

**SOĞUK VE SICAK HADDELENMİŞ ALÜMİNYUM 6016
ALAŞIMLARININ KAYNAK DAVRANIŞLARI VE
KALINTI GERİLME ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Met. Müh. Fırat EŞİT
506041409**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 8 Mayıs 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 1 Ağustos 2006**

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Yılmaz TAPTIK

**Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Ahmet TOPUZ (Y.T.Ü.)
Doç.Dr. Gültekin GÖLLER (İ.T.Ü.)**

Ağustos 2006

ÖNSÖZ

Üretim yöntemleri yönünden birbirinden farklı özellikler gösteren sıcak ve soğuk haddelenmiş 6016 alüminyum alaşımlarının kaynak davranışlarının incelendiği bu çalışmada, kaynak parametrelerinin kaynaklanabilirliğe etkileri, kaynak sonrası kaynak hatalarının incelenmesi ve kalıntı gerilme analizi çalışmaları yapılmıştır.

Yapmış olduğum bu yüksek lisans tez çalışmam sırasında destek, öneri ve eleştirileriyle her zaman yanımda olan, kendisinden mesleki ve hayata dair çok şey öğrendiğim ve öğreneceğimi umduğum değerli hocam Prof. Dr. Yılmaz TAPTIK' a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tezim aşamasında çok büyük yardımlarını gördüğüm Dr. Özgül KELEŞ' e, Met. Müh. Ercan TANRISEVER' e, Met. Y. Müh. Ferruh TÜMER' e ve THY. A.O. kaynak ve tahribatsız muayene atölyesinde deneyimlerini benimle paylaşan ve çok şey öğrendiğim çalışanlara çok teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim boyunca her konuda yardım ve moral desteklerini benden esirgemeyen değerli arkadaşlarım Met. Müh. Yasin YEŞİL' e, Met. Müh. Köksal Kurt' a, Met. Müh. İzgen Gizem BALKAR' a ve tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, herşeyimi kendilerine borçlu olduğum aileme sonsuz ve yürekten teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Ağustos, 2006

Fırat EŞİT

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
1. GİRİŞ	1
2. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	3
2.1 Alüminyumun Karakteristik Özellikleri	3
2.2 Alaşım Elementleri	5
2.3 Alüminyum Alaşımının Sınıflandırılması	7
2.3.1 Alaşım Elementlerine Göre Sınıflandırma	7
2.3.2 Kondisyonlarına Göre Sınıflandırma	7
2.3.3 Isıl İşlem Uygulanıp Uygulanamamalarına Göre:	9
2.4 Alüminyum Alaşımının Kaynak Özellikleri	9
2.4.1 1XXX Grubu	9
2.4.2 3XXX Alaşımları	9
2.4.3 4XXX Alaşımları	10
2.4.4 5XXX alaşımları	10
2.4.5 2XXX Alaşımları	10
2.4.6 6XXX Alaşımları	11
2.4.7 7XXX Alaşımları	11
2.4.8 8XXX Alaşımları	12
2.5 Alüminyum 6016 Alaşımının üretim yöntemleri bakımından farklılıkları	12
3. ALÜMİNYUM KAYNAK YÖNTEMLERİ	14
3.1 Kaynak ve Alüminyum Kaynak Yöntemleri	14
3.2 TIG (Tungsten gaz korumalı) Kaynağı	16
3.2.1 TIG Kaynak Yönteminin Temel Prensipleri	17
3.2.2 AC-TIG Kaynağında Kullanılan Koruma Gazları	17
3.2.3 Tungsten Elektrodlar	19
3.3 Dolgu Metalinin Seçilmesi	20
3.3.1 Kaynak Metalinin Dilüsyonu	20
3.3.2 Çatlak Oluşumu	21
4. ALÜMİNYUM KAYNAĞINDA MEYDANA GELEN HATALAR	22
4.1 Kaynak Bölgesinde Meydana Gelen Boşluklar	22
4.2 Kaynak Sırasında Oksit Film Tabakasının Kaldırılması	26

4.3	Sıcak Çatlak Oluşumu	28
4.4	Kaynak İşleminin Neden Olduğu Mukavemet Kaybı	30
4.4.1	Kaynak Metalinde Meydana Gelen Mukavemet Kaybı	31
4.4.2	Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)	32
4.5	Kaynak Hataları ve Kaynak Hatalarının Tespiti	34
4.5.1	Kalıntılar	34
4.5.2	Yetersiz Ergime	34
4.5.3	Yetersiz nüfuziyet	34
4.5.4	Yanma Olukları	34
4.5.5	Yetersiz Dolgu	35
4.5.6	Overlap	35
4.5.7	Aşırı Yüksek Kaynak Dikişi	35
4.5.8	Ark Yanıkları	35
4.5.9	Sıçrantılar	35
5.	KALINTI GERİLME ANALİZİ	38
5.1	Malzemelerde Kalıntı Gerilmeler	38
5.2	Kalıntı Gerilme Konusunda Temel Kavramlar	39
5.3	Kalıntı Gerilmelerin Ölçüm Yöntemleri	40
5.4	X- Işınları Kırınımı Yöntemi ile Gerilme ve Kalıntı Gerilmelerin Belirlenmesi	41
5.5	X-Işınları Kırınımı ile Gerilme Hesabında Kullanılan Eşitlikler	41
5.6	$d\text{-sin}^2\psi$ Analizleri	44
5.7	X-Işınları Kırınımı verileri ile Kalıntı Gerilme Analizi	44
5.8	X-Işınları Kırınımı ile İki Eksenli Kalıntı Gerilme Analizi	47
6.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	49
6.1	Deneylerin Yapılışı	49
6.2	Deney Sonuçları	49
6.3	Kaynak işlemi sonrası yapılan deneysel çalışmalar	51
6.4	Kaynak işlemi sonrası mikroyapıda gözlemlenen değişimler	52
6.5	Kaynak işlemi sonrası kalıntı gerilme analizi	53
	KAYNAKLAR	57
	ÖZGEÇMİŞ	588

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1: Alüminyum alaşımlarının, formların ve kullanım alanları.....	5
Tablo 3.1: Alüminyum alaşımlarına uygulanan kaynak yöntemleri ve özellikleri.....	14
Tablo 3.2: Malzeme kalınlığına göre önerilen gaz nozzle çapı ve gaz akış hızı....	19
Tablo 3.3: Tungsten elektrot çapına bağlı olarak uygulanan akım değerleri.....	20
Tablo 3.4: TIG kaynak uygulamalarında dolgu metali seçimi ve özellikleri.....	21
Tablo 4.1: Boşluk oluşum sebepleri ve önlenmesi.....	25
Tablo 4.2: Sıvı penetrant testi uygulamasının özellikleri.....	36
Tablo 4.3: Ultrasonik muayene tekniği uygulamasının özellikleri.....	36
Tablo 4.4: Radyagrafik muayene uygulamasının özellikleri.....	37
Tablo 5.1: Kalıntı gerilme ölçüm yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları yönünden karşılaştırılması.....	40
Tablo 6.1: Kaynak öncesi numunelere yapılan çekme deneyi sonuçları.....	51
Tablo 6.2: Kaynak sonrası soğuk hadde numunelere yapılan çekme deneyi sonuçları.....	51
Tablo 6.3: Kaynak sonrası sıcak hadde numunelere yapılan çekme deneyi sonuçları.....	52

