boyu istenilen kaynak derinliği ile aynıdır. Dönen karıştırıcının ucu işlenen yüzeye temas ettiği zaman meydana gelen sürtünme, karıştırıcı ucun temas ettiği noktayı aniden ısıtır ve böylece malzemenin mekanik direncini azaltır. Uygulanan kuvvet altında karıştırıcı uç malzemeyi, karıştırıcı uç omuzu da işlenen yüzeye temas edinceye kadar karıştırıcı uç ve onun hareket ettiği yönde zorlamakta ve yerinden oynatmaktadır (Şekil 5.3.c). Bu işlemde dönen karıştırıcı ucun meydana getirdiği sürtünme ısı, karıştırıcı ucun etrafında ve karıştırıcı ucun omuzu altında yumuşamış bir metal tabakası oluşturur (Şekil 5.3.d). Kaynaklanacak parçaların veya karıştırıcının ileri ve geriye hareket etmesi halinde, yumuşamış olan metal karıştırıcı ön yüzü etrafından kaldırılır ve karıştırıcı ucun mekaniksel dönüşü yönünde ve bastırma hareketi ile Şekil 5.3.c'nin arkasından dönerek sürüklenir (Şekil 5.3e).

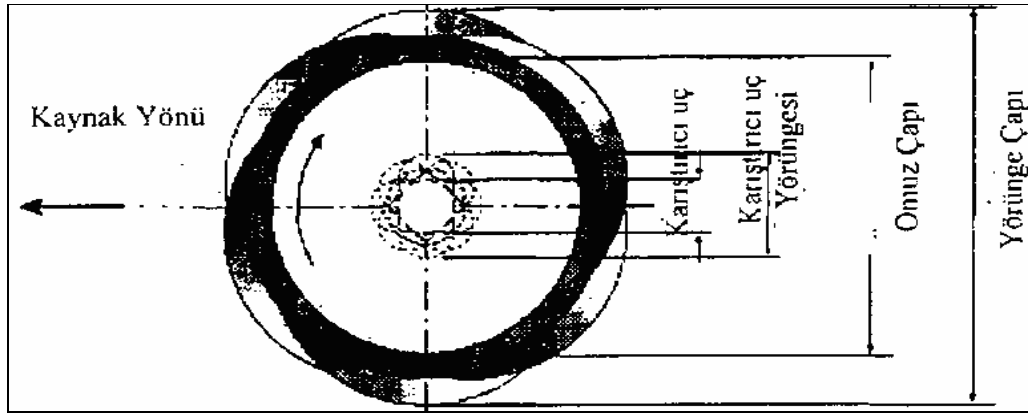
Sonuç olarak karıştırıcı uç birleşme hattı içine girdikçe sürtünme birleşme yüzeylerini ısıtarak metali yumuşak hale çevirmekte, takiben birleşme hattını ezerek oksit filmi kırmakta, yumuşak metali karıştırarak birbirine birleşmekte ve ileriye hareketi ile geride kalan birleşim soğuyarak katı hal kaynağı oluşturmaktadır. Tüm bunlar alaşımın ergime noktasının altında bir sıcaklıkta meydana gelir [37].



Şekil 5.3. Sürtünme karıştırma kaynağı işlemi a) Destek plakası b) Karıştırıcı ucun birleşme ekseninde konumlandırılması c) Karıştırıcı ucun belirli devirde döndürülmesi ve ilerlemesi d) Karıştırıcı uç omuzu altında ve karıştırıcı uç etrafındaki yumuşamış tabaka e) Kaynaklı metal [7]

5.3. İşlem Karakteristikleri

Şekil 5.4'te görüldüğü gibi dönen her türlü makine ile birlikte doğal olarak titreşime bağlı eksenel kaçıklık meydana gelebilir. Bu eksenel kaçıklık, hidromekanik olarak sıkıştırılmayan yumuşamış malzemenin karıştırıcı ucu etrafında daha kolay dönmesine izin vermektedir.



Şekil 5.4. Dönen takım ve karıştırıcı ucun dinamik yörüngesinin üstten görünümü [38]

Merkeze göre önemsiz kaçıklıkta veya dairesel olmayan bir karıştırıcının ucu, yumuşamış malzemenin karıştırıcı uç etrafından geçmesine izin verecektir. Esasen

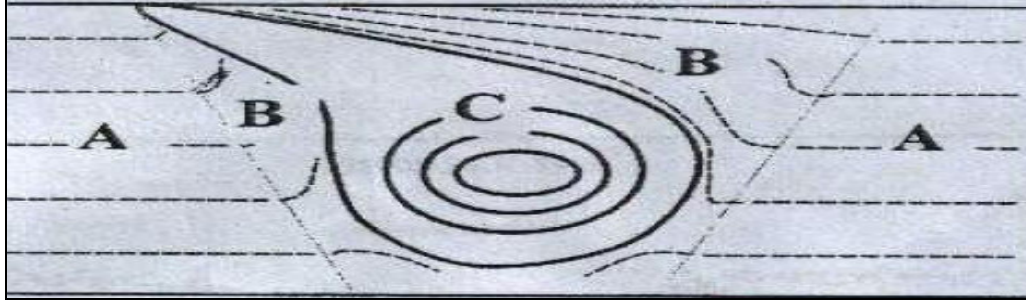
bu yumuşamış malzemenin dönen karıştırıcı ucun ön tarafından arka tarafına doğru akış için bir yol meydana getirmesine yardım eden, karıştırıcı ucun “Dinamik Yörüngesi”nin artan hacmi ile karıştırıcının statik malzeme için hacmi arasındaki ilişkidir. Üzerinde çalışılan parçaya çapraz konumlanan takımlar için dönen karıştırıcı ucun ön tarafı, karıştırıcı ucun ön tarafında bir sürtünme ön ısı ve takiben malzemede bir ısı yumuşama sağlamaktadır. Bu ön ısıtma malzemelerin daha sert veya birleştirmenin zor olduğu hallerde bir avantaj olabilmektedir. Kaynaklanacak yüzeye temas eden dönmekte olan karıştırıcı ucun omuz yüzeyi alanı büyüdükçe ortaya çıkan sürtünme ısı da artmaktadır. Ancak omuz bölgesi çapının arttırılması pratikle kısıtlanmaktadır ve kaynak yüzeyinde kenar akıntısı meydana getirmektedir [38].

5.3.1. İşlem karakteristiklerini etkileyen faktörler

Belirli bir uç geometrisi kullanılarak yapılan sürtünme karıştırma kaynağında elde edilen birleştirme karakteristiklerini belirleyen üç faktör vardır. Bunlar sırasıyla karıştırıcı ucun devir hızı, karıştırıcı ucun ilerleme hızı ve karıştırıcı ucun batma derinliğidir. Bunlardan ilk ikisi rahatlıkla kontrol edilebilir. Fakat ucun batma derinliği kritik bir faktör olup, kontrol edilmesi güçtür. Batma derinliğinin kaynak işlemi süresince sabit kalması gerekmektedir. Fakat özellikle uzun levhaların birleştirme işlemlerinde yüzeylerin çok düzgün olmaması durumunda bunu sağlamak mümkün olmayabilir. Bu yüzden kaynak öncesi yüzey hazırlama oldukça kritik olup, bu hususa özen gösterilmesi gerekmektedir [10].

5.4. Kaynak Dikiş Formu ve Metalurjik Yapı

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi bir katı hal yöntemi olduğundan kaynak dikişinde ergime meydana gelmez. Yüksek ısı olmadığından ısıdan etkilenen bölge de oldukça dardır. Ergitme kaynak yöntemi ile elde edilen kaynak dikişlerinden farklı bir kaynak dikişi ve metalurjik yapı elde edilir. Isıdan etkilenmeyen ana metalden kaynak dikişine doğru oluşan bölgeleri sıralarsak, kaynak bölgesinde oluşan içyapı Şekil 5.5’te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan iç yapının şematik görünümü. A) Isının tesiri altındaki bölge (ITAB), B) Termodinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (TKB), C) Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) [39]

Kaynak bölgesi üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Bu bölgeler DKB (Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge), TKB (Termodinamik olarak yeniden kristalleşen bölge) ve ITAB (Isı tesiri altında kalan bölge) olarak adlandırılmaktadır. Isıdan etkilenmeyen ana metal; kaynak metalinden yeterince uzakta olup, karıştırma esnasında oluşan ısıdan etkilenmez. Bu bölgede plastik şekil değiştirme olmaz. Malzemenin mikro yapı ve özelliklerinin değişmediği ana metal bölgesidir.

ITAB; kaynak metaline daha yakın, ısıdan etkilenmeyen ana metale komşu olan bölgedir. Bu bölgedeki malzeme karıştırma esnasında meydana gelen ısıdan etkilenir ve malzemenin mikro yapı ve özellikleri değişir. Bu bölgede plastik şekil değiştirme olmaz. Karıştırma esnasında oluşan ısı değerinin yüksek olmaması nedeniyle, ergitme kaynak teknikleri ile karşılaştırıldığında ITAB daha dardır.

TKB; hem ısının etkilediği hem de plastik şekil değiştirmenin olduğu ITAB 'a komşu olan bölgedir. Bu bölgede karıştırmanın etkisiyle hem plastik deformasyon meydana gelmekte hem de oluşan ısının tesiriyle kısmi ince taneli bir yapı oluşmaktadır. Karıştırma esnasında oluşan ısı, bu bölgenin mikro yapı ve özelliklerini değiştirir. Sürtünme karıştırma tekniği ile birleştirilen alüminyumun termo-mekanik etkilenen bölgesinde yeniden kristalleşme gözükmez.

DKB; kaynak dikişinin merkezinde oluşan ve insan midesine benzer bir şekilde bulunan bölgedir. Aşırı plastik şekil değiştirmenin ve oluşan ısı ile mikro yapı ve özelliklerin değiştiği bir bölgedir. Metal yığına benzediği için, kaynak külçesi adı verilmiştir. Bu bölge alüminyum birleştirmelerinde çok net bir şekilde belli olur. Diğer metallerde çok net değildir. Alüminyum alaşımlarında yeniden kristalleşen bölgedir. Genellikle yapısı soğanın iç kesit yapısına benzer. Çok dar aralıklarla birbirini takip eden halkaların dizilişi şeklindeki bir kesite sahiptir [37].

5.5. Karıştırıcı Uç ve Tasarımı

Sürtünme karıştırma kaynak tekniğinde birleştirme kalitesini etkileyen en önemli faktör, karıştırıcı ucun dizayn profili ve diş formudur. Bu faktörlere bağlı olarak birleştirme kalitesini değiştirmektedir. Bu nedenle en uygun ve ideal sonuçları verecek özelliklere sahip bir karıştırıcı ucu seçmek oldukça önemlidir.

Sürtünme karıştırma kaynak tekniğinde kullanılan karıştırıcı ucun iki bölgesi vardır: Birincisi, karıştırma işleminin yapıldığı helisel bir diş şekline sahip uç kısmı, ikincisi ise, bu uç kısmının üstünde bulunan ve birleştirilecek parçalara temas ettirilen geniş yüzey çıkıntısıdır. Karıştırıcı ucun uç kısmı ve geniş yüzey çıkıntı kısmı gelişmiş güzel dizayn edilmezler. Düzgün bir kaynak işlemi elde edebilecek dizayn ve profil kesitleri kullanılmalıdır.

Karıştırıcı ucun profil dizaynı, kaynak bölgesindeki metal akış yolunu kolaylaştıracak bir dizayn şekli düşünülerek yapılmalıdır. Karıştırıcı uç helisel bir vida diş formuna sahip olup, uç profil kesiti değişik şekillerde tasarlanabilmektedir. Örneğin oval, üç kenarlı, iki kenarlı ve dairesel helisel diş profiline sahip, karıştırıcı uçlar geliştirilmiştir. Helisel dişlerin aralarındaki mesafe, diş kalınlığı ve diş açısı kaynak kalitesini etkilemektedir.

Karıştırıcı ucun helisel dişleri arasındaki mesafe, dişlerin kalınlığından daha büyük olması halinde karıştırma esnasında şekil değiştiren malzemenin helisel diş aralıklarından daha kolay aktığı tespit edilmiştir. Helisel dişlerin yüzeysel alanı,

malzeme özelliklerine göre farklılıklar gösterebilir. Bu nedenle en uygun malzeme akışını sağlayacak helisel diş formu daima tercih edilmelidir.

Karıştırıcı ucun üst kısmındaki geniş yüzey çıkıntısının iç profil şekli, iş parçası ile en iyi temas sağlayacak ve karıştırıcı uç ile parçayı en iyi şekilde sıkıştırabilecek bir şekilde seçilmelidir. Bu geniş yüzey çıkıntısı iş parçası ile öyle temas etmeli ki, karıştırma sonucu hamurumsu hale gelen ve dışarıya doğru çıkmak isteyen metalin kaçışını engelleyebilsin. Metal kaçışını önlemek amacıyla, çıkıntısının iş parçası ile temas edecek yüzeylerine, spiral veya aynı merkezli dairesel oyuklar sayesinde, karıştırıcı uç iş parçası üzerinde daha rahat hareket eder. Bu oyuklar, kaynak metali üzerinde sürekli birbirini takip eden yarım ay şekilleri meydana getirirler.

Sürtünme karıştırma kaynak tekniğinde, malzemelerin karıştırılarak birleştirilebilmelerinin sağlanması için bir karıştırıcı uç kullanılır. Bu uç işlem esnasında ergimemeli ve aşınmamalıdır. Özel bir diş formuna sahip bu karıştırıcı uç, birleştirme esnasında deforme olmamalı ve diş formu bozulmamalıdır. Dolayısıyla karıştırıcı uç yüksek sıcaklıklarda iyi dinamik ve statik özelliklere aşınmaya dayanıklı en az 62 Rockwell sertliğinde çelik malzemelerden yapılmalıdır [10,37,40].

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ilk geliştirildiği yıllarda kullanılan batıcı uçlar yüzeyine helisel diş açılmış uzunluğu kaynak edilecek levha kalınlığından biraz kısa silindirik takımlardı. Fakat son yıllarda sürtünmeden açığa çıkan ısı ile akıcı kıvama gelen malzemenin kaynak bölgesinde kalmasını geliştirmek için çok değişik takım dizaynları geliştirilmiştir [31].

Kaynağı zor veya daha kalın malzemelerde, plastik şekil değiştiren kısmın, karıştırıcı uç kısım etrafındaki akışı, göz önünde tutulması gereken önemli bir noktadır. Eğer, oldukça geniş çapta karıştırıcı uç kısımlar gerekli ise çok geniş hacimli malzeme hareketi olacaktır. Takımlar, plastik şekil değiştirebilen malzemenin, karıştırıcı uç kısım etrafındaki akışını arttıracak şekilde geliştirilmelidir.