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No:

Şekil 3.1: TIG kaynak yönteminin şematik olarak gösterilmesi.....	16
Şekil 3.2: TIG kaynak yönteminde malzeme kalınlığına bağlı olarak kullanılan akım değerleri.....	18
Şekil 3.3: TIG kaynak uygulamasında optimum koşulların sağlanması için önerilen kaynak tekniği.....	19
Şekil 3.4: Ark kararlılığının sağlanması için TIG kaynağında kullanılan elektrod şekli.....	20
Şekil 3.5: Kaynak ağzı açılıp açılmaması ve kaynak ağzı genişliğine göre kaynak metalinin bileşiminin değişimi.....	21
Şekil 4.1: 6 mm kalınlığında plakaya uygulanmış TIG kaynağında gözlemlenen poroz yapısı.....	22
Şekil 4.2: Alüminyum içerisinde hidrojen çözünürlüğü.....	23
Şekil 4.3: Kaynak metali içerisinde hapsolmuş oksit.....	26
Şekil 4.4: Katodik temizlik ve ısı dengesine kutupsallığın etkisi.....	27
Şekil 4.5: 3 mm kalınlığında A6082 ana metal/4043 dolgu metali kullanılarak TIG yöntemiyle yapılmış kaynakta meydana gelen sıcak çatlak.....	28
Şekil 4.6: Eriyik konsantrasyonunun çatlak hassasiyetine etkisi.....	32
Şekil 4.7: Tavlama sıcaklığının soğuk işlem ve mukavemet üzerine etkisi.....	39
Şekil 5.1: Malzeme üzerinde farklı kalıntı gerilmelerin tanımlandığı bölgeler A.) Makro gerilmeler B.) Mikro gerilmeler C.) Mikroskopta gerilmeler.....	41
Şekil 5.2: Laboratuvar ve numune koordinat sistemi ve açıların tanımlanması.....	42
Şekil 5.3: Numune normali ve (hkl) düzlemleri normali arasında ψ açısının şematik gösterilmesi.....	43
Şekil 5.4: Gerinmeli-gerinmesiz durumlarda latis ve X-ışınları kırınımı.....	43
Şekil 5.5: En yaygın rastlanan üç tip $d \cdot \sin^2 \psi$ eğrisi.....	45
Şekil 5.6: Birim hücre koordinatları C_i , laboratuvar koordinatları Li ve numune koordinatları Si ile aralarındaki ilgili açıların tanımlanması.....	50
Şekil 6.1: Soğuk haddelenmiş (Twin Roll) Al 6016 alaşımının hadde yönüne dik 100X büyütmedeki mikroyapısı a) normal ışık b) polarize ışık.....	50
Şekil 6.2: Soğuk haddelenmiş (Twin Roll) Al 6016 alaşımının hadde yönüne paralel 100X büyütmedeki mikroyapısı a) normal ışık b) polarize ışık.....	50
Şekil 6.3: Sıcak haddelenmiş Al 6016 alaşımının hadde yönüne dik 100X büyütmedeki mikroyapısı a) normal ışık b) polarize ışık.....	50
Şekil 6.4: Sıcak haddelenmiş Al 6016 alaşımının hadde yönüne paralel 100X büyütmedeki mikroyapısı a) normal ışık b) polarize ışık.....	51
Şekil 6.5: Soğuk haddelenmiş Al 6016 alaşımına ait 85 A akımda kaynaklı numunenin 50X büyütmedeki mikroyapısı a) normal ışık b) polarize ışık.....	52

Şekil 6.6: Sıcak haddelenmiş Al 6016 alaşımına ait 68 A akımda kaynaklı numunenin 50X büyütmedeki mikroyapısı a) normal ışık	
b) polarize ışık.....	53
Şekil 6.7: 65 A değerindeki kaynaklı parçalarda yapılan kalıntı gerilme analizi.....	54
Şekil 6.8: 68 A değerindeki kaynaklı parçalarda yapılan kalıntı gerilme analizi.....	54
Şekil 6.9: 72 A değerindeki kaynaklı parçalarda yapılan kalıntı gerilme analizi.....	54
Şekil 6.10: 75 A değerindeki kaynaklı parçalarda yapılan kalıntı gerilme analizi.....	55
Şekil 6.11: 80 A değerindeki kaynaklı parçalarda yapılan kalıntı gerilme analizi.....	55
Şekil 6.12: 85 A değerindeki kaynaklı parçalarda yapılan kalıntı gerilme analizi.....	55
Şekil 6.13: 90 A değerindeki kaynaklı parçalarda yapılan kalıntı gerilme analizi.....	56

SOĞUK VE SICAK HADDELENMİŞ ALUMİNYUM 6016 ALAŞIMLARININ KAYNAK DAVRANIŞLARI VE KALINTI GERİLME ANALİZİ

ÖZET

Ağırlık olarak karbon çeliklerinin yalnızca üçte biri olmasına rağmen mukavemet olarak bu çeliklerle karşılaştırılabilecek duruma getirilebilen alüminyum alaşımları özellikle son yıllarda başta otomobil ve havacılık olmak üzere giderek artan bir kullanım alanına sahiptirler. Özellikle ısıtım işlem uygulanabilen Al-Mg-Si içerkli 6000 serisi alaşımlar başta otomobil ve havacılık endüstrisi olmak üzere gelişen teknolojinin ihtiyaçlarına karşılayabilen bir metal olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bilindiği gibi kaynakla yapılan birleştirme işlemleri beraberinde bir çok malzeme hatasını da beraberinde getirmekte ve servis koşullarında malzemelerde ciddi hasarlara yol açabilmektedir. Özellikle alüminyum alaşımlarının kaynaklanması sırasında ortaya çıkan kaynak metali içerisinde oksit film hapsolması, gaz boşlukları, sıcak çatlak oluşumu, malzemedeki mukavemet kaybı ve kaynak sonrası kalıntı gerilmelerin varlığı en çok rastlanan sorunlardır. Bu çalışmada 6000 serisi alaşımlardan sıcak hadde ve soğuk hadde olarak üretilmiş Al 6016 alaşımlarının kaynak davranışları incelenmiştir. Çalışmanın amacı üretim yöntemleri farklı olan bu iki metal arasında bu farklılığa bağlı olarak kaynaklanabilirliklerinin değişimi, kaynak parametrelerinin değişimi ile kaynaklanabilirlik özellikleri arasındaki ilişkiyi belirlemektir.