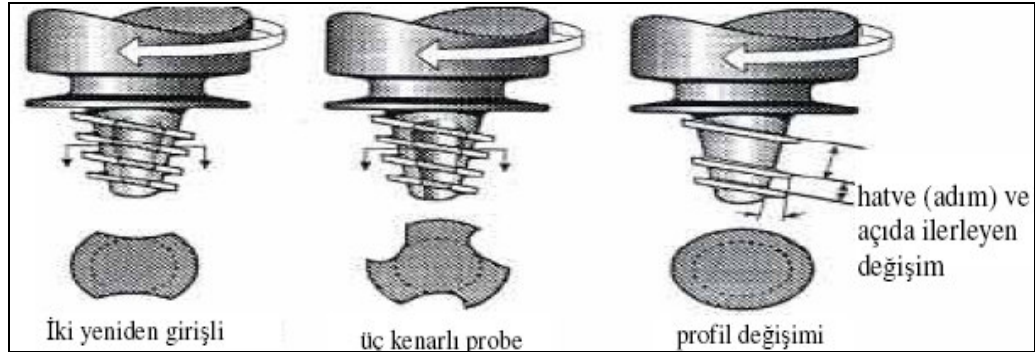
Mikser tipi içi boş karıştırıcı uç kısma sahip takım, plastik şekil değiştiren malzemenin, karıştırıcı uç kısmın içinden geçmesine imkân sağlar. Benzer çaptaki

dolu takımlar ile karşılaştırıldığında, daha az miktarda malzeme yer değiştirir. Bu sayede, sürtünme etkisinde kalan bölge, yer değiştiren hacimden daha büyüktür [41]. Sürtünme karıştırma kaynağında, özellikle kalın levhaların birleştirme işlemlerinde kaynak bölgesinde boşluk oluşumunu gidermede veya azaltmada ve işlem verimliliğini yükseltmede önemli bir faktör dinamik süpürme hacminin (karıştırıcı ucun dönmesi sırasındaki hacminin) statik hacme oranıdır. Bu oran batıcı uç yüzeyine değişik profiller işlenerek arttırılabilir, dolayısıyla batıcı uç etrafında ve altında malzeme akış yolları genişletilerek malzemenin kaynak dikişi içerisinde kalması desteklenir. Bu amaçla, kalın levhaların kaynağında ince levhalar için geliştirilmiş olan geleneksel silindirik karıştırıcı ucun yerine hacminin yaklaşık % 60-70'i boşaltılmış olan konik uç kullanılmaktadır (Şekil 5.6, 5.7, 5.8 ve 5.9) [42,43].

Bu sayede kaynak esnasında gerekli kuvvet de azaltılmış olur. Batıcı ucun geometrisi ve ebadı kaynaklanacak levhaların kalınlığına ve kaynağın türüne (alın veya bindirme) bağlıdır. Günümüzde levhaların gerek alın gerekse daha geniş kaynak bölgesi istenen bindirme kaynağı için ayrı ayrı özel batıcı uçlar üretilmektedir [43].

Silindirik uç yerine üzerine spiral diş açılmış konik bir uç kullanılabileceği düşünülerek WhorlTM, TrifluteTM ve Skew-StirTM serisi özel profilli sürtünme karıştırma kaynağı takımları dizayn edilmiş ve geliştirilmiştir. Bu takımlar ile 25–40 mm kalınlığındaki AA6082 T6 levhalar tek pasoda, 40–75 mm kalınlığındaki levhalar da çift taraftan kaynak yapılabilmektedir [31].

Denemeler sonunda, değişik WhorlTM konfigürasyonları belirlenmiştir (Şekil 5.6). Kesik koni şeklindeki WhorlTM takım (probe), plastik akışa uğrayan metali aşağıya doğru yönlendirmek için helisel sırtlı profiller ihtiva etmektedir [31,44].



Şekil 5.6. Çeşitli whorl™ takım konfigürasyonları [43,44]

Whorl™ konsepti dairesel olmayan probe kesitleri sağlar. Bu nedenle, malzemenin daha kolay akmasına imkân vermek için takımın yer değiştirme miktarı, dönme miktarından daha az olması gerekmektedir. Şekil 5,7’de 75 mm kalınlığındaki AA 6082-T6 alaşımının içine geçmiş Whorl™ serisi takım görülmektedir ve buradan da TKB ile takım profilinin ilişkisi açıkça görülmektedir. Takım etrafındaki malzemenin daha etkili akması için her bir helisel sırt arasındaki uzaklığın sırt kalınlığından daha büyük olması gerekir. Takım ucunun helisel sırtlarla paralel olması kritik bir husus değildir [31].



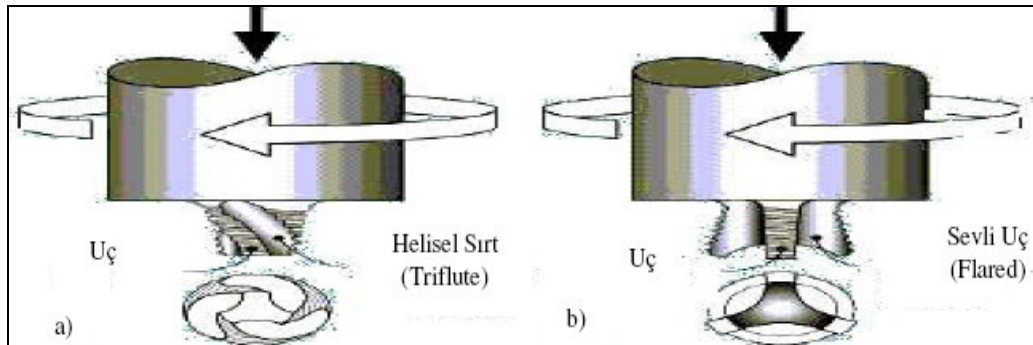
Şekil 5.7. 75 mm kalınlığındaki AA6082T6 alaşımının kaynağında whorl™ takımının kullanılması, kaynağın bitmiş hali ve kaynak dikişinin görüntüsü [45].

Multi-Helix takımların (MX Triflute™) yivlerinin çevresinde helisel sırtların bulunması takımın hacmini düşürmekle beraber malzeme akışına yardım eder ve yüzeydeki oksitleri dağıtır (Şekil 5.8 ve 5.9).



Şekil 5.8. MX Triflute™ takımın resim ve şematik çalışma şekli (MX Triflute™ takımın esin kaynağı deniz kabuklarıdır) [45].

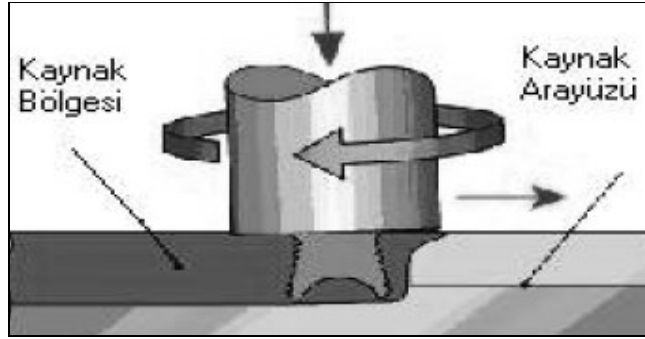
Alın kaynağında kullanılan Whorl™ ve Triflute™ takımları kesik piramit şeklindedir ve yüzeylerinde aşağıya doğru delme etkisini kolaylaştırmak amacıyla kaba hatve (adım) ve açıda iyi işlenmiş helisel oluklar bulunmaktadır. Bu girintili köşe şekilleri ucun hacmini azaltır ve statik hacim oranı için uygun olan karıştırma hacmini sağlar. Daha iyi bir hacim oranı ile malzemenin akış yolu daha iyi olur ve böylece takım daha etkili çalışır. Ayrıca özellikle ucun etrafındaki kaba işlenmiş helisel sırtlarda bulunan girintili köşe özellikleri kaynak bölgesindeki yüzey oksitlerinin parçalanmasına ve dağıtılmasına yardımcı olur [31].



Şekil 5.9. MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ takım dizaynları [45].

Bindirme kaynağında ise takım (batıcı uç), daha geniş kaynak bölgesi sağlamak ve kaynak yapılan ara yüzeylerde daha büyük levha kalınlıklarından dolayı oluşabilecek problemleri önlemek amacıyla daha farklı dizayn edilmiştir (Şekil 5.10). Bindirme kaynağında takım yüzeyi kaynak ara yüzeyine zorunlu olarak diktir ve alttaki levhaya yeteri kadar nüfuz edebilmesi ana amaçtır. Kaynak ara yüzeyinin üst

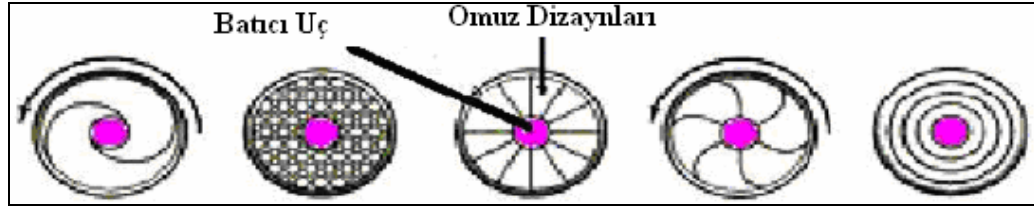
yüzeyden mesafesi ve takımın girintilerinin kaynağın kenarı ile kesiştiği açı çok önemlidir. Bu özellik, yorulma ile doğrudan bağlantılıdır. Bu takımın karakteristiği, süpürme hacmi ile statik hacim arasındaki farkın artmasıyla ucun etrafındaki ve aşağısındaki akış yolunun büyümesidir [31].



Şekil 5.10. Flared triflute takım ile yapılmış olan bindirme kaynağında kaynak ara yüzünün görünümü [45].

Karıştırıcı takımın uç kısmındaki sürekli spiral kısmın eğimi, kaynak edilecek malzemeye uygun bir şekilde tasarlanıp üretilebilir. Spiral kenarın eğimindeki değişim, plastik şekil değiştiren malzemenin aşağı doğru hareketine ve karıştırılmasına olanak sağlar. Whorl™ ve Triflute™ takımlar dönme sırasında saat ibresi yönünde spiral hareketi sayesinde plastik şekil değiştiren malzemeye aşağı yönde itme kuvveti uygular. Ayrıca, her iki takımın diğer geleneksel takımlardan önemli bir üstünlüğü (özellikle kalın parçaların kaynağında) karıştırıcı ucun dönmesi sırasındaki hacminin (Dinamik süpürme hacmi), kendi hacmine (Statik hacim) oranının yüksek olmasıdır. Çünkü bu kaynak sırasında yeterli akışın sağlanmasında oldukça büyük bir öneme sahiptir [41].

Yeni jenerasyon Whorl™ ve Triflute™ takımlarının omuzları da özel profillere sahiptir. Omuz profilleri, omuz ile iş parçası arasında daha iyi bir temas yüzeyi sağlamak maksadıyla kullanılır. Sürtünme ısısı ile akıcı hale gelen malzemenin kaynak bölgesinden ayrılması önlenmektedir (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. Whorl™ ve MX Triflute™ takımlarının omuz profilleri [45].

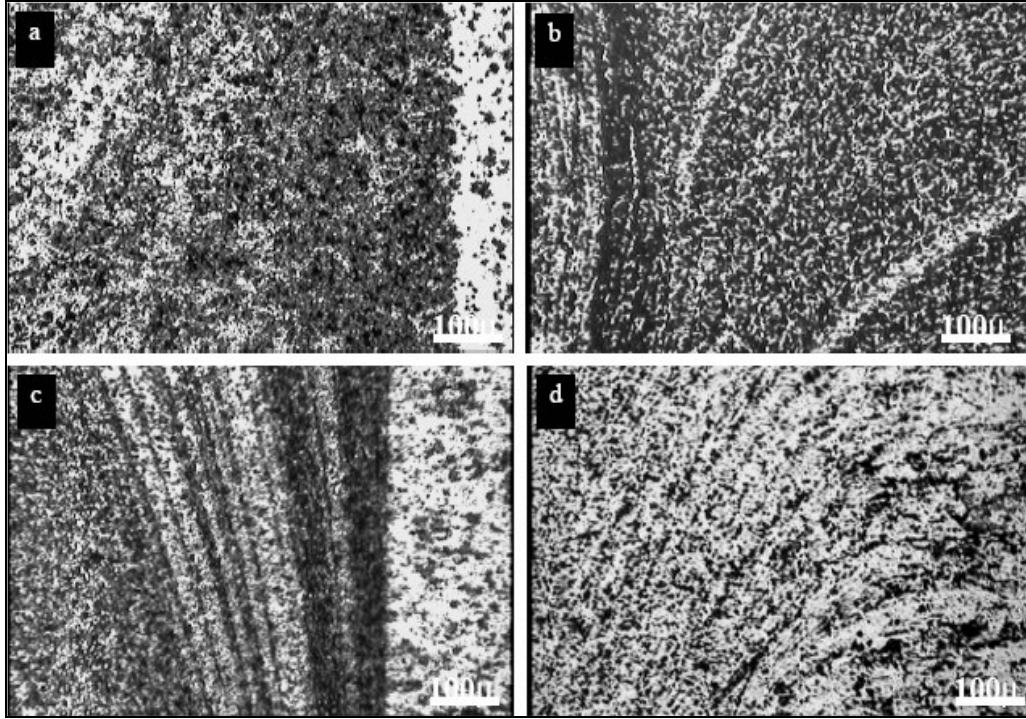
Tek parça takım kullanıldığında kaynak sonunda ucun çekilmesi sonucunda boşluk (delik) kalır. Bu hata, özellikle depolama tankları ve boruların kaynağında olduğu gibi çevresel kaynaklarda kabul edilemez. Bu takımların bir başka dezavantajı ise farklı kalınlıklardaki levhaların kaynağı için farklı uzunluklara sahip ayrı ayrı uçlara gereksinim olmasıdır. Bu sorunu gidermek için bilgisayar ile otomatik kontrol edilebilen ve batıcı ucu geri çekilebilen özel takımlar geliştirilmiştir. Kaynak sonunda bu otomatik geri çekilebilir uçlar dönme hareketi devam ederken yavaş yavaş çekilerek boşluk kalmadan kaynak işlemi tamamlanır. Takımlar, takım çeliği, sıcak iş çeliği veya yüksek hız çeliklerinden imal edilmektedir [43].

5.6. Kaynak İlerleme ve Devir Hızı

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde, kaynak parametresi olarak adlandırılan ucun dönme hızı ve ucun ilerleme hızı oranının kaynak performansını etkileyen önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir [46].

Sürtünme kaynağında kaynak hızı ısı girdisi miktarında çok önemli olduğundan kaynak hızına bağlı olarak hem mikroyapı hem de sertlik ve çekme gibi mekanik özelliklerde de etkili olmaktadır. Artan kaynak hızı ile kaynak metalinin yönlenmesi artmakta ancak düşük kaynak hızında kaynak metali yönlenmesi fazla belirgin görülmemektedir. Adem KURT ve Mehmet ÖZDEMİR'in yaptığı çalışmada 800 dev/dakika hızı ile kaynak hızı, 16 mm/dakikadan 20 mm/dakikaya ulaştığında yönlenme daha homojen bir dağılım gösterdiğini rapor etmişlerdir. Sürtünme karıştırma kaynağı için uygun bir kaynak metali karışım ve yönlenmesi 20 mm/dak kaynak hızındaki numunelerde görülmektedir (Resim 5.1).

Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak hızının artması ısı girdisini azaltacağından artan kaynak hızı ile kaynak metali sertliği de değişmektedir. Sertlik miktarındaki değişim çok fazla olmamakla birlikte karıştırıcı uçun karıştırdığı karışım bölgesinde daha az ve bu merkezden esas metal tarafına doğru sertlik artmakta ve karıştırıcı uçun omuz kısmından sonra esas metal sertliğinde ölçülmektedir [47].