Çalışmada kullanılan kaynak yöntemi manuel TIG kaynağı olarak belirlenmiş ve THY. A.O Kaynak Atölyesinde yaptırılmıştır. Kaynak işlemi sırasında kaynak parametreleri değiştirilirken, bu parametrelerin değişimi ile birlikte kaynak davranışları, yapılan mekanik ölçümler ve X-ışınları kırınımı yöntemi ile kalıntı gerilme değerleri hesaplanarak belirlenmeye çalışılmıştır.

THE WELDING BEHAVIOURS OF HOT AND COLD ROLLED AL 6016 ALLOYS AND RESIDUAL STRESS ANALYSIS

SUMMARY

Comparison to steels, aluminium is one over three times lighter on the contrary some aluminium alloys have the strength as high as steels. These aluminium alloys have application areas in automobile and aviation industries, especially heat treatable 6000 (Al-Mg-Si) alloys became the most popular metal in these areas to meet the need of developing technology.

As is known, joint by welding has lots of defects which cause many serious damages in weldments in service conditions. Particularly, oxide entrapment, porosities, hot cracking, loss of strength and residual stress after welding are the most common problems in aluminium welding. In this work, welding behaviours of hot and cold rolled Al 6016 alloys are worked out. The aim of the study is analyzing the weldability features between two different alloys depend on the manufacturing methods, and the relations between welding parameters and weldability.

The welding method is determined as manual TIG welding and applied in THY A.O. Welding Workshop. According to the changing of parameters, the weldability of the alloys are observed by the mechanical tests and residual stress analysis by X-ray diffraction.

1. GİRİŞ

Alüminyumun varlığı ilk defa 19. yüzyılın başlarında Sir Humprey Davy tarafından kabul edilmiş olup, 1825 yılında Hans Christian Oersted tarafından ayrıştırılmış olarak elde edilmiştir. Bu tarihten sonra alüminyum, 1886 yılına kadar Heroult prosesinin kullanılmasın başlamasına kadar geçen süre içerisinde yalnızca nadir olarak laboratuarlarda elde edilmiştir [1].

Alüminyum yer kabuğunda yüzü geçkin sayıda bileşikler şeklinde bulunur ancak bunlar arasında boksit alüminyum eldesinde ticari olarak en uygun bileşiktir. Elde edilen alüminyum, elektrolitik veya bölgesel ergitme(zone-melting) yöntemleri kullanılmadan 5-10% oranında silisyum veya demir gibi empüriteler içermektedir. Ancak bu teknikler kullanılarak 99.9% saflıkta alüminyum elde etmek mümkün olmaktadır. Elde edilen bu yüksek saflıktaki alüminyum alaşımlandırılmış alüminyuma göre daha düşük mukavemetli olmakta ve uygulama alanı oldukça sınırlı bulunmaktadır. Mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için alüminyum genellikle bakır, mangan, magnezyum, silisyum, ve çinko ilaveleri yapılarak alaşımlandırılır [1, 2].

Alüminyumun mukavemetini artırmak için yapılan çalışmalar sonucunda 1910 yılında alüminyum-bakır alaşımına yaşlandırma ve çökelme sertleştirme yapılmış ve, bu tarihten sonra ağırlık olarak karbon çeliklerinin yalnızca üçte biri olmasına rağmen mukavemet olarak bu çeliklerle karşılaştırılabilecek alüminyum alaşımları elde edilmiştir. Özellikle II. Dünya Savaşı sırasında alüminyumun uçak gövde ve kaplamalarında kullanılmasının başlaması ile alüminyum ile ilgili çalışmalar ve gelişmeler önem kazanmıştır. Özellikle bu dönemde alüminyum ile ilgili en önemli gelişme soy gaz korumalı kaynak prosesleri olan MIG (Metal inert gas) ve TIG (Tungsten inert gas) kaynakları konusunda yaşanmıştır. Bu sayede her hangi bir eriticiye ihtiyaç duymadan ark kaynağı ile yüksek mukavemetli kaynaklar yapılmasına olanak sağlanmıştır. II. Dünya savaşından sonra alüminyumun kullanılması otomobillerde, gemilerde, yapı elemanlarında her geçen gün artan miktarlarda kullanılmaya devam etmiştir [1].

Günümüzde ise sivil havacılıkta kullanılan uçakların 80 % bölümü ve binek otomobillerde ağırlığın 40%' lık kısmında alüminyum kullanılabilmektedir. Özellikle 2005 yılı içerisinde Avrupa otomobil sanayinde 2 milyon ton alüminyum kullanımı beklenmektedir ve alüminyumun uygun mekanik özeliğiyle birlikte düşük ağırlığa sahip olması göz önünde bulundurulduğunda yakıt ve ağırlık tasarrufu sağlamak için bu miktarının önümüzdeki yıllarda giderek artacağı tahmin edilmektedir. Alüminyum, hammaddeden üretim için gerekli enerjinin sadece % 5' i kadar bir enerji ile ergitilebilir ve yeni ürünler yaratılabilir. Konstrüksiyon parçalarının %70' i, proses ve işleme hurdalarının ise %100' ü geri kazanılabilmektedir. Dolayısıyla, dünya üzerinde 140 milyar ton boksit olduğu bilinmekte ve yıllık alüminyum ihtiyacının 18 milyon ton ve bunun da % 20' lik bir oranla geri dönüşüm ürünlerden elde edildiği göz önünde bulundurulduğunda alüminyumun insanlığın sonuna kadar yetecek bir metal olduğu görülmektedir. Ayrıca insan sağlığı açısından her hangi bir zararının olmaması ve zehirli maddeler içermemesi alüminyumun diğer metallere oranla daha çok tercih edilmesini sağlamaktadır. Tüm bu avantajları göz önüne alındığında alüminyum kullanımının her geçen gün özellikle otomotiv ve havacılık endüstrisinde olmak üzere artış göstereceği bir gerçektir [1,2].

2. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

2.1 Alüminyumun Karakteristik Özellikleri

Alüminyumu, kendisinden kullanım alanı olarak çok daha fazla yaygın olarak kullanılan çelikle karşılaştırdığımızda kaynaklanabilme davranışını etkileyen aşağıdaki önemli farklılıklar karşımıza çıkmaktadır [1].