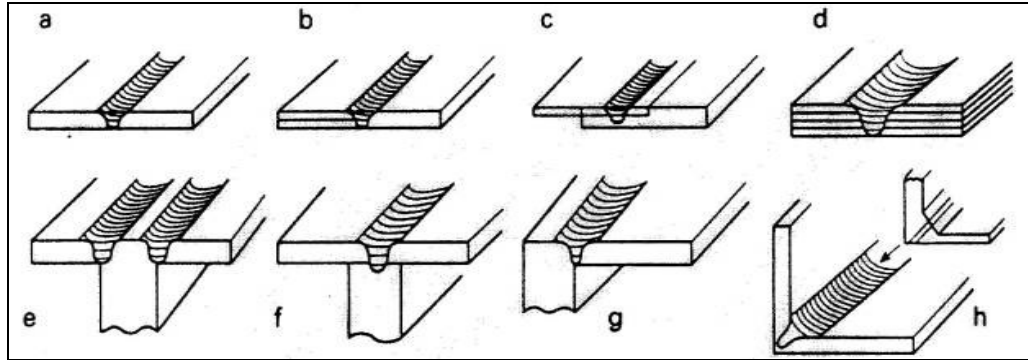
Resim 5.1. Kaynak hızı ile SKK kaynak metali mikro yapıları arasındaki ilişki, a) 6,25 mm/dak, b) 10 mm/dak, c) 16 mm/dak, d) 20 mm/dak. [48].

5.7. Kaynak Güvenirliliği

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde en önemli konu, yüksek kaynak kalitesi ve güvenirliliğidir. Kaynak operasyonu hassastır ve oluşacak hatalar mekanik olarak belirlenebildiği için daha duyarlıdır. Bu bağlamda, kaynak parametrelerinin seçimi çok önemli olmaktadır. Kaynak parametreleri; kaynak dikiş kalitesine, metal alaşımın türüne, parça boyutlarına, çevresel mil hızına bağlıdır [34].

5.8. Kaynak Pozisyonu ve Birleştirme Türleri

Sürtünme karıştırma kaynağında uygulanabilir birleştirme türleri; küt alın, bindirme, t-köşe, dış ve iç köşe, boyuna ve çevresel birleştirmelerdir (Şekil 5.12). Ayrıca bu yöntem yerçekiminin etkisi olmadığından tüm pozisyonlarda rahatlıkla uygulanabilir [7].



Şekil 5.12. Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi uygulanarak gerçekleştirilen birleştirmeler. a) Küt alın birleştirme b) Birleştirilmiş ek ve bindirme birleştirme c) Bindirme d) Çoklu bindirme e) İki pasolu t köşe birleştirme f) Tek pasolu t köşe birleştirme g) Dış köşe birleştirme h) İç köşe birleştirme [7]

5.9. SKK ile Birleştirilebilen Malzemeler

Döküm-döküm alüminyum, döküm-dövme alüminyum alaşımlarında, sıvı hal kaynak yöntemleri ile kaynağı güç olan 0,8 mm kalınlığındaki çinko saçların kaynağında, düşük karbonlu yumuşak çeliklerde, orta karbonlu çeliklerde, metal matrisli kompozitlerle, plastiklerde, farklı iki malzemenin kaynaklarında, bakır alaşımlarında, kurşun, titanyum ve çinko alaşımlarında, bu yöntem başarı ile uygulanmaktadır. Ayrıca zırh kaliteli alüminyum saçların SKK yöntemi ile birleştirilebilirliği üzerine mekanik testler yapılmıştır.

Dayanıklılığı yüksek ve üstün balistik performansı olduğu bilinen zırh kaliteli alüminyum alaşımlı halen deniz kuvvetlerinin gelişmiş Amfibrik taarruz araçlarında kullanılmaktadır. Geleneksel ark kaynağı GMAK (gaz metal ark kaynağı) ve GTAK

(gaz tungsten ark kaynağı) ile yapılan belirli 2519 kaynak tipleri maalesef gerekli balistik eleme testlerinden geçememişlerdir. Testten geçememek, birçok kaynak birleştirme tasarımının araç yapısında kullanılmasını engellemektedir. Balistik eleme sırasında 2519'un kusuru diğer alüminyum zırhları ile kıyaslandığında nispeten düşük genleşebilme özelliğine atfedilmiştir.

Sürtünme karıştırma kaynağının 2519-T87 zırhlı alüminyum alaşımı malzemelerin birleştirilmesinde kullanılıp kullanılmayacağı hususunu tespit etmek üzere GDYS (General Dynamics Yer Sistemleri) ile EKE (Edison Kaynakçılık Enstitüsü) tarafından ortak bir program yürütülmüştür. Bu programdaki çalışma, SKK takım geometrisini ve kaynak parametrelerini başlangıçta bildirmek üzere bir termal model kullanımını kapsıyordu. İstenilen sonuçları almak için ihtiyaç duyulan kaynak parametrelerini daha sonra netleştirmek için istatistiksel olarak tasarlanan bir deneyi geliştirmek üzere bu modelin verileri kullanılmıştır. Bu program sonucu yapılan iş GMAK'ya benzer, ancak önemli derecede yüksek genleşmeye sahip sürtünme karıştırma kaynağı yapmak olmuştur. Gelişim işlem parametrelerini kullanarak uzunluğuna yapılan kaynak saçları, balistik kaynak darbe testinden istenilen hususlardan başarı ile geçmiştir [8].

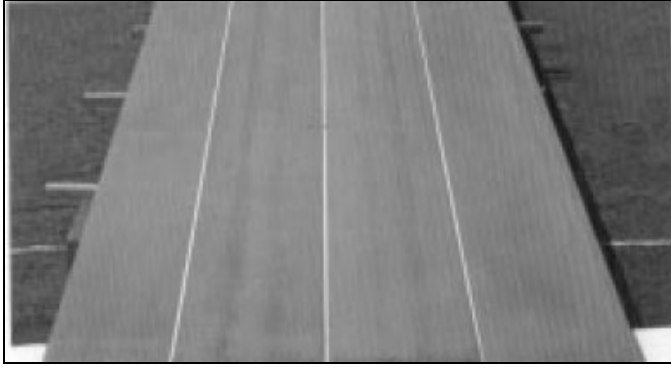
5.10. Uygulama Alanları

Sürtünme karıştırma kaynak tekniği alüminyum alaşımlarının kullanıldığı uçak, gemi, inşaat, kara ve demiryolu taşımacılığında kullanılan araç ve gereçlerin birleştirilmesinde başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Ayrıca mutfak araç gereçleri, beyaz eşya imalatı, gaz depoları ve metal mobilya imalatında da kullanılmaya başlanmıştır [8,9].

5.10.1. Demiryolu ve taşımacılık endüstrisi

Şekil 5.13'te görüldüğü gibi alüminyum alaşımları kullanılarak imal edilen yüksek hız trenlerindeki birleştirmeler, tren vagonları, tramvay ve yeraltı tren vagonları,

demiryolu tankerleri, konteynır gövdeleri sřrtőnme karıştırma tekniği ile birleştirilerek imal edilmeye başlanmıştır [8,9].

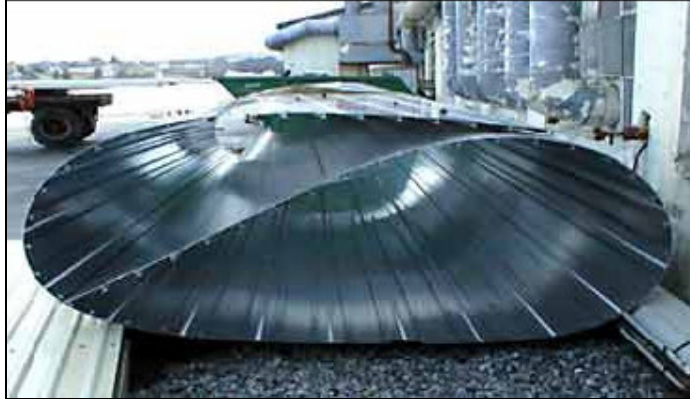


şekil 5.13.Hızlı trenlerde kullanılan alőminyum panellerinin SKK ile birleştirilmesi [49]

5.10.2. Gemi endőstrisi

Sřrtőnme karıştırma kaynak tekniğinin en yaygın olarak kullanıldđđ endőstri alanı, gemi endőstrisidir. Hafif ve korozyona dayanıklı olan alőminyum alaşımları kullanılarak imal edilen feribot, hız tekneleri ve yelkenlerin artması sonucu, sřrtőnme karıştırma kaynak tekniği őn plana çıkmıştır. Gemi endőstrisinde bu kaynak tekniği ile birleştirilen parçalar şunlardır:

- a) Gemi gővertesi, kenarı, dőřemesi ve kabin bőlmelerinde kullanılan panellerin birleřtirilmesi. őrneđin gemi kabin bőlmelerinde kullanılan paneller ičin, 5 adet 250 mm geniřliđindeki levhalar birleřtirilip, 1250x5000 mm boyutunda panel imal edilebilmektedir.
- b) Gemi őzerinde inřa edilen helikopter iniř platformu.
- c) Kıyıdan uzak deniz iči platformların yapımı.
- d) Yelkenli gemilerde kullanılan gemi direği imalatı.
- e) Balıkçı teknelerinde kullanılan soğutucu veya dondurucu kabin imalatı.
- f) Feribotların alőminyum gőverte imalatı (şekil 5.14).
- g) Deniz suyuna dayanıklı ve bal peteği panellerin imalatı [8,9].



Şekil 5.14.Yüksek hız feribotlarında kullanılan alüminyum ekstrüzyon panellerinin SKK ile birleştirilmesi [43]

5.10.3. Havacılık endüstrisi

Son yıllarda uçak ve uzay sanayinde kullanılan bazı parçaların sürtünme karıştırma tekniği ile birleştirilmesi hız kazanmıştır. Uçak kanadı imalatında kanadı oluşturan ana kiriş, kaburga ve kolonlar ile kaplama sacının birleştirilmesinde sürtünme karıştırma kaynak tekniğinin uygulanabilirliği araştırılmakta ve çeşitli deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Uzay mekiklerinde kullanılan alüminyum alaşımlarından imal edilen yakıt tankları, bu teknikle birleştirilmiş ve Delta II adındaki uzay mekiğinde başarıyla kullanılmıştır. Sürtünme karıştırma kaynak tekniği ile birleştirilen uçak ve uzay sanayinde kullanılan parçalar şunlardır:

- a) Uzay mekiği yakıt tankı imalatında,
- b) Kanatlar, uçak gövdesi ve uçağın kuyruk kısmı,
- c) Uçaklarda kullanılan yakıt depoları,
- d) Askeri ve bilimsel amaçlı roket imalatı [8,9].

5.10.4. Otomobil endüstrisi

Yakıt tasarrufu ve yüksek hız elde etmek amacıyla otomobil imalatında alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının birleştirilmesi için sürtünme

karıştırma kaynak tekniği kullanılmaya başlanmıştır. Otomobil sektöründe sürtünme karıştırma kaynak tekniği ile birleştirilen parçalar şunlardır:

- a) Motor şasi ve yatakları,
- b) Alüminyum alaşımlı jant imalatı. Jantın göbek kısmı dökme alüminyum alaşımı olup, dövme alüminyum alaşımı olan dış kısmı ile sürtünme karıştırma kaynaklı birleştirmeler (Şekil 5.15).
- c) Yakıt depoları,
- d) Karavan imalatı,
- e) Hava alanlarında kullanılan yolcu ve yük taşıma araçları,
- f) Motosiklet ve bisiklet gövdeleri,
- g) Alüminyum gövdeli otomobillerin tamiri,
- h) Taşınabilir vinç imalatı,
- i) Otomobil gövde parçalarının imalatı [8,9].



Şekil 5.15. SKK yöntemi kullanılarak üretilmiş tekerlek jant örneği [50]

5.10.5. İnşaat endüstrisi

İnşaat sektöründe kullanılan alüminyum veya bakırdan yapılan dış cephe panellerinin imalatında, alüminyum merdiven, asansör kabini, alüminyum boru pencere kasası imalatında, enerji santrallerinde, kimya sanayinde kullanılan alüminyum reaktör

imalatında, ısı eşanjörleri ve klima imalatında da bu birleştirme tekniği kullanılmaktadır [8,9].

5.10.6. Elektrik sanayi

Elektrik motor koruyucusu, elektrik bağlama çubuğu ve bazı elektrik bağlantılarında SKK tekniği kullanılmaktadır [8,9].

5.11. Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniğinin Avantajları

- a) Uygun maliyet: kaynak operasyonu, enerji tasarrufu sağlayan basit bir işlemdir.
- b) Yüksek kaynak enerjisine sahiptir. 3 kw'lık toplam güçle 12,5 mm derinliğinde kaynak yapılabilir.
- c) Kaynak işlemi; dolgu telleri ve gazdan korunan kaynak banyosu gerektirmez.
- d) Özel profilden bağlantı kenarları önemsizdir.
- e) İdeal olarak teknik otomasyona uygundur.
- f) Bütün pozisyonlarda kaynak yapılabilir.
- g) Al alaşımları çatlamaya duyarlılıklarından dolayı ergitme kaynağı yapılamayan alaşımlar kaynak yapılabilir.
- h) Gözenek oluşmaz.
- i) Farklı yapıdaki malzemelerin kaynağını mümkün kılar.
- j) Hassas kaynak ağzı hazırlığına gerek yoktur.
- k) Ağzılarda ergime oluşmaz dolayısı ile IEB hemen hemen yoktur.
- l) Koruyucu gaz ve ek metale gerek yoktur.
- m) Sıçrama olmaksızın düz yüzey elde edilebilir.
- n) Kaynak ark olmaksızın yapıldığı için manyetik üfleme yoktur.
- o) Çok az bakım ister.
- p) Kaynaktan hemen sonra curuf tabakasının kaldırılmasına gerek yoktur.
- r) Yüksek bağlantı mukavemetleri ısı işlem yapılarak elde edilir.
- s) Katı-hal kaynağı oluşumu alaşımın metalurjik özelliklerini saklamasına imkân tanır.
- t) Farklı koşullarda metaller birleştirilebilir.

- u) Ekstrüzyon ürünü veya döküm olan çoğu parçalar bu yöntemle kaynatılabilir [7].
- v) Uygun kaynak parametreleri ve karıştırıcı uç kullanıldığı takdirde güvenilir ve sağlam bir birleştirme elde etmek mümkündür. Ergitme tekniği ile birleştirilen malzemelerin mukavemet değerleri ile karşılaştırıldığında sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen parçaların yorulma, çekme ve eğme mukavemetlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- y) Alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde plastik deformasyon sayesinde ana metale göre kaynak metalinde daha ince taneli bir yapı ve yeniden kristalleşme meydana gelir [6].

5.12. Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniğinin Dezavantajları

- a) Bazı alaşımlı saclarda tek pasolu kaynak hızı, diğer mekanikleşmiş ark kaynağı tekniğinden daha yavaştır.
- b) Her kaynak sonunda takımın ucunun girdiği delik kapatılmalıdır. Bunun için alternatif kaynak tekniklerinden olan konik tapa sürtünme kaynağı kullanılmalıdır.
- c) Levhanın bir ucundan diğerine kaynak isteniyor ise, ileri geri hareket eden tablalara gereksinim vardır.
- d) İş parçaları tablaya bağlandığından dolayı ekipmanların taşınması zordur.
- e) %100 nüfuziyet isteniyorsa parçalar ters çevrilip arka tarafından da kaynak yapılmalıdır.
- f) Kaynak öncesi yüzey hazırlama kritik olup, bu hususta özen gösterilmesi gerekmektedir [7,38,51].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

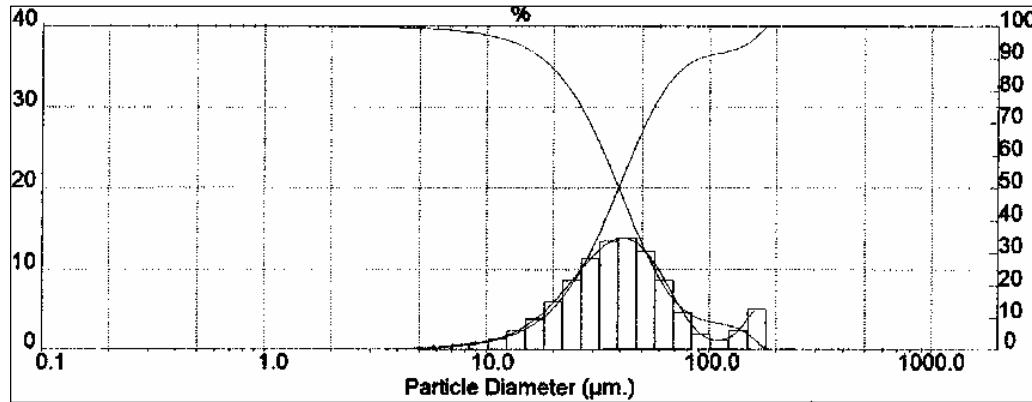
Bu çalışmada; toz metal üretim teknikleri kullanılarak farklı basınçlarda ve farklı yoğunluklarda toz metal alüminyum levhalar üretilmiştir. Elde edilen levhaların ham yoğunlukları ölçülmüştür. Daha sonra levhalar 10^{-2} bar vakum atmosferli fırında sinterleme işlemine tabi tutularak dayanımları artırılmıştır. Sinterlenmiş levhaların yoğunlukları tespit edilerek sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile alın altına kaynak edilmiştir. Levhaların birleşebilirliği ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan makine ve teçhizatlar, toz metal levhaların üretimi, deney numunelerinin hazırlığı, kaynak işlemi ve mekanik testlerini içeren deney aşamaları aşağıda açıklanmıştır.

6.1. Malzeme

Deneysel çalışmalarda, ortalama 39,23 μm boyutunda alüminyum tozlarından parçalar üretilmiştir. Toz tane boyutu ölçümü Gazi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünde, lazerle parçacık boyutunu ölçen Malvern Mastersizer E cihazında yapılmıştır. Çizelge 6.1 ve Şekil 6.1’de alüminyum tozlarına ait tane boyutu verilmiştir.

Çizelge 6.1. Alüminyum tozlarının tane boyutu

Presantation:2OHD				Volume Result		Focus=100mm	
Polydisperse model				Concentration=0,058 %		Obscuration=12,93 %	
Residual=1.478 %				d (0,1)=17,86 µm		d (0,9)= 89,08 µm	
d (0,5)=39,23 µm				Span =1,82			
D[4,3] =49,02 µm.						Mode =41,24 µm	
Sauter Mean (D[3,2]) =31,18 µm						Densty =1.00 gm. / c.c	
Specific Surface Area =0,1925sq. M./gm							
Size (Lo)	Result İn	Size (Hi)	Result	Size (Lo)	Result İn	Size (Hi)	Result
µm	%	µm	Below %	µm	%	µm	Below %
0,20	0,00	0,48	0,00	8,48	0,97	10,27	2,78
0,48	0,00	0,59	0,00	10,27	1,48	12,43	4,26
0,59	0,00	0,71	0,00	12,43	2,38	15,05	6,64
0,71	0,00	0,86	0,00	15,05	3,85	18,21	10,48
0,86	0,00	1,04	0,00	18,21	5,95	22,04	16,43
1,04	0,00	1,26	0,00	22,04	8,61	26,68	25,04
1,26	0,00	1,52	0,00	26,68	11,36	32,29	36,40
1,52	0,00	1,84	0,00	32,29	13,33	39,08	49,73
1,84	0,00	2,23	0,00	39,08	13,84	47,30	63,57
2,23	0,00	2,70	0,00	47,30	12,17	57,25	75,74
2,70	0,06	3,27	0,06	57,25	8,67	69,30	84,40
3,27	0,11	3,95	0,17	69,30	4,75	83,87	89,15
3,95	0,19	4,79	0,36	83,87	2,01	101,52	91,16
4,79	0,32	5,79	0,68	101,52	1,23	122,87	92,39
5,79	0,47	7,01	1,15	122,87	2,45	148,72	94,84
7,01	0,67	8,48	1,81	148,72	5,16	180,00	100,00

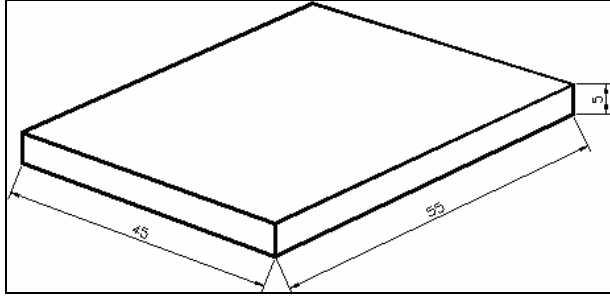


Şekil 6.1. Alüminyum tozlarının tane boyutu

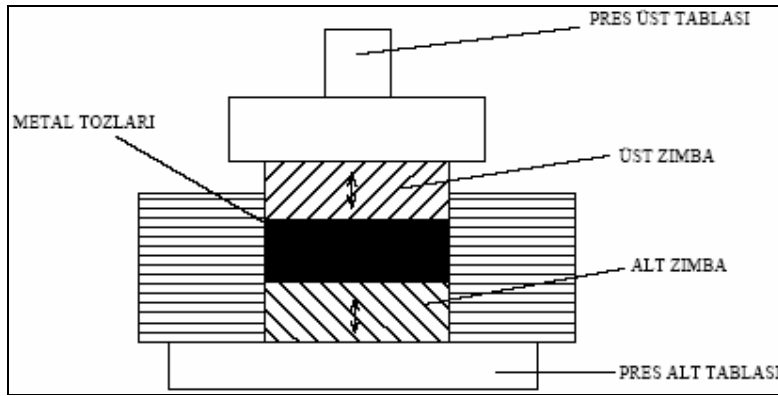
6.2. Tozların Preslenmesi

Toz metal parçalar, Şekil 6.2’de verilen boyutlarda, Şekil 6.3’teki metal kalıp kullanılarak 290, 330, 370, 410 MPa basınçlarda Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim

Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü malzeme laboratuvarında bulunan preste preslenerek elde edilmiştir.



Şekil 6.2. İmal edilen toz metal parçaların şematik olarak gösterimi



Şekil 6.3. Toz metal levha imalatında kullanılan kalıp

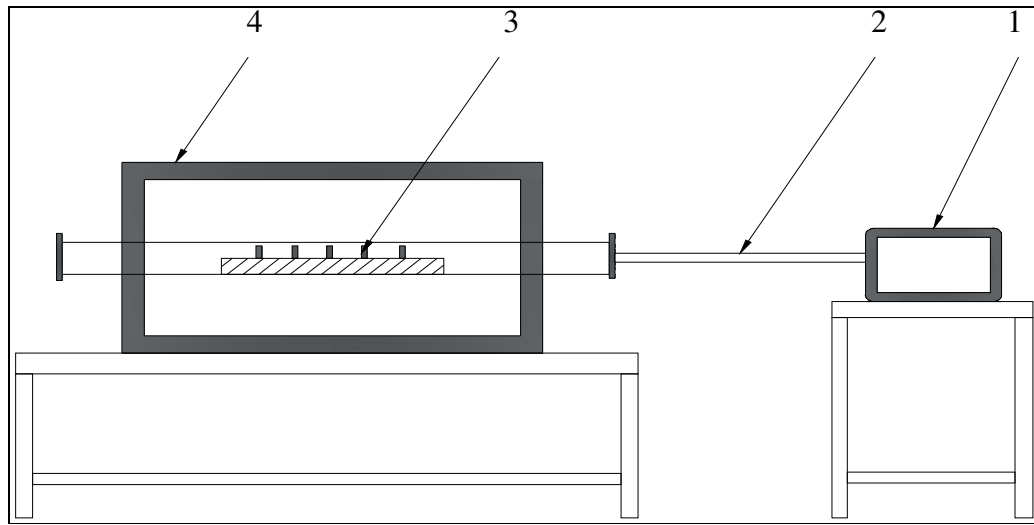
6.2.1 Preslenen numunelerin ham yoğunluklarının ölçülmesi

Elde edilen toz metal parçaların hacimleri geometrik olarak hesaplanıp, ağırlıkları 0,0001 g hassas terazide tartılarak bulunduktan sonra kütlenin hacme oranı ile ham yoğunlukları tespit edilmiştir.

6.3. Numunelerin Sinterlenmesi

Presleme sonrası elde edilen blok parçalarda mukavemet artışını sağlamak amacıyla numuneler 600 °C sıcaklıkta 10^{-2} bar basıncında vakum atmosferli sinter fırınında

(Protherm PTF/16) 60 dakika süreyle sinterlenmiştir. Sinterleme sıcaklığı bütün parçalar için sabit tutulmuştur. Fırın oda sıcaklığında iken blok numuneler grafit bir kayık içerisinde fırın merkezine yerleştirilmiştir. Daha sonra fırın 5 °C/dakika ısınma hızı ile sinterleme sıcaklığına kadar ısıtılmış ve sinterleme sıcaklığında 60 dakika bekletilmiştir. Numunelerin oksitlenmesini önlemek amacıyla ortamın sıcaklığı oda sıcaklığına düşünceye kadar fırın vakum atmosferi ile korunarak sinterleme yapılmıştır. Sinterlemede kullanılan deney düzeneği Şekil 6.4'te görülmektedir.



Şekil 6.4. Sinterlemede kullanılan deney düzeneği;1) Vakum pompası 2) Gaz taşıyıcı hortum 3) Numuneler 4) Fırın gövdesi

6.3.1. Sinterlenmiş numunelerin yoğunluklarının ölçülmesi

Sinterleme sonrası bütün numunelerin yoğunlukları ölçülerek ortalama değerleri alınmıştır. Yoğunluk ölçümleri ham yoğunluk ölçümünde olduğu gibi hesaplanmıştır. Sinterleme sonrası yoğunluk ölçümleri ile blok parçaların sinterleme öncesi ham yoğunluklarındaki değişimler belirlenmiştir.

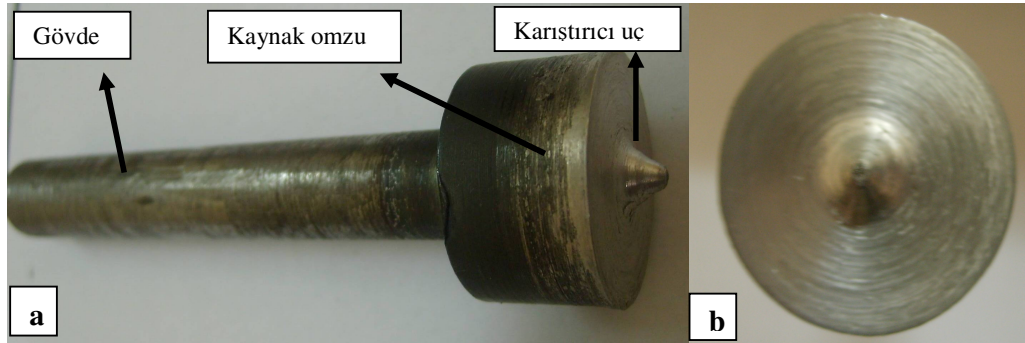
6.4. Karıştırıcı Uç

Deneylerde kullanılan karıştırıcı uç Resim 6.1'de Ç 1050 malzemeden Şekil 6.5'te verilen geometri ve boyutlarda Ankara Mamak Abidinpaşa Anadolu Meslek Lisesi

Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesi Makine Teknolojisi Alanında torna bölümünde tarafımızdan geliştirilerek imal edilmiştir. Karıştırıcı ucun uç kısmına standart dışı helisel dişler (kanallar) açılarak uç kısmı yuvarlatılmıştır. Karıştırıcı ucun uç kısmı konik olup, tabandaki çapı 4 mm iken uç çapı yaklaşık 3 mm civarındadır. Karıştırıcı ucun çapı ve boyu kaynak yapılacak levhaların et kalınlığına bağlıdır. Toz metal üretim teknikleri kullanılarak üretilen toz metal alüminyum malzemelerin et kalınlıklarının 4 mm sabit kalınlıkta olması için freze tezgâhında işlenmiştir. Kaynak işlemi süresince kaynak ucunun alttan çıkmaması ve levhaların bağlandığı mengene tabanına temas etmemesi için karıştırıcı ucun uzunluğu 3,8 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 6.5. Deneylerde kullanılan karıştırıcı uç ve ölçüleri



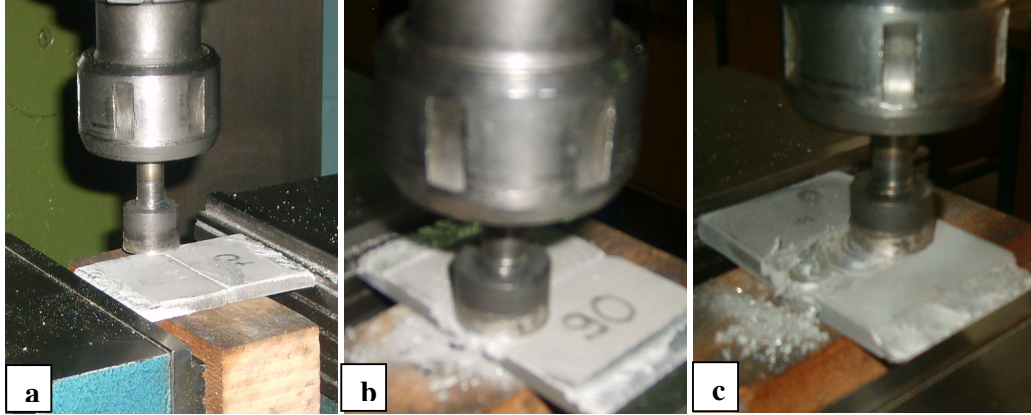
Resim 6.1. Deneylerde kullanılan karıştırıcı uç a) Karıştırıcı ucun kısımları
b) Karıştırıcı uç kısmının üstten görünüşü

6.5. Kaynak İşlemleri ve Kaynak Parametreleri

Sürtünme karıştırma kaynak işlemi Ankara Mamak Abidinpaşa Anadolu Meslek Lisesi Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesi Makine Teknolojisi Alanında bulunan Taksan Üiversal freze tezgâhı kullanılarak yapılmıştır. Kaynak yapılacak levhaların kalınlıklarının birbirinden farklı olması ve yüzey düzgünlüğünün sağlanması amacıyla levha yüzeyleri frezeleme işlemine tabi tutularak kaynağa hazır hale getirilmiştir. Daha sonra levhalar freze tezgâhının mengenesine alın alına bağlanarak kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Resim 6.2’de kaynak işleminde kullanılan freze tezgahı görülmektedir. Kaynak işlemi, karıştırıcı ucun dönme hareketi, karıştırıcı ucun kaynak edilecek levhalara batması ve levhaların alın alına bağlandığı freze mengenesinin ilerleme hareketinden oluşmaktadır (Resim 6.3).