- Alüminyum 660 °C sıcaklıkta ergirken, oksit formunun ergime sıcaklığı 2060 °C dir. Diğer yandan demiroksitlerin ergime sıcaklığı demirin ergime sıcaklığına yakın veya bu sıcaklığın altındadır. İstenen kaynak kalitesinine ulaşılmasında, bu oksit filmin kaynak işleminden önce veya kaynak işlemi sırasında kaynak bölgesinden uzaklaştırılması veya disperse edilmesi gerektiğinden dolayı bu özellik oldukça önemli bir parametredir.
- Dayanaklı, yüzeye iyi tutunan ve kendi kendini oluşturabilen oksit tabakası sayesinde alüminyum alaşımları mükemmel korozyon direncine sahip olmaktadır ve herhangi bir korumaya ihtiyaç duymazlar. Ayrıca alüminyum alaşımları anodize edilerek korozyon dirençlerini arttırmak da mümkün olmaktadır.
- Alüminyumun ısı genleşme katsayısı yaklaşık olarak çeliğin iki katı olup, kaynak işlemi sırasında bükülme ve distorsiyonlara maruz kalmasına neden olmaktadır.
- Çelikle karşılaştırıldığında, altı kat fazla ısı iletim katsayısına sahip olan alüminyum kaynağı sırasında daha şiddetli ve konsantre ısı uygulamasına ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle, ince parçalara uygulanan ergitme kaynağı sırasında ısının çok hızlı bir şekilde kaybedilmesi ile yetersiz ergime sorunu ile karşılaşılabilir.
- Alüminyumun özgül ısısı çeliğin iki katı değerindedir.
- Bakırın elektrik iletkenliğinin dörtte üçü elektrik iletkenliğine sahip olan alüminyumun elektrik iletkenliği, çeliğin iletkenliğinin altı katıdır. Yüksek

olan bu elektrik iletkenliği, nokta direnç kaynağı sırasında ısının elektrik direnci ile sağlanması gerektiği için alüminyum için bir dezavantaj teşkil etmektedir.

- Çeliğin aksine, artan sıcaklıkla birlikte renk değişimi gözlemlenmeyen alüminyumun bu özelliği, kaynakçının kaynak işleminde ergime olup olmadığı ile ilgili herhangi bir yorumda bulunmasına olanak vermez. Bu nedenle alüminyum kaynağı için kaynakçının tekrar eğitim alması gerekmektedir.
- Alüminyum manyetik bir metal olmadığı için, kaynak sırasında ark atlaması sorunu yaşanmamaktadır.
- Çeliğin üç katı elastik modüle sahip olan alüminyum, darbeleri yüklemelerde çok daha fazla enerji absorblayabilmektedir.
- Alüminyum, FCC yapısına sahip olduğu için azalan sıcaklıkla birlikte çentik tokluğunda azalma görülmez. Hatta bazı alüminyum alaşımlarının (EW-5083) çekme mukavemetinin ve sünekliğinin sıcaklığın azalması ile birlikte arttığı görülmektedir.
- Sıcaklığın artması veya azalması ile çeliklerde görülen kristal dönüşümler veya faz değişimleri alüminyumda görülmez. Hızlı soğutmayla sertleştirme işleminde çeliklere uygulanabilirken, soğutma hızının alüminyumun mukavemetine etkisi çok küçüktür [1].

Alüminyumdan hem dökümle hem de dövme yöntemleri ile ürün elde etmek mümkündür. Dövme yöntemi kullanılarak, sıcak ve soğuk haddelenmiş levha, sac, çubuk, tel veya folyo formlarında ürünler elde edilmektedir [2].

Döküm ürünlerin elde edilmesinde ise en yaygın olarak kum döküm, mum döküm (lost-wax), çelik kalıp ve die-casting yöntemleri kullanılmaktadır.

Tablo 1.1: Alüminyum alaşımlarının, formların ve kullanım alanları [1].

Alüminyum alaşımı	Ürün formu	Uygulama alanları
Saf alüminyum	Folyo, hadde sac, ekstrüzyon ürünler	Paketleme ve folyolama, çatı kaplama, plakaj, düşük korozyon direncine sahip kazan ve tank malzemeleri
2000 serisi (Al-Cu)	Hadde sac ve levha, ekstrüzyon ve dövme ürünler	Yüksek gerilimli parçalar, uçak yapı elemanları, dayanıklı dövme parçaları, ağır yük araç tekerleri, silindir başları ve pistonlar
3000 serisi (Al-Mn)	Hadde sac ve levha, ekstrüzyon ve dövme ürünler	Paketleme, çatı kaplama, plakaj, kimyasal tambur ve tanklar, besin ambalaj malzemeleri
4000 serisi (Al-Si)	Tel, döküm ürünler	Dolgu metali, silindir başları, motor blokları, valf gövdeleri ve mimari amaçlı malzemeler
5000 serisi (Al-Mg)	Hadde sac ve levha, boru ekstrüzyon, dövme ürünler	Plakaj, tekne omurgası, yapısal ürünler, kazan ve tank, taşıtlar, demiryolu araçları, mimari amaçlı malzemeler
6000 serisi (Al-Si-Mg)	Hadde sac ve levha, boru ekstrüzyon, dövme ürünler	Yüksek mukavemetli yapısal ürünler, taşıtlar, demiryolu araçları, deniz araçları, mimari amaçlı malzemeler
7000 serisi (Al-Mg-Zn)	Hadde sac ve levha, ekstrüzyon, dövme ürünler	Yüksek mukavemetli yapısal ürünler, askeri köprüler, zırhlı plakalar, yüksek dayanımlı uçak parçaları, demiryolu araçları ekstrüzyon parçaları, ağır yük taşıtları

2.2 Alaşım Elementleri

Artan kullanım alanlarına ve miktarlarına bağlı olarak gerekli olan malzeme özelliklerini karşılayacak şekilde çok sayıda alüminyum alaşımı elde etmek mümkün olmaktadır. Alüminyumun alaşımlandırılmasında ve kaynak işleminde dolgu metalinde kullanılan temel alaşım elementlerini ve etkilerini şu şekilde sıralamak mümkündür [1,2].

- Magnezyum (Mg), alüminyumun soğuk işlem uygulanabilirliğini geliştirir ve katı eriyik sertleştirilmesi ile mukavemet artışına neden olur.
- Mangan (Mn), alüminyumun soğuk işlem uygulanabilirliğini geliştirir ve katı eriyik sertleştirilmesi ile mukavemet artışına neden olur.

- Bakır (Cu), önemli derecede mukavemet artışı ve çökelme sertleşmesinin uygulanabilmesini sağlarken, korozyon direncini, sünekliği ve kaynaklanabilirliği düşürmektedir.
- Silisyum (Si), mukavemet ve süneklik artışına neden olur ve magnezyum ile birlikte kullanıldığında çökelme sertleşirmesinin uygulanabilirliğini sağlar.
- Çinko (Zn), mukavemet artırır, çökelme sertleşirmesi uygulanabilmesini sağlar ancak gerilem korozyonuna yol açabilmektedir.
- Demir (Fe), saf alüminyumun mukavemetini artırır. Alaşım elementi olarak kullanılmaktan daha çok artık bir element olarak alüminyumun içerisinde bulunur.
- Krom (Cr), gerilme korozyonu direncini artırır.
- Nikel (Ni), yüksek sıcaklık mukavemetini artırır.
- Titanyum (Ti), özellikle dolgu metalinde düzgün tane oluşumu için kullanılır (grain-refining).
- Zirkonyum (Zr), özellikle dolgu metalinde düzgün tane oluşumu için kullanılır (grain-refining).
- Lityum (Li), mukavemetin ve elastik modülü önemli derecede artırırken, çökelme sertleşmesi uygulanabilmesini sağlar ve yoğunluğu düşürür.
- Skandiyum (Sc), yaşlandırma sertleşirmesi ile mukavemet artışı sağlar, kaynak metali içerisinde tane oluşumunu kontrol eder.

Daha öncede değinildiği gibi alüminyum ve alaşımlarının kullanım alanları ve miktarları hızlı bir şekilde artış göstermektedir ve buna bağlı olarak alüminyum kaynağı da önemli bir proses olmaktadır. Ancak alaşım elementi sayısının ve alaşım sistemlerinin bu denli fazla ve çeşitli olması alüminyum ve alaşımlarının kaynağı konusunda çeşitli problemlerle karşılaşmamıza sebep olmaktadır.

2.3 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

2.3.1 Alaşım Elementlerine Göre Sınıflandırma

Avrupa’ da kullanılan standartlara göre öncelikli olarak alüminyum alaşımları üretim yöntemlerine göre sınıflandırılmaktadır. EN 573’ e göre ‘AB’ ingot, ‘AC’ döküm, ‘AM’ master döküm alaşımları, ‘AW’ ise dövme ürünlerin kodlarıdır [1].

Alaşım elementlerine göre sınıflandırma ise yine EN standartlarına göre;

1XXX : Saf alüminyum

2XXX : Alüminyum-Bakır alaşımları

3XXX : Alüminyum-Manganez alaşımları

4XXX : Alüminyum-Silisyum alaşımları

5XXX : Alüminyum-Magnezyum alaşımları

6XXX : Alüminyum-Magnezyum-Silisyum alaşımları

7XXX : Alüminyum-Çinko-Magnezyum alaşımları

8XXX : Lityum, demir, vb. Elementleri alaşımları

9XXX : Herhangi bir grupta bulunmayan alaşım türleri

olarak sınıflandırılmışlardır. [1,2]

2.3.2 Kondisyonlarına Göre Sınıflandırma

Alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri yalnızca alaşım elementi türüne ve miktarına göre değil aynı zamanda tavlama, soğuk işlem, çökelti sertleştirilmesi gibi kondisyonlara bağlı olarak da değişmektedir. Temel olarak alüminyum alaşımları içinstandartlarda belirlenmiş olan 5 temel tanımlama bulunmaktadır [2].

- F- kondisyon uygulanmamış. Deformasyon sertleştirilmesi miktarı veya ısıtma işlem şartları kontrol altında tutulmamış olan ve mekanik özellikleri standartlaşmamış olan alüminyum alaşımlarını temsil eder.
- O- tavllanmış. En düşük mukavemeti elde etmek için tavllanmış alaşımların kodudur.

- H- soğuk işlem uygulanmış. Soğuk işlem miktarını ve uygulanmışsa ısıtıl işlem şartlarını gösteren rakamlarla birlikte kullanılır.
 - + H1 : Yalnızca deformasyon sertleştirilmesi uygulanmış.
 - + H2 : Deformasyon sertleştirilmesi uygulanmış ve kısmen tavlanmış.
 - + H3 : Deformasyon sertleştirilmesi uygulanmış ve stabilize edilmiş. Stabilizasyon düşük sıcaklıkta uygulanan ısıtıl işlem sonrası sünekliğin artırılması işlemidir.
 - + H4 : Deformasyon sertleştirilmesi uygulanmış ve boyanmış.
- W- çözeltiye alınmış alaşımlardır. Çözeltiye alındıktan sonra oda sıcaklığında doğal yaşlanmaya maruz kalan alaşımlara uygulanır. Son ek olarak doğal yaşlanma periodunu temsil eden rakamlarla kullanılır.
- T- ısıtıl işlem uygulanmış. Kararlı bir kondisyon oluşturmak için yaşlandırılmış alaşımları tanımlar.
 - + T1 : Isıtıl işlem uygulanmış, şekillendirilmiş, doğal yaşlanmış.
 - + T2 : Isıtıl işlem uygulanmış, şekillendirilmiş, soğuk işlem görmüş, doğal yaşlanmış.
 - + T3 : Çözeltiye alınmış, soğuk işlem görmüş, doğal yaşlanmış.
 - + T4 : Çözeltiye alınmış ve doğal yaşlanmış.
 - + T5 : Isıtıl işlem görmüş, şekillendirilmiş, yapay olarak yaşlandırılmış.
 - + T6 : Çözeltiye alınmış, yapay olarak yaşlandırılmış.
 - + T7 : Çözeltiye alınmış, aşırı yaşlandırılmış ve stabilize edilmiş.
 - + T8 : Çözeliteye alınmış, soğuk işlem uygulanmış ve yapay olarak yaşlandırılmış.
 - + T9 : Çözeltiye alınmış, yapay olarak yaşlandırılmış ve soğuk işlem uygulanmış [2].

2.3.3 Isıl İşlem Uygulanıp Uygulanamamalarına Göre:

Alüminyum alaşımlarını ısı uygulanabilen(heat-treatable) ve ısı uygulanamayan(non-heat-treatable) alaşımlar olmak üzere iki grupta sınıflandırmak mümkündür. Saf alüminyum (1XXX) ve alüminyum alaşımlarından 3XXX, 4XXX, 5XXX serisine dahil olan alaşımlar ısı uygulanamayan grubuna girerlerken, 2XXX, 6XXX, 7XXX ve 8XXX serisi alaşımlar ısı uygulanabilen alaşımlardır [1].