Resim 6.2. Kaynak işleminin gerçekleştirildiği freze tezgahı



Resim 6.3. Kaynak işleminin detay görünüşü a) Kaynak hazırlığı b) Kaynak başlangıcı c) Kaynak işlemi.

Karıştırıcı ucun dönme hareketi otomatik olarak, batma hareketi freze mengenesinin bulunduğu tablanın aşağı yukarı hareketi ile ilerleme hareketi ise kontrol paneli yardımıyla sağlanmaktadır. Kaynak işlemi sırasında dikkat edilmesi gereken önemli nokta, karıştırıcı ucun saat istikametinin tersi yönünde hareket etmesidir. Bunun amacı takımla temas halinde bulunan hamur kıvamındaki kaynak metalinin karıştırıcı uç yüzeyindeki kanallar vasıtasıyla yüzeyden aşağıya doğru hareketini sağlamaktır. Ayrıca sürtünme ısısı oluşturabilmek için karıştırıcı omzunun levhaların her ikisine birlikte basınç uygulaması gerekir. Levhalara baskı işlemi manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemi baştan sona kadar göz ile kontrol edilmiştir. Kaynaklı birleştirme için Çizelge 6.2’de belirtilen her dört farklı basınçta, preslenmiş ve 600 °C’de sinterlenmiş numuneler Çizelge 6.2’de verilen parametrelerde SKK ile kaynak edilmişlerdir. Çizelge 6.2’de belirtilen dönme hızlarında ve presleme basınçlarında 4 mm/dakika kaynak ilerleme hızında yapılan birleştirmelerde çatlama, dağılma, çökme veya hiç birleşmeme gibi sonuçlar elde edilmiştir. Bu parametrelerden 700 dev/ dakika dönme hızı ve 6 mm/dakika kaynak ilerleme hızında kaynaklı bölgede yeterli kaynak metali yığılmaması sonucu çatlaklar ve kaynak boşlukları meydana gelmiştir. 1100 dev/dakika dönme hızı ve 6 mm/dakika ilerleme hızında, kaynak 700 dev/dakika göre makro olarak daha düzgün bir yüzey elde edilmekle birlikte araştırmaya değer yeterli birleşme görülmemiştir. 1400 dev/dakika dönme hızı ve 6 mm/dakika ilerleme hızında ise kaynak yüzeyinde bütünlüğün bozulduğu ve kısmen yanma ve yüzey bozukluklarının meydana geldiği

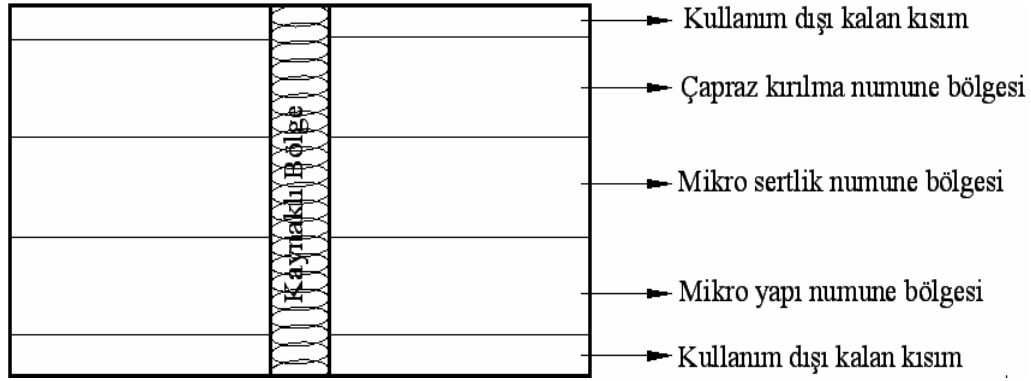
ve bu bunlarda da yeterli dayanımda bir birleşme görülmediği için bunların devamına gerek görülmemiştir. Bu parametrelerden, en uygun birleştirme 900 dev/ dakika karıştırıcı dönme hızı ve 6 mm/dakika kaynak ilerleme hızında elde edildiği için birleştirilen bu numuneler mekanik ve metalografik incelemelerde değerlendirilmişlerdir.

Çizelge 6.2. Deney numunelerinin kaynak işlem parametreleri

Presleme Basıncı (MPa)	Karıştırıcı uç dönme hızı dev/dak	Kaynak hızı mm/dak
290	700	4
		6
	900	4
		6
	1100	4
		6
	1400	4
		6
330	700	4
		6
	900	4
		6
	1100	4
		6
	1400	4
		6
370	700	4
		6
	900	4
		6
	1100	4
		6
	1400	4
		6
410	700	4
		6
	900	4
		6
	1100	4
		6
	1400	4
		6

6.6. Kaynaklı Birleştirmelerde Test Numunelerinin Hazırlığı

Kaynak işlemi bittikten sonra numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Gözle muayeneden geçen bu levhalardan standartlara uygun deney numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 6.6). Kaynaklı levhaların başlangıç ve bitim yerlerinden 10 mm'lik kısımları kesilerek atılmıştır.



Şekil 6.6. Numune alma bölgelerinin şematik görünüşü

Birleştirilen malzemelerin mekanik ve metalurjik özelliklerini incelemek amacıyla Şekil 6.6'da görüldüğü gibi numuneler çıkartılarak, çapraz kırılma, mikro sertlik, mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.

6.6.1. Çapraz kırılma numunelerinin hazırlığı

Çapraz kırılma deneyinin amacı numunelerin kaynak işleminden önceki mukavemetleri ile kaynaklı birleşmeden sonraki mukavemetleri arasındaki farkı belirlemektir. Kaynak işleminden sonra farklı presleme basınçlarında (290, 330, 370, 410 MPa) elde edilen numunelerden kaynaklı levhalar ve kaynak işlemi yapılmamış malzemelerden farklı presleme basınçlarında birer adet TS EN 23327'ye göre hazırlanmış ve Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü malzeme laboratuvarında bulunan preste Resim 6.4'teki kalıp düzeneği kullanılarak kırılmışlardır.

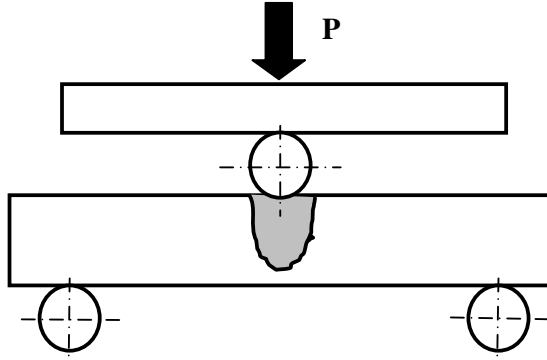
$$\text{Çapraz kırılma mukavemeti(ÇKM)}=3 \times P \times l / 2 \times b \times h^2 = \text{MPa}$$

P =Deney parçasının kırıldığı anda ölçülen yük (N)

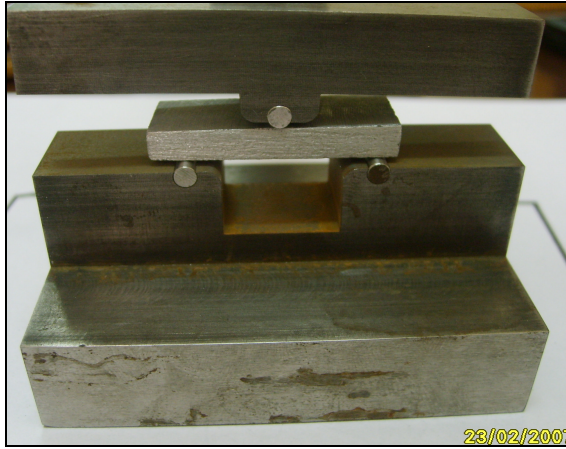
l = Destekler arası uzaklık (25,4±0,3 mm)

b =Deney parçasının genişliği

h =Deney parçasının yüksekliği



Şekil 6.7 Çapraz kırılma testinin şematik gösterimi



Resim 6.4. Çapraz kırılma testinde kullanılan kalıp düzeneği

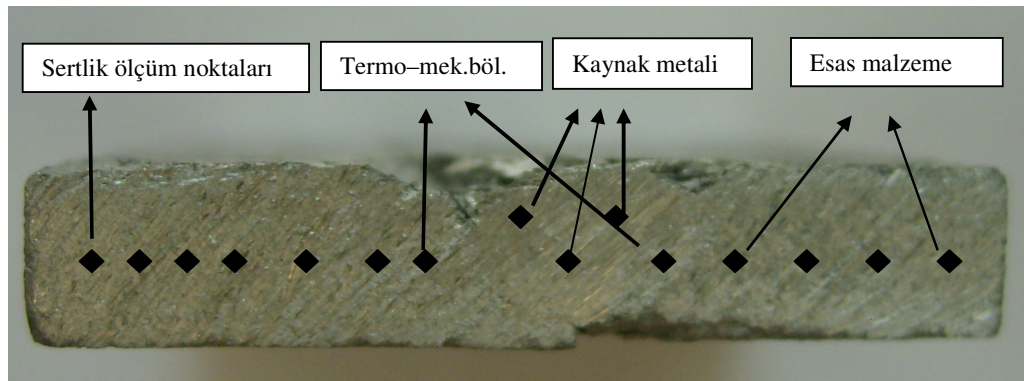
6.6.2. Mikro yapı numunelerinin hazırlığı

Kaynak parametrelerinin mikro yapıya etkisini görmek amacıyla birleştirilmiş numunelerden kaynak yönüne dik doğrultuda test numuneleri çıkarılmıştır. Numuneler, 240,400,600,800,1200 numaralı zımparalarla zımparalanmış ve 1 µm ve

0,3 μm elmas pasta ile parlatılmıştır. Parlatılmış yüzeyler hazırlanan (1 ml HF, 1,5 ml HCl, 10 ml HNO₃, 87,5 ml saf su) çözeltide dağlanmıştır. Dağlama ve kurutma işleminden sonra yüzeylerden ana malzeme, termo-mekanik bölge, geçiş bölgesi ve kaynak metalinin mikro yapısal değişimleri ifade eden noktalardan, Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü malzeme laboratuvarında bulunan Prior marka optik mikroskop ile mikro yapı fotoğrafları alınmıştır.

6.6.3. Mikro sertlik numunelerinin hazırlığı

Sıkıştırma basınçlarının ve kaynak parametrelerinin mikro sertliğe etkisini görmek amacıyla birleştirilmiş numuneler 6.6.2’de açıklandığı gibi hazırlanmıştır. Dağlama ve kurutma işleminden sonra yüzeylerden ana malzeme, geçiş bölgesi ve kaynak metalinin mikro sertlik değişimleri incelenmiştir. Numunelerin mikro sertlikleri Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü malzeme laboratuvarında bulunan Hmv Mikro Hardness Tester Shimadzu mikrosertlik cihazında ölçülmüştür. Mikro sertlik ölçümü Hv (0,1) yöntemiyle 100 g yük uygulanarak yapılmış, M 40 mikroskopta incelenmiştir. Mikrosertlik değerleri her bölgeden üçer ölçümün ortalaması alınarak değerlendirilmiştir (Şekil 6.8).



Şekil 6.8. Mikro sertlik ölçümlerinin şematik gösterimi

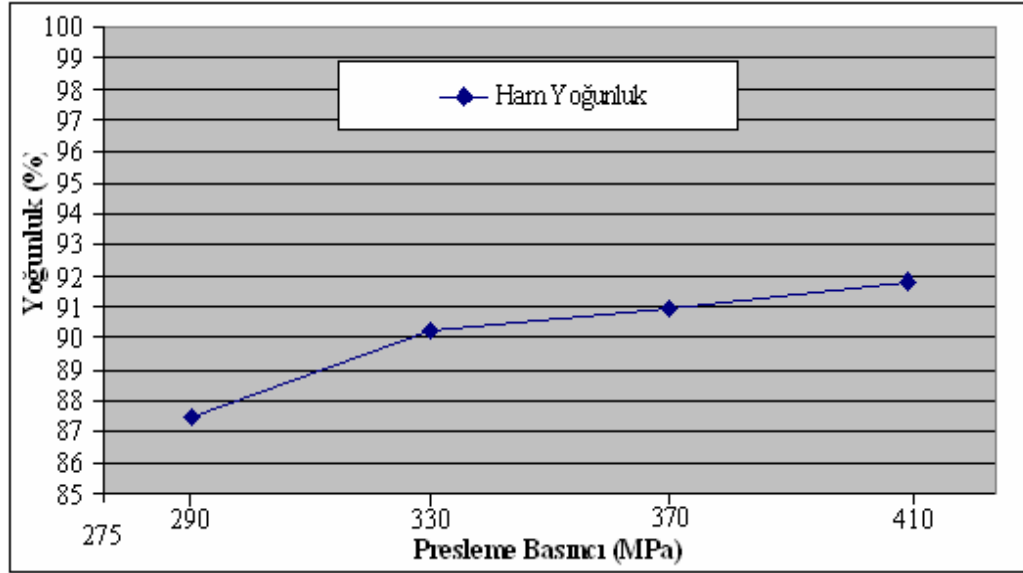
7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Toz metal malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılması amacıyla yapılan bu çalışmada 5x45x55 mm boyutlarında alüminyum toz metal bloklar 290, 330, 370, 410 MPa basınçlar kullanılarak üretilmişlerdir. Üretilen bu bloklar 600 °C'de vakum atmosferinde 60 dakika süre ile sinterlenmişlerdir. Numunelerin ham ve sinterleme sonrası yoğunlukları ölçülerek Çizelge 7.1'de verilmiştir. Sinterlenmiş numuneler Çizelge 6.2'de verilen parametreler kullanılarak sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmişlerdir. Birleştirilen bu numunelere mikro sertlik çapraz kırılma gibi mekanik testler ile metalografik inceleme yapılarak presleme, sinterleme ve kaynak parametrelerinin etkileri tartışılmıştır.

Çizelge 7.1'de görüldüğü gibi presleme basıncının artmasına bağlı olarak yoğunluklarda artmaktadır. Artan presleme basıncı ile toz partikülleri birbirleri üzerinden kayarak boşlukları doldurmakta ve hacimsel küçülme meydana gelmektedir. Ağırlık sabit kalarak hacimdeki azalma yoğunluk artışına sebep olmaktadır. 290 MPa'da % 88,31 yoğunluk elde edilirken sırasıyla 330 MPa'da % 90,45 370 MPa'da % 91,30 ve 410 MPa'da % 92,47 olmuştur. Yoğunluk artışı % 90'lardan sonra oranı azalan bir şekilde artmaktadır (Şekil 7.1).

Çizelge 7.1. Üretilen toz metal malzemelerin ham ve 600 °C'de sinterlenmiş yoğunluk değerleri

Numune No	Presleme Basıncı (MPa)	Ham Yoğunluk (%)	Ortalama (%)	Sinterleme Sonrası Yoğunluk (%)	Ortalama (%)
1		89,29		89,33	
2		88,03		88,07	
3	290	87,92	87,20	88,18	88,31
4		85,48		87,92	
5		86,22		88,22	
6		87,77		88,11	
7		93,51		92,40	
8		93,07		92,11	
9	330	87,40	90,22	88,70	90,45
10		90,81		89,85	
11		86,51		89,59	
12		90,03		90,07	
13		94,62		95,44	
14		91,55		91,59	
15	370	89,70	90,93	89,77	91,30
16		91,18		91,22	
17		90,33		90,59	
18		88,18		89,18	
19		92,33		93,85	
20	410	90,70	91,84	88,70	92,47
21		93,14		96,18	
22		91,18		91,14	



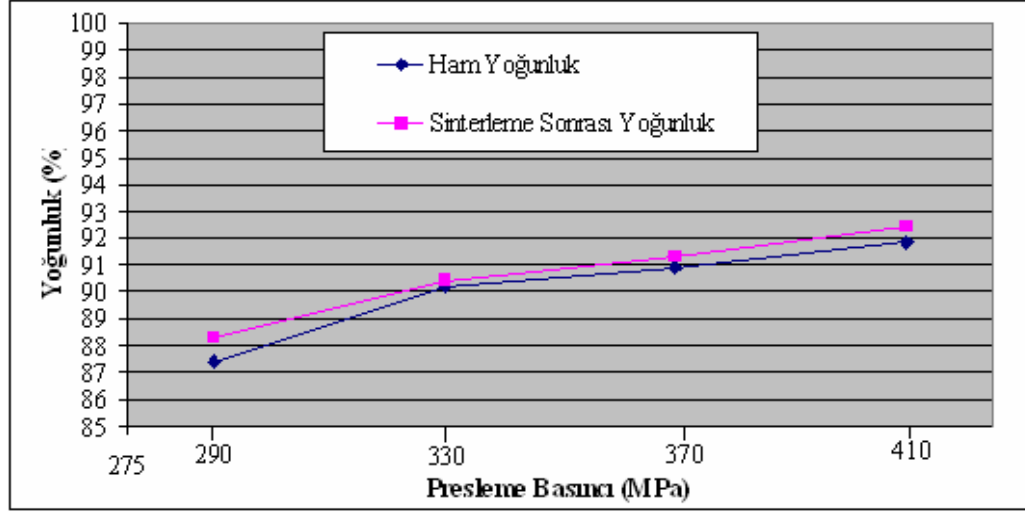
Şekil 7.1. Presleme basıncına bağlı olarak malzemenin ham yoğunluk değerindeki değişim

7.1. Sinterleme Sonrası Yoğunluk

Ham yoğunluk grafiğinde olduğu gibi sinterleme sonrası yoğunluk değerlerinde de presleme basıncına bağlı olarak artış gözlenmiştir. 290 MPa basınçta ham yoğunluk ortalama % 87,20 iken sinterleme sonrası yoğunluk % 88,31 elde edilmiştir ve sırasıyla 330 MPa’da ham yoğunluk % 90,22’den sinterleme sonrası % 90,45’e 370 MPa’da ham yoğunluk % 90,93’den sinterleme sonrası % 91,30’a, ve 410 MPa’da % 91,84’den sinterleme sonrası % 92,47’ye çıktığı görülmektedir. Şekil 7.2’de presleme basıncına göre sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimi görülmektedir.

Presleme ile oluşan mekanik bağlar sinterleme sırasında metalurjik bağa dönüşmektedir. Metalurjik olarak bağ oluşturan taneler tek tane şeklinde yeniden oluşurken büzülme kuvvetleri sonucu taneler arası eksenel yaklaşma olmakta ve gözenekler küçülmektedir. Gözeneklerin küçülmesi ve eksenel çekmeler hacimsel küçülme meydana getirmekte bu da yoğunluk artışını sağlamaktadır. Şekil 7.2’de

görüldüğü gibi sinterleme sonrası yoğunluklar ham yoğunluklara göre artmaktadır. Yoğunluklardaki bu az fark mekanik özelliklerde önemli artışlar sağlamaktadır.



Şekil 7.2. Presleme basıncına göre sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimi

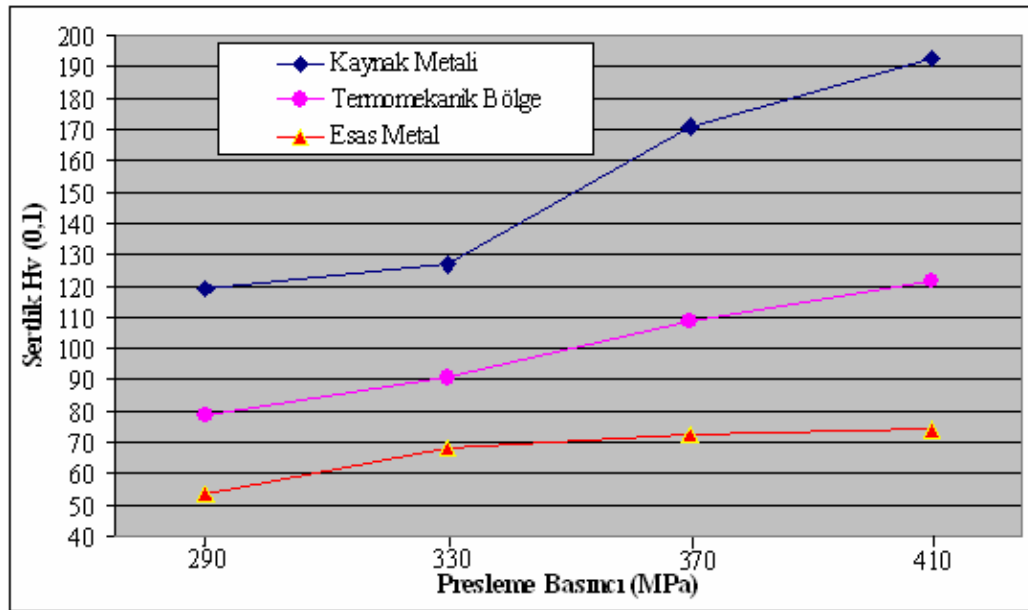
7.2. Mikro Sertlik Değerleri

Farklı presleme basınçlarında (290, 330, 370, 410 MPa) elde edilen numunelerin mikro sertlik değerleri Çizelge 7.2’de verilmiştir. Presleme basıncı arttıkça esas metalin, termo mekanik bölgenin ve kaynak metalinin mikro sertlik değerinin arttığı, ayrıca esas metalden kaynaklı bölgeye doğru sertlik değerinin arttığı görülmektedir.

Çizelge 7.2. Presleme basıncına göre mikro sertlik değerleri

Presleme Basıncı (MPa)	Mikro sertlik değerleri (Hv)		
	Esas malzeme	Termo mekanik bölge	Kaynak metali
290	53,4	78,6	119
330	68,6	91	127
370	72,5	109	171
410	74,1	122	193

Çizelge 7.2’de görüldüğü gibi artan presleme basıncı sertlik artışına da neden olmuştur. Esas malzemede 290 MPa’da 53,4 Hv iken 330 MPa’da 68,6 Hv, 370 MPa’da 72,5 Hv ve 410 MPa’da 74,1 Hv dir. Termo mekanik bölgede 290 MPa’da 78,6 Hv iken 330 MPa’da 91 Hv, 370 MPa’da 109 Hv ve 410 MPa’da 122 Hv dir. Kaynak metalinde ise 290 MPa’da 119 Hv iken 330 MPa’da 127 Hv, 370 MPa’da 171 Hv ve 410 MPa’da 193 Hv dir. Artan presleme basıncı ile yoğunluk arttığında sertlik buna bağlı olarak artmaktadır. Kaynak sırasında karıştırıcı omuzun yaptığı basınç ve sürtünme sonucu açığa çıkan ısı sonucu malzemede plastik deformasyon kolaylaşmakta ve kaynak basıncı deformasyona sebep olmakta bunun sonucu sertlikte artmaktadır.



Şekil 7.3. Presleme basıncına göre esas metal termo mekanik bölge ve kaynak metalindeki mikro sertlik değişimi

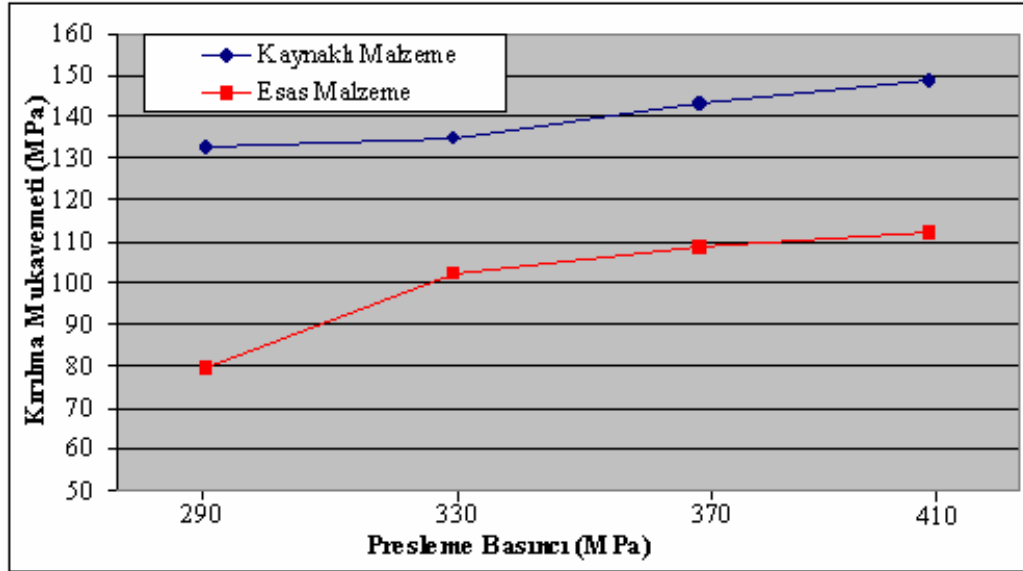
7.3. Çapraz Kırılma Deney Sonuçları

Farklı sıkıştırma basınçlarında (290, 330, 370, 410 MPa) elde edilen toz metal alüminyum blok malzemelerin çapraz kırılma dayanımları 6.6.1’de açıklandığı şekilde tespit edilmiştir. Çapraz kırılma deneyi esas malzeme ve kaynaklı birleştirmeye ayrı ayrı uygulanarak elde edilen değerler Çizelge 7.3’te verilmiştir.

Çizelge 7.3. Presleme basıncına göre çapraz kırılma değerleri

Presleme basıncı (MPa)	Çapraz kırılma değerleri (MPa)	
	Esas malzeme	Kaynaklı birleştirme
290	79,66	132,68
330	102,28	134,54
370	108,43	143,22
410	111,88	148,78

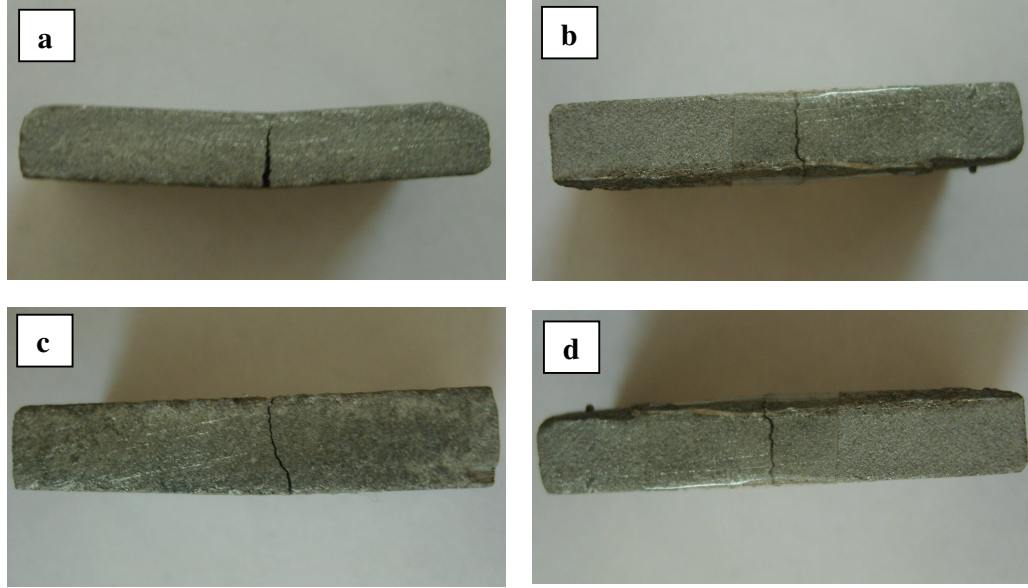
Şekil 7.4'te yoğunluk artışına göre esas metal ve kaynaklı birleştirmenin çapraz kırılma mukavemetindeki değişim görülmektedir. Şekil 7.4 incelendiğinde kaynaklı birleştirmenin çapraz kırılma mukavemeti esas malzemenin çapraz kırılma mukavemetinden daha yüksektir. Presleme basıncı arttıkça gerek esas metalin, gerekse kaynaklı birleştirmenin çapraz kırılma mukavemetinin arttığı görülmektedir. Mikro sertlik deney sonuçlarında da görüldüğü gibi omuz altında kalan bölgenin ve kaynak metalinin mikro sertliği artmaktadır. Karıştırıcı omuzun sürtünme sonucu neden olduğu ısı artışı plastik deformasyona sebep olmuş, plastik deformasyonda sertlik artışına neden olmuştur. Esas metale göre termo- mekanik bölgenin ve kaynak metalinin plastik deformasyonla mukavemet kazanması sonucu bu bölgenin çapraz kırılma dayanımları da artmıştır. Bu artış artan presleme basıncına bağlı olarak artmakta ve esas metal için en yüksek yoğunluklu (410 MPa) numunede 111,88 MPa çapraz kırılma dayanımı gösterirken, kaynakla birleştirilmiş en düşük presleme basıncına (290 MPa) sahip numunede bile 132,68 MPa çapraz kırılma dayanımı göstermiştir. Bu da kaynak sırasında karıştırıcı omuzun malzemede plastik deformasyona sebep olmasına bağlanmaktadır.



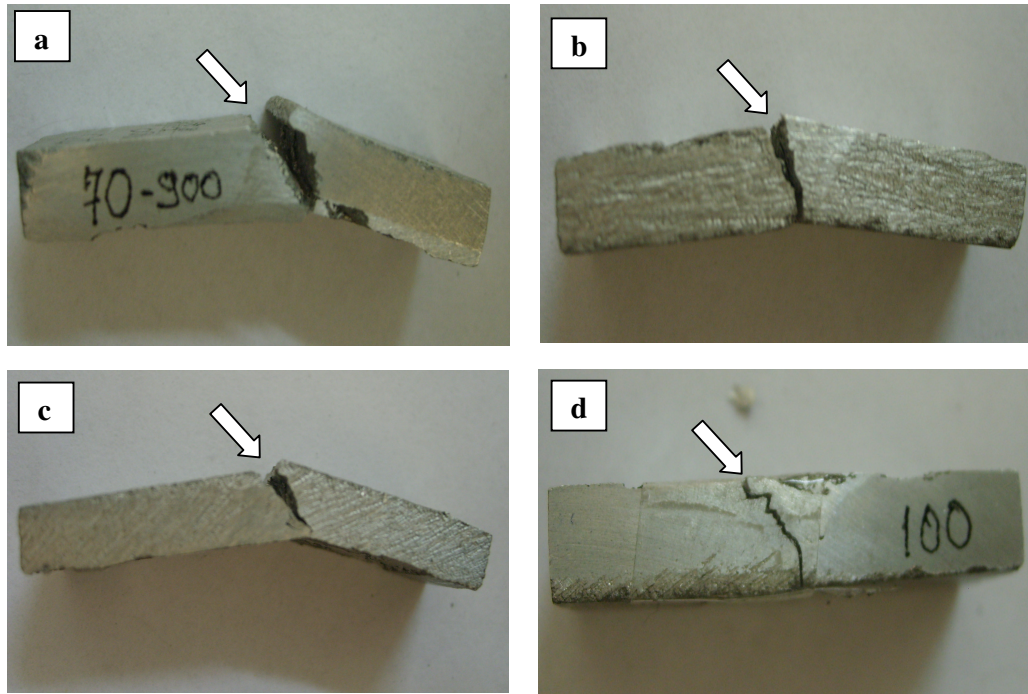
Şekil 7.4. Presleme basıncına göre esas metal ve kaynaklı birleştirmenin çapraz kırılma mukavemetindeki değişim

Resim 7.1’de farklı presleme basıncında çapraz kırılma testi uygulanmış esas malzemeler, Resim 7.2’de ise yine farklı presleme basıncında çapraz kırılma testi uygulanmış kaynaklı birleştirmeler görülmektedir.