2.4 Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Özellikleri

2.4.1 1XXX Grubu

Saf alüminyum diye tabir edilen 1XXX grubu alaşımlar çok az miktarlarda üretimden bünyelerinde kalan Si, Fe, Cu, Mn ve Zn elementleri barındırmaktadırlar. 1050 alaşımı gibi çok yüksek saflığa sahip olan alaşımların içerdiği empüriteler yapıda tamamen çözünmüş halde bulunurlar. Bu tür alaşımlar katılaşma aralığına sahip değildirler ve tek fazlı mikroyapıları kaynak işlemi sırasında ısıdan etkilenmez. Öte yandan 1200 alaşımı gibi biraz daha az safiyete sahip olan alaşımlarda, empürite elementlerinin küçük bir miktarı çözünmüş halde bulunur ve Fe elementinin çoğu $FeAl_3$ bileşiği şeklinde ortaya çıkar. Ayrıca Si miktarına bağlı olarak üç elementli Al-Fe-Si fazları da oluşmaktadır. Bütün bu fazlar dispersiyon ve katı eriyik sertleşmesinde görev alarak mukavemet artışına neden olur. 1200 alaşımı gibi düşük safiyetli tavllanmış alaşımlara yapılan kaynak işlemi birbirinden farklı üç bölge oluşturur. Kaynaktan etkilenmeyen ana metal, Al-Fe-Si fazı partiküllerinin dispersiyonu ile ince taneli döküm yapısına sahiptir. ITAB bölgesinde, düşük ergime noktasına sahip bileşenlerin ergidiği ergime sınırına çok yakın yerler dışında önemli bir mikroyapı değişimi görülmez. Soğuk işlem görmüş alaşımlarda ise tavlamanın ve yumuşamanın olduğu bölgelerde küçük mukavemet kayıpları meydana gelir. Kaynak metali ise döküm yapısına sahiptir ve dolgu metali ana metal ile aynı bileşime sahip olduğu durumlarda ergiyen fazlar tane sınırlarında katılaşır [1,3,4].

2.4.2 3XXX Alaşımları

Isı uygulanamayan diğer bir grup olan 3XXX serisi alaşımlarda da kaynak bölgeleri saf alüminyum ile benzer özellikler gösterir. Farklı olarak dispersiyon sertleştirilmesi $FeMnAl_6$ fazı ile gerçekleştirilir. Bu grupta yer alan alaşımlar, özellikle Cu (3003) ve

Mg (3004, 3005, 3015) alaşımları, saf alüminyuma göre daha fazla sıcak çatlak riskine sahip olup, uygun kompozisyonda dolgu metali kullanılması durumunda bu sorun kolayca giderilebilmektedir [1,3,4].

2.4.3 4XXX Alaşımları

4XXX serisi alaşımlar oldukça yüksek akışkanlığa sahip olduklarından genellikle döküm amaçlı uygulamalarda kullanılırlar. Genellikle çökeltme sertleşmesi sağlamak için Cu ve Mg, yüksek sıcaklık özelliklerini geliştirmek içinde Ni ilavesi yapılır. Yüksek akıcılığı ve düşük hot short hassasiyetinden dolayı Al-Si içerikli bu alaşımlar genellikle kaynak işleminde dolgu metali olarak kullanılırlar [1,3,4].

2.4.4 5XXX alaşımları

Magnezyum ilaveli alüminyum alaşımlarının kaynak işlemi sırasında mikroyapıları tamamen değişebilmektedir. Magnezyumun alüminyum içerisinde katı eriyik olarak bulunması ve Mg_2Al_3 fazı ile birlikte Al-Fe-Si-Mn fazlarının dispersiyonu ana metale mükemmel taneli bir mikroyapı sağlar. ITAB bölgesi içerisinde sıcaklığın 250 °C' ye ulaşması ile Mg_2Al_3 taneleri birleşmeye ve büyümeye başlar. Sıcaklığın 400 °C' nin üzerine çıktığı bölgelerde Mg_2Al_3 taneleri yeniden çözünür ve sıcaklığın 560 °C ve üzeri olduğu kaynağa daha yakın bölgelerde kısmi ergimeler başlar ve boşluk oluşumları meydana gelir. Kaynak metali, alüminyum içerisinde aşırı doymuş magnezyum ve çözünmeyen intermetalik Mg_2Si gibi partiküller ile birlikte döküm yapısındadır. Kaynak metalinin mukavemeti genellikle aynı kompozisyondaki tavllanmış ana metale yakın olup, magnezyum içeriğinin %4' ün altına inmesi durumunda bağlanma mukavemeti ana metale göre daha az olacaktır. Bu nedenle MIG kaynağı sırasında magnezyumun ark içerisinde kaybolduğu göz önüne alındığında 5556 gibi daha yüksek alaşımlı dolgu metali kullanılması gereklidir [1,3,4].

2.4.5 2XXX Alaşımları

Alüminyum-bakır alaşımı olan 2XXX serisi ısıtılabilir işleme uygulanabilir alaşımlardır. %2-4 arası bakır içeriğine sahip olan alaşımların hot short hassasiyeti yüksek olduğu için kaynaklanabilirliği de oldukça sorunlu olup, uzun yıllar kaynaklanamaz olarak görülmüşlerdir. Bakır seviyesinin % 6 ve üzerine çıkması ile birlikte sıcak çatlakları dolduracak ötektik fazın miktarının artması alaşımın kaynaklanabilirliği

arttırmaktadır. Alüminyum içerisinde bakırın katı eriyik oluşturma sınırı 548°C ' de %5.8' dir ve bakır katı eriyik olarak bu ortamda CuAl_2 partikülleri ile birlikte tane içerisinde veya tane sınırlarında bulunur. Yaşlandırma sertleştirilmesi yapılmış 2XXXX serisi alaşımlara kaynak işleminin yapılması çökelmiş fazların yeniden çözünmesine ve kopma mukavemetinin yarıya düşmesine neden olur. Bu nedenle bu alaşımlara mümkün olduğu kadar kaynak işleminden sonra yaşlandırma işlemi yapılmalıdır [1,3,4].

2.4.6 6XXX Alaşımları

6XXX serisi alaşımlarda sertleştirme fazı Mg_2Si olup, bu alaşım grubu kaynak metalinin çatlamasına karşı oldukça hassastırlar. Kaynak metalinin çatlaması, yüksek oranda Si içeren 4043 dolgu metalinin kullanılması ile önlenebilmektedir. Dolgu metali kullanmadan veya ana metal kompozisyonuna yakın dolgu metali kullanmak kaynak metalinde sıcak çatlak oluşum riskini arttırmaktadır. ITAB bölgesinin ergime hattına yakın yerlerinde kısmi ergimeler meydana gelmektedir. Kaynak yapıldıktan sonra yaşlandırma işlemi yapmak için yeterli sıcaklığın ve soğutma hızının mümkün olduğu bu bölgelerde mukavemet kaybı olmamaktadır. Bunu dışındaki bölgelerde çökelmelerin aşırı yaşanmadan dolayı mukavemet değerlerinde büyük düşüşler görülür [1,3,4].

2.4.7 7XXX Alaşımları

Bu grupta bulunan alüminyum alaşımları kaynak için geliştirilmiş orta mukavemetli alaşımlar ve uzay endüstrisinde kullanılan, kaynak dışındaki yöntemlerle bağlanan %1 oranından daha fazla bakır içeren yüksek mukavemetli alaşımlar olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Sertleştirilmiş yüksek mukavemetli 7XXX alaşımlarına (7022, 7075) kaynak yapılması durumunda mukavemet kaybı çok önemli miktarlarda olur. Her ne kadar ısıtma işlemi uygulanarak bu mukavemet kaybı giderilebilsede, süneklikte kayıp o kadar fazladır ki çok yüksek gevrek kopma olasılığı vardır. Bu yüzden bu alaşımlara kaynak uygulanması yerine perçinleme veya yapıştırma işlemleri uygulanması daha yaygın ve sağlıklıdır. Kaynaklanabilirliği yüksek olan bakır içermeyen orta mukavemetli alaşımların (7017, 7020, 7039) kaynak davranışları ise 6XXX serisi alaşımlarla benzer özellikler göstermektedir. ITAB bölgesi aynı şekilde ısıtma işlemiyle giderilebilen mukavemet azalmasına maruz kalır. Bu alaşım grubu doğal yaşlanmaya uğrar, ancak yaşlanma işleminin tamamlanması 30 gün sürmektedir. 6XXX serisine

göre mukavemet kaybı daha az olan bu alaşım grubunun doğal yaşlanma özelliği de göz önünde bulundurulduğunda yapısal uygulamalarda kullanılması daha avantajlıdır. 7XXX serisi alaşımların kaynaklanmasındaki en önemli problem içeriğindeki çinkonun kaynak sırasında çok hızlı bir şekilde oksit formuna geçip kaynak banyosunun yüzey gerilimini arttırması ve yetersiz ergime problemine yol açmasıdır. Bu sorunun çözülmesindeki en etkil yöntem ise 5XXX serisi alaşımların kaynaklanmasında kullanılan kaynak akımının % 10-15' i fazla akım kullanmaktır. Ayrıca daha kısa ark kullanımıda yararlı olacaktır [1,3,4].

2.4.8 8XXX Alaşımları

Son alüminyum alaşım grubu olan 8XXX serisi alaşımlarıda 7XXX serisi alaşımlarla özellikle ITAB bölgesinde genel olarak aynı kaynak özelliklerini gösterirler. Bu alaşımlarda dikkat edilmesi gereken en önemli nokta alaşım elementlerinin özelliklerine göre kaynak uygulanmasıdır [1,3,4].

2.5 Alüminyum 6016 Alaşımlarının üretim yöntemleri bakımından farklılıkları

Alüminyum sürekli levha üretimi gün geçtikçe önem kazanmakta olan bir yöntemdir. Bir sürekli döküm teknolojisi olan levha döküm prosesleri şimdilerde dünya haddelenmiş yarı mamul bobin(coilstock) üretiminde dikkate değer bir pay elde etmiştir(yaklaşık %30). Sürekli levha üretimi ile proses adımları azaltılmıştır. Üretimi adımlarının azaltılmasının birkaç avantajı vardır: geleneksel yöntemle nazaran proses maliyetleri 2/3'ü, yatırım maliyetleri 3/4'ü kadarken, daha az üretim alanı ve işçilik gerektirmesidir. Sıcak haddeleme öncesi ön ısıtmaya gerek kalmaması nedeniyle enerji tasarrufu sağlanır. Verim %15-20 daha yüksek ve hammadde tüketimi %1.5-2 daha azdır. Alüminyum levha üretiminde günümüzde iki ana yöntem vardır. Bunlar aşağıdaki gibidir.

- Geleneksel yöntem; direk soğutmalı (DC) ingot döküm
 - Dikey DC döküm; yarı sürekli
 - Yatay DC döküm; sürekli döküm
- Sürekli levha döküm
 - Hazelett yöntemi ile sürekli ince slab döküm

- Çift (İkiz) merdaneli sürekli levha döküm (TRC)

Geleneksel yöntem için üretim adımları;

Ergitme → Dik veya yatay DC → Sıcak haddeleme → bobin sarma → Soğuk haddeleme (birkaç ısıtma işlemi uygulanabilir) → Yarı mamül-mamül

şeklindeyken sürekli levha döküm teknolojisinde aşağıdaki sırayı izler.

Ergitme → Levha Döküm → Bobin Sarma → Soğuk Hadde (birkaç ara tav uygulanabilir) → Yarı mamül-mamül

DC dökümün avantajı tüm ingot boyunca tane boyutu, bileşim, mekanik özellikler ve döküm boşluğu bakımından homojen bir yapı ortaya çıkarmasıdır.

TRC yönteminin özel döküm yapısı alüminyumun bir yandan 300 °C/sn hızla soğuyup öte yandan DC döküm yöntemine göre hücresel deformasyon yok denecek kadar azdır.

Öte yandan TRC ürünlerin derin çekilebilirliği sıcak hadde ürününden daha azdır ve yeniden kristalleşme sıcaklığı daha yüksektir.

Ancak soğuk hadde süresince DC ürününde TRC'ye oranla daha fazla deformasyon sertleşmesi meydana gelir.

TRC numunede çözünemeyen partiküller daha küçük ve dairesel şekilliysen DC üründe daha az sayıda, daha büyük ve hadde yönünde yönelmiştir.

TRC levhalarda merkezdeki segregasyon klasik bir oluşumdur. Artan merdane hızı ve alaşım konsantrasyonu ile artar. [Assan Alüminyum Notları]

3. ALÜMİNYUM KAYNAK YÖNTEMLERİ

3.1 Kaynak ve Alüminyum Kaynak Yöntemleri

Kaynak temel olarak malzemenin sınırlı bölgelerine ısı ve bazen de basınç uygulanarak yapılan birleştirme işlemine verilen genel isimlendirmedir. Aşağıdaki tabloda alüminyuma uygulanabilen kaynak yöntemleri ve uygulama alanları verilmiştir.