Kaynakla birleştirilmiş numunelerin çapraz kırılma testi sonucu kırılma yerlerine bakıldığında kırılmanın kaynak metali ile esas metal geçiş bölgesinde olduğu görülmektedir. Karıştırıcı esas metalden kaynak metali oluşturması sırasında oluşan geçiş bölgesinde tane yapısı bozulmakta ve muhtemelen çentik etkisi oluşturacak noktalar veya hatalar meydana getirmekte yükleme sırasında da buralardan kırılma başlayıp geçiş bölgesi sınırını takip etmektedir (Resim 7.2).



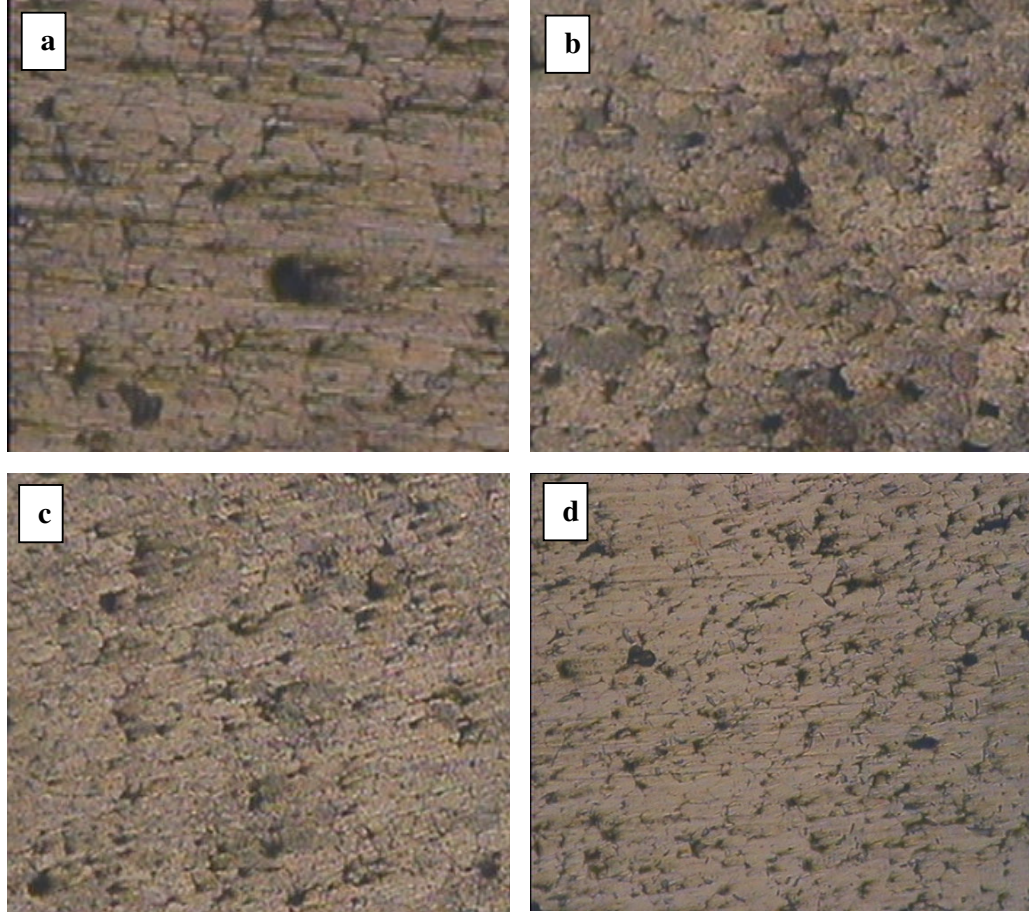
Resim 7.1. Farklı presleme basıncında çapraz kırılma testi uygulanmış esas malzemeler a) 290 MPa b) 330 MPa c) 370 MPa d) 410 MPa



Resim 7.2. Farklı presleme basıncında çapraz kırılma testi uygulanmış kaynaklı birleştirmeler a) 290 MPa b) 330 MPa c) 370 MPa d) 410 MPa

7.4. Mikro Yapı Deney Sonuçları

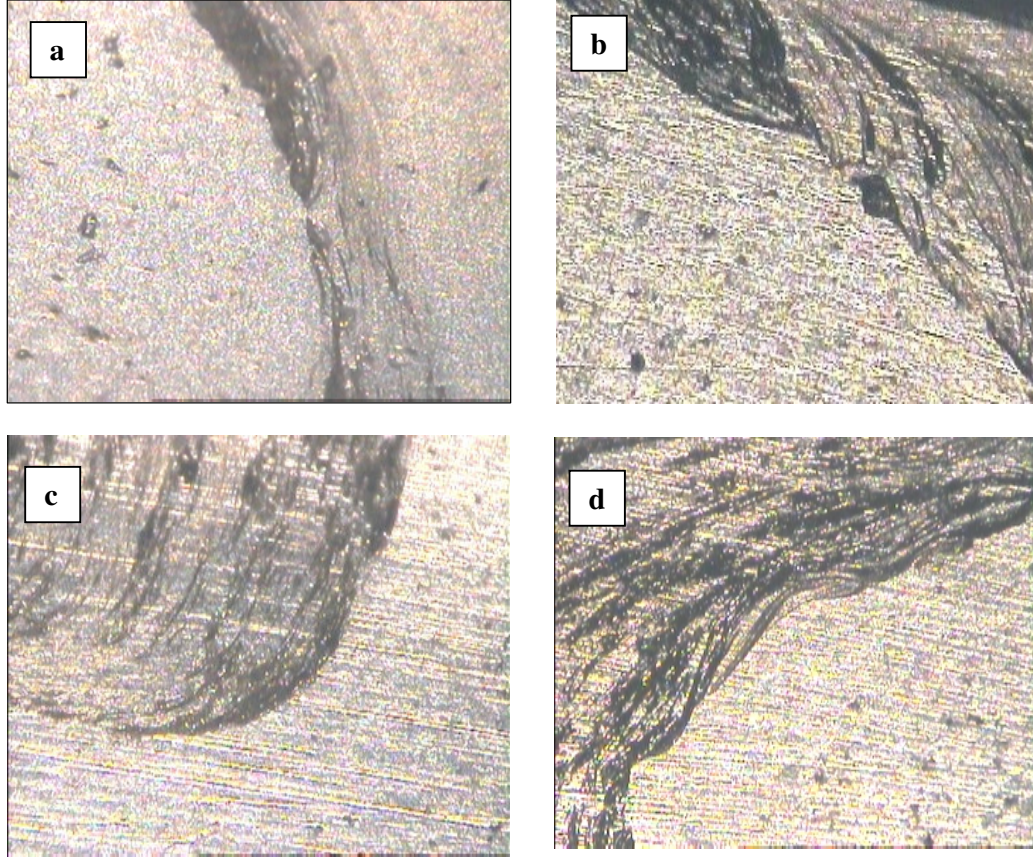
7.4.1. Esas malzeme mikro yapısı



Resim 7.3. 900 dev/dak 6 mm/dak kaynak hızında esas malzeme mikro yapısı (x50)
a) 290 MPa b) 330 MPa c) 370 MPa d) 410 MPa

Esas metalin mikro yapısı Resim 7.3'te görülmektedir. Mikro yapılar incelendiğinde artan presleme basıncı ile gözenek miktarında azalma ve boyutunda küçülme olduğu görülmektedir. Bu durum toz metalurjisinde genel bir durumdur. Toz metal malzemeler farklı amaçlar için üretilmektedir. Eğer gözeneklilik özellikle istenmiyorsa, tam yoğunluğa yakın yoğunluklu numuneler tercih edilir. Kaynak işlemi için tam yoğunluğa yakın yoğunluklu numuneler daha iyi kaynaklanabilirlikler sağladığı bir çok çalışmada belirtilmiştir.

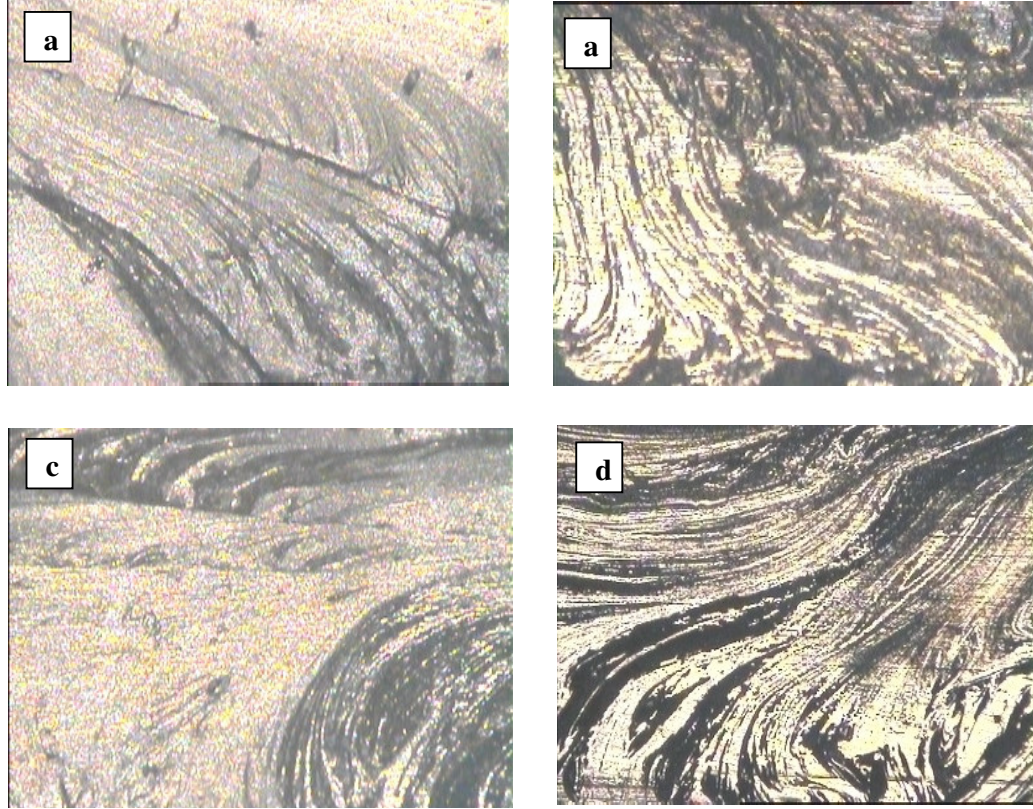
7.4.2. Kaynak metali ve geçiş bölgesi mikro yapısı



Resim 7.4. 900 dev/dak 6 mm/dak kaynak hızında kaynak geçiş bölgesi mikro yapısı (x50) a) 290 MPa b) 330 MPa c) 370 MPa d) 410 MPa

Resim 7.4 incelendiğinde düşük yoğunluklu toz metal malzemelerin kaynağında karıştırıcı ucun yönlendirdiği tanelerde süreksizliklerin olduğu buna bağlı olarak kaynak metalinde ilerleme hızının da etkisi ile gözeneklerin daha iri olduğu görülmektedir (Şekil 7.4 a ve b). Artan yoğunlukla birlikte kaynak metalinde karıştırıcı ucun dönme yönünde malzemede akma olduğu ve daha küçük gözenekli bir kaynak metali olduğu görülmektedir. SKK ile birleştirilen bütün numunelerde esas metalin tane yapısı, kaynak edilmiş bölgede özellikle karıştırıcı ucun dış çapından itibaren önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Yumuşayan ve karıştırıcının etkisi ile tane yapısının karıştırma yönüne doğru yönlendiren karıştırıcı uç kaynak metalini oluştururken, omuzun altında kalan metal yeniden kristalleşerek,

termo mekanik olarak yeniden kristalleşen bölgeyi oluşturmaktadır. 900 dev/dak dönme hızı ve 6 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynağa ait mikro yapıda karıştırıcı ucun malzemeyi esas metalin kenarından kaynak bölgesine taşıması görülmektedir (Resim 7.4).



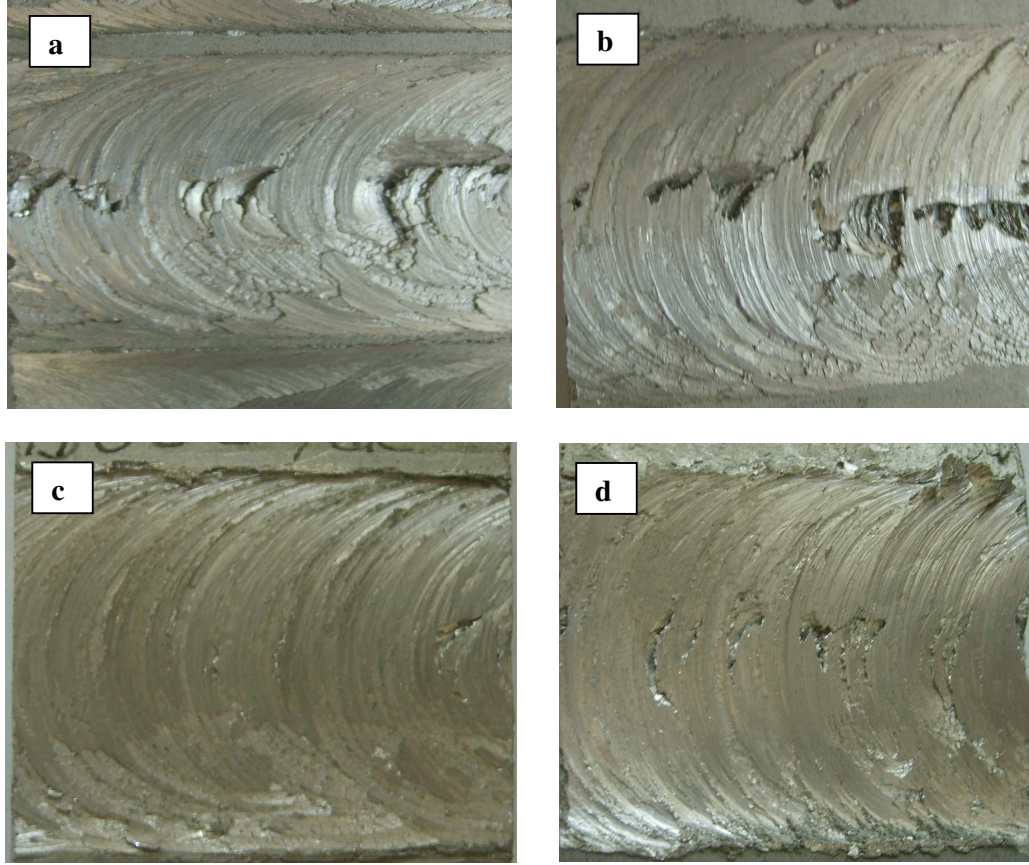
Resim 7.5. 900 dev/dak 6 mm/dak. kaynak hızında kaynak bölgesi mikro yapısı (x50) a) 290 MPa b) 330 MPa c) 370 MPa d) 410 MPa

Kaynak bölgelerinde genel olarak tipik sürtünme karıştırma kaynak yöntemi uygulanan malzemelerde görülen dönme yönüne doğru yönelmiş kaynak metali yapısı görülmektedir. Karıştırıcı ucun dönme ve ilerleme hareketi ile yumuşayan alüminyum malzemenin mikro yapıdaki helisel izleri belirgin olarak görülmektedir (Resim 7.5).

Çizelge 6.2’de verilen her parametrede deneyler yapılmış olup ancak en uygun birleştirme 900 dev/dak dönme hızı ve 6 mm/dak ilerleme hızında elde edildiği için

bu parametrelerde birleştirilen numunelere yoğunluk, kaynaklanabilirlik ilişkisi açısından değerlendirme yapılmıştır.

7.5. Kaynak Metali Makro Yapısı



Resim 7.6. 900 dev/dak 6 mm ilerleme hızında yapılan kaynağın makro görünüşü
a) 290 MPa b) 330 MPa c) 370 MPa d) 410 MPa

Resim 7.6’da her dört farklı yoğunluktaki toz metal alüminyum malzemelerin SKK ile birleştirilmiş makro görüntüler verilmiştir. Sırasıyla (a)’da % 88, (b)’de % 90, (c)’de % 91 ve (d)’de % 92 yoğunluklu kaynak yüzeyleri görülmektedir. (a) ve (b)’de yoğunluk düşük olması sebebiyle omuz altında karıştırma yönüne şekillenen kaynak metalinde kaynak merkezinde yeterli kaynak metali yığılmaması sonucu çatlaklar şeklinde gerçekleşmiştir. (c) ve (d)’de ise artan yoğunluk sonucu kaynak yüzeyinin daha düzgün ve özellikle (c)’de makro olarak hatasız bir birleşme

oluşturmuştur. Bunun nedeni yoğunluğun yüksek olması sebebiyle malzeme akışı süreklilik göstermiş ve gözeneksiz bir metal yığılması oluşmuştur. Toz metal malzemelerin gözenekli olmaları sebebiyle karıştırma sırasında karıştırıcı ucun gözeneklere geldiğinde malzeme akışında kopmalar meydana gelerek süreksizlikler görülmektedir. Bu durum kaynak yüzeyinde makro olarak boşluklu yüzeyler meydana getirdiği gibi kaynak metalinde de mikro süreksizliklere sebep olabilmektedir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Toz metal alüminyum malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin araştırılması ile ilgili yapılan bu tez çalışmasında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiş ve bazı önerilerde bulunulmuştur.

- 1) Bu çalışmada 900 dev/dak dönme ve 6 mm/dak ilerleme hızında SKK ile birleştirilmiş numuneler gerek mekanik gerekse metalurjik olarak en iyi birleştirmeyi sağlamıştır.
- 2) Toz metal parçalarda kaynak parametreleri yoğunluğa bağlı olarak ayarlanmalıdır.
- 3) Sıkıştırma basınçları arttıkça elde edilen toz metal malzemelerde sertlik artmıştır.
- 4) Kaynak ilerleme hızı sabit iken karıştırıcı ucun devir hızı artırıldığında malzemeye giren ısı miktarının artmasıyla az da olsa kaynak yüzeyinde ondüle oluşmaktadır.
- 5) Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen numunelerin, kaynak dikişi görüntüsünün, diğer kaynak yöntemlerinin kaynak dikiş görüntüsüne göre çok daha düzgün olduğu ve herhangi bir üst yüzey işlemine gerek olmadığı görülmüştür.
- 6) 1400 dv/dak dönme 6 mm/dak kaynak ilerleme hızında yüksek devir düşük kaynak hızına bağlı olarak ısı girdisi arttığından kısmen yanma ve yüzey bozukluklarının meydana geldiği görülmüştür.
- 7) Kaynak bölgesinde karıştırıcı ucun plastik şekil değiştirici etkisi sebebiyle yoğunlaşmanın arttığı ve buna bağlı olarak çapraz kırılma sonuçlarına göre kaynaklı numunelerin esas malzemeye oranla daha mukavemetli olduğu görülmüştür.
- 8) Kaynak numunelerine uygulanan çapraz kırılma testlerinde numuneler kaynak dikişinin hemen yanındaki ITAB bölgesinden kırılmıştır. Bu bölge termo-mekanik

olarak yeniden kristalleşen ve kaynak metali ile esas metalin geçiş bölgesine karşılık gelmektedir.

9) Bütün kaynaklı numunelerde esas malzemeden kaynak metaline doğru gidildikçe sertlik değerinde plastik deformasyonun sebep olduğu bir artış meydana geldiği görülmektedir.

10) Karıştırıcı uç devir sayısı ve ilerleme hızı artışı ile kaynak bölgesinde malzeme akışındaki süreksizlikler sonucu yüzey düzgünlüğü bozulmuştur.

11) Toz metal alüminyum parçalarda yoğunluk arttıkça kaynaklanabilirliğin arttığı görülmüştür.

12) Toz metal parçaların mekanik ve metalografik özellikleri öncelikle kaynak bölgesinde ve ısı etkisi altındaki bölgede değişmektedir.

13) Isıl işlemler uygulanarak kaynak bağlantısının mekanik özellikleri geliştirilebilir.

Sonuç olarak toz metal alüminyum malzemelerden elde edilen blok numunelerin sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynak edilebileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Kurt, A., “Toz metal malzemelerin kaynaklanabilirliği”, *Türk Toz Metalurjisi Derneği Haber Bülteni*, 25: 4 (2003).
2. Roll, K.H., “History of Powder Metallurgy”, *Metals Handbook, 9th edition*, ASM. *Metal park*, Ohio, 7: 1–110 (1984).
3. Yavuz, N., Güner, R., “Demir esaslı toz metal parçaların elektrik direnç kaynağında optimum kaynak şartlarının belirlenmesi” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 7 (1): 221–228 (2002).
4. Kurt, A., Gülenç, B., Durgutlu, A., “Ergitmeli kaynak yöntemleri ile birleştirilen hadde-toz metal bakır malzemede ITAB’ın incelenmesi”, *2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, Ankara, 565-570 (1999).
5. Kurt, A., Türker, M., Gülenç, B., “Saf demir tozlarından sıkıştırılan T/M parçaların düşük karbonlu çeliğe MİG kaynağı ile kaynatılabilirliğinin araştırılması”, *1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, Ankara, 595-602 (1996).
6. Özdemir, M., “Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile alüminyum malzemelerin kaynaklanabilirliği”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-40 (2003).
7. Dawes, C.J., Thomas, W. M., “Friction stir process welds aluminium alloys”, *Welding Journal*, 18 (1): 41-45 (1996).
8. Uzun, H., Yılmaz, R., Fındık, F., “Alüminyum alaşımları için süper birleştirme yöntemi: sürtünme karıştırma kaynak tekniği ve uygulamaları”, *Metal Dünyası*, 118: 75-82 (2003).
9. Johnsen, M.R., “Friction stir welding takes off at boeing”, *Welding Journal*, Cambridge, 35-39 (1999).
10. Çam, G., “Al. alaşımları için geliştirilen yeni kaynak yöntemleri”, *III. Ulusal Kaynak Teknolojisi Kongresi*, İstanbul, 267–277 (2001).
11. Meriç, C., Atık, E., Türüdü, T., “Kaynakla birleştirilmiş demir esaslı toz metal parçaların kaynak bölgesinin incelenmesi”, *Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4: 1-11 (2005).
12. Baksan, B., Gürler, R., “Toz metalurjisinin savunma sanayinde uygulanması” *Osmangazi Üniversitesi, Metalurji Enstitüsü*, www.msb.gov.tr Eskişehir, 1-15 (2004)

13. Karataş, Ç., “Toz enjeksiyon kalıplamada kurşun, demir, alümina tozlarının basılabilirliklerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-25 (1992).
14. Kurt, A., “Toz metal bronz yatak malzemelerin özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-59 (1992).
15. Öveçoğlu, M.L., “Toz metalurjisi tarihsel gelişim, üretim aşamaları ve yeni eğilimler”, **9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi**, İstanbul, 449-475, (1997).
16. Durmuş, H., Meriç, C., Uzun, R.O., “Al-SiC kompozitinin lazer kaynağı ile birleştirilmesi”, **Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi**, 2 (1): 67-74 (2006).
17. German, R.M., “The fundamental principles of powder metallurgy”, **Powder Metallurgy, Papers/Powder Metallurgy.html**, 1-7 (1997).
18. Tanber, O., “Toz metalurjisinde Türkiye’nin yeri”, **9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi**, İstanbul, 11-15 (1997).
19. Boz, M., “Seramik takviyeli bronz esaslı toz metal fren balata üretimi ve sürtünme aşınma özelliklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 7-14 (2003).
20. Tülbentçi, K., Yılmaz, M., “Farklı takım çeliklerinin katı hal kaynağı”, **II. Ulusal Kaynak Sempozyumu Bildiri Kitabı**, İstanbul, 303-314 (1989).
21. Sulazec, A., “Termal effects in friction welding”, **Int. J. Meclt.Sci.**, 32 (3): 467-478 (1990).
22. Kong, C.Y., North, T.H., Perovic, D.D., “Microstructural features of friction welded MA956 superalloy material”, **Metallurgical and Material Transactions**, 26 (1): 4019-4029 (1996).
23. Yılmaz, M., “Farklı takım çeliklerinin sürtünme kaynağında kaynak bölgesinin incelenmesi”, Doktora Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 20-25 (1993).
24. Dabak, S., “Sürtünme kaynak tezgahı imali SAE 8626-1040 malzemelerin kaynağı ile mekanik ve metalografik incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Balıkesir, 25-33 (1995).
25. Anık, S., Anık, E., Vural, M., “1000 soruda kaynak teknolojisi el kitabı”, **Birsan Yayınevi**, İstanbul, 1: 223-228 (1993).

26. Varol, R., Tunay, R., F., Tüfekçi, K., “Toz metal parçaların elektron ışın kaynağı ile birleştirilmesi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Dergisi*, Isparta, 1-6 (2002).
27. Kurt, A., Aksoy, M., Sarıtaş, S., “Investigation of diffusion welding parameters for welding of pm bronze to a mild steel, pm 97”, *Proce. Of Advance Structural Pm Component Production*, Münih, Germany, 219-227 (1997).
28. Kaçar, H., Durmuş, M.C., “Metal matrisli kompozitlerin birleştirme yöntemleri” *Metal Dünyası*, Manisa, 120:59 (2003).
29. Anık, S., “Kaynak tekniği el kitabı yöntemler ve donanımlar”, *Gedik Holding Yayını*, İstanbul, 100-144 (1991).
30. Çam, G., “Sürtünme karıştırma kaynağı ve uygulamaları”, *9. Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 450–458 (2002).
31. Çam, G., “Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takımlardaki gelişmeler”, *TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongre ve Sergisi*, Kocaeli, 47-64 (2003).
32. Külekçi, M.K., Şık, A., “Sürtünme karıştırma kaynağı ile alüminyum alaşımı levhaların birleştirilmesi ve elde edilen kaynaklı bağlantıların özellikleri” *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Isparta, 7 (3):70–75. (2003).
33. Atlamaz, M., “Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile 6xxx serisi alüminyum alaşımlarının alın ve bindirme kaynağının uygulanabilirliğinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antakya, 1–33 (2002).
34. Özsoy, M., Kaluç, E., “Sürtünen eleman ile birleştirme kaynağının esasları”, *Mühendis ve Makine*, 513: 1-14 (2002).
35. Kayabaş, Ö., “Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan alüminyum kaynağında kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Dönem Projesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 83-89 (2004).
36. Mahoney, M.W., “Science friction”, *Welding & Joining*, January / February, 7-12. (1997).
37. Nicholas, E.D., Kallee, S. W., “Friction stir welding a decade on” *II. World Asian Pacific International Congress*, Sydney, 45–50 (2000).
38. Thomas, W .M., Nicholas, E.D., "Friction stir welding for the transportation industries", *Materials and Design*, 18 (4): 269-273 (1997).

39. Seidel, T.U, Reynolds, A.P., “Visualization of the material flow in AA2195 friction stir welds using a marker insert technique”, *Metallurgical and Material Transactions A*, 32: 2879-2884 (2001).
40. Prado, R.A., Murr, L.E., Shindo D J., Solo K.F., “Tool wear in the friction-stir welding of aluminium alloy 6061+20%A1203:a preliminary sludy”, *Scripta Materialia*, 45 (1): 75-80 (2001).
41. Mert, S., Kalu, E., “Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takımlardaki gelişmeler”, *Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi* , Kocaeli, 103-115 (2003).
42. Thomas, W.M., ve ark., “Friction stir welding tool developments”, *Aluminium Joining Symposium, TMS Annual Meeting*, New Orleans, Lousiana, USA, 213-224 (2001).
43. am, G., “Sürtünme karıştırma kaynağı al-alışımları için geliştirilmiş yeni bir kaynak teknolojisi”, *Mühendis ve Makine*, 46 (541): 30–39 (2005).
44. Smith, S.D., ve ark., “Friction stir welding tool developments”, *Aluminium Joining Symposium*, USA, 213-224 (2001).
45. Serindağ, H.T., “Pirinç levhaların sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle alın kaynağı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, Antakya, 1–19 (2006).
46. Ataoğlu, H., “Sürtünme karıştırma kaynaklı alüminyum alaşımlarının iç yapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay, 50-55 (2002).
47. Kurt, A., Özdemir, M., Boz, M., “Alüminyum malzemelerinin sürtünme karıştırma kaynağında kaynak hızının birleşebilirliğe etkisi”, *IV. Ulusal Kaynak Teknolojisi Kongresi*, Kocaeli, 89–99 (2003).
48. Kurt, A., Boz, M., Özdemir, M., “Alüminyum malzemelerinin sürtünme karıştırma kaynağında kaynak hızının birleşebilirliğe etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Ankara, 19 (2): 191-197 (2004).
49. Kallee S.W ve ark., “Friction stir welding a modern joining process”, *Welding Journal*, 81 (10): 47-50 (2002).
50. Jonhson, R., Kallee, S., “Friction stir welding”, *Materials World Volume*, 7 (12): 751-753 (1999).
51. Kaluç, E., Bozduman, B., ”Sürtünen elaman ile birleştirme kaynak yöntemi”, *Makine Magazin* 27:54-61 (1998).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÇAKIR, Mustafa
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 10.10.1972 İspir
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 364 39 31
 Faks : 0 (312) 364 39 70
 e-mail : m.cakir25@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Metal İşleri Bölümü	1995
Lise	İspir Endüstri Meslek Lisesi	1990

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1995–2005	MEB Ankara Atatürk Tek.ve E.M. Lisesi	Öğretmen
2005-2007	MEB Ankara Abidinpaşa Tek.ve E.M.Lis.	Müdür Yardımcısı

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Masa Tenisi, Futbol, Bilişim teknolojileri,