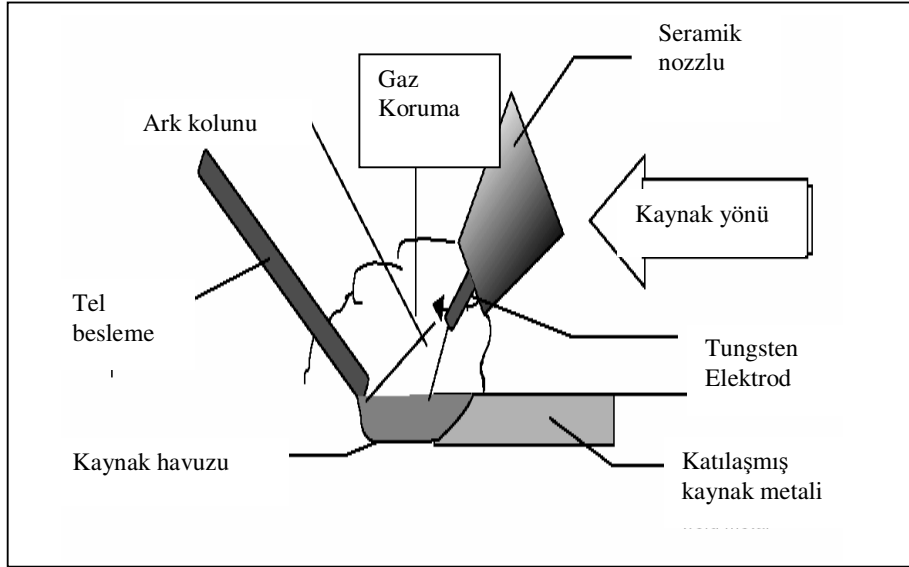
Tablo 3.1: Alüminyum alaşımlarına uygulanan kaynak yöntemleri ve özellikleri [1,5,6,7]

Yöntem	Özellik
Ergitme Kaynağı	
TIG (Tungsten inert gas)	Yüksek kalite, her pozisyonda kullanılabilen tüketilmeyen elektrod, tel ilaveli veya ilavesiz, manuel, mekanik veya tamamen otomatik, sıcak tel ilaveleri ile yükseltilebilen düşük kaynak hızı, düz veya darbeli akım
MIG (Metal inert gas)	Yüksek kalite, her pozisyonda kullanılabilen beslemeli tüketilir elektrod, manuel, mekanik veya tamamen otomatik, yüksek kaynak hızı, düz veya darbeli akım
Manuel metal ark	Sınırlı uygulama alanı, flux-kaplı tüketilir elektrod, gerilmesiz bağlantı, demode yöntem
Oxy-gaz	Düşük kaynak kalitesi, gerilmesiz bağlantı, demode yöntem
Lazer kaynağı	Hassas ve yüksek kalitede kaynak, uzay, havacılık, elektronik ve savunma sanayiinde yaygın kullanım, yüksek yatırım maliyeti
Elektro-gaz, elektro-curuf, gaz altı kaynağı	Sınırlı uygulamalarda kullanılır ve porozite problemi görülür. Oldukça eski bir yöntemdir.
Basınç ve ısı uygulamalı kaynak	
Manyetik tahrikli ark alın kaynağı	Borulardaki alın kaynağında kullanılır, flash kaynağına göre daha az yatırım maliyeti gerektiren tamamen

	otomatikleşmiş sistemlerde yapılır
Direnç ve flash kaynağı	
Nokta, nokta dikiş kaynağı	Metalik saçların bağlantı noktalarında, otomotiv, mutfak eşyaları ve uzay endüstrisinde kullanılır, yüksek yatırım maliyetine karşı yüksek verimliliğe sahip
Kaynaklı bağlantı	Nokta kaynağı ile yapıştırıcı bağlantıların bir kombinasyonu olup, mükemmel yorulma mukavemeti sağlar, otomotiv endüstrisinde kullanılır
Yüksek frekanslı indüksiyon dikiş kaynağı	Alın bağlantısı şeklinde yapılır, şeritten boru yapımında kullanılır. Yüksek yatırım maliyeti gerektirir ancak yüksek üretim hızına sahiptir.
Flash alın kaynağı	Metalik saçlarda, çubuk ve delikli bölümlerde çizgisel ve açılı alın bağlantı uygulamalarında, farklı metallerin kaynağında. Yüksek yatırım maliyetine karşılık yüksek üretim hızı
Stud kaynağı	
Kondansatör, kapasitör boşaltma	Maksimum 6 mm çaplı stud kaynağı; yalıtım pimleri, tava tutacakları, otomobil trimleri ve elektrik kontak yerlerinde
Drawn ark	5-12 mm çaplı stud kaynağında
Katı faz bağlantısı	
Sürtünme kaynağı	Yuvarlak veya dikdörtgensel çubuk veya içi boş bölümlerin alın kaynağında, düz plaka veya yuvarlatılmış bölümlerin alın kaynağında, farklı metallerin kaynaklanmasında kullanılır. Yüksek yatırım maliyeti gerektirir.
Patlamalı kaynak	Boru hatlarının bağlantısında, farklı metallerin kaynağında veya kaplama amaçlı kaynaklarda kullanılır.
Ultrasonik kaynak	Folyo kaynağında, elektrik bağlantı uç amaçlı yapılan Al-Cu kaynağında
Soğuk basınçlı kaynak	Al-Cu, Al-Steel veya alüminyum levhaların ve tellerin kaynağında kullanılır.
Sıcak basınçlı kaynak	Kenardan kenara alın kaynağında kullanılır.

3.2 TIG (Tungsten gaz korumalı) Kaynağı

Tungsten gaz korumalı ark kaynağı, tüketilmeyen elektrod kullanılarak yapılan ve kaynak havuzunu ve elektrodu atmosfer ortamından inert gaz kullanarak koruyan bir kaynak yöntemidir. TIG kaynağı EN 144 ile tanımlanmış olup ve TIG, TAGS veya GTAW olarak kısaltmaları yaygınca kullanılmaktadır. Bu kaynak yöntemi uygulamasında ısı kaynağı kaynak arkının kendisi ile sağlanır ve dolgu metali kullanıp kullanmamak mühendisin tercihinine bağlıdır. Kaynak havuzu kolayca kontrol edilebildiği için desteksiz kök pasoları yapılabilir, düşük akımlarda arkın stabil olması nedeni ile ince et kalınlığına sahip olan parçalar kaynaklanabilir ve kaynak metalinde çok yüksek kalite sağlanabilmektedir. Ancak bu avantajlarının yanında TIG kaynağının uygulanabilmesi için iyi yetişmiş kaynakçı gereksinimine ihtiyaç duyulur. MIG kaynağıyla karşılaştırıldığında daha düşük kaynak hızı ve dolgu metali besleme hızına sahiptir [1,7].



Şekil 3.1: TIG kaynak yönteminin şematik olarak gösterilmesi [1]

TIG kaynağının alüminyum metaline uygulamaları maksimum 6 mm et kalınlığına sahip parçalar ile sınırlıdır. MIG kaynağına göre ana metale daha sığ bir nüfuziyeti sahip olan TIG kaynak yönteminde köşe kaynağı uygulamalarında ve dolgu kaynağının kök bölgelerinde bu az nüfuziyet çoğu zaman bir problem yaratmaktadır [1].

3.2.1 TIG Kaynak Yönteminin Temel Prensipleri

TIG kaynağı yapabilmek için gerekli olan temel ekipmanlar, güç kaynağı, kaynak torçu, ve inert gaz besleyecisi ile bazı uygulamarda su soğutma sisteminden oluşmaktadır [1,4].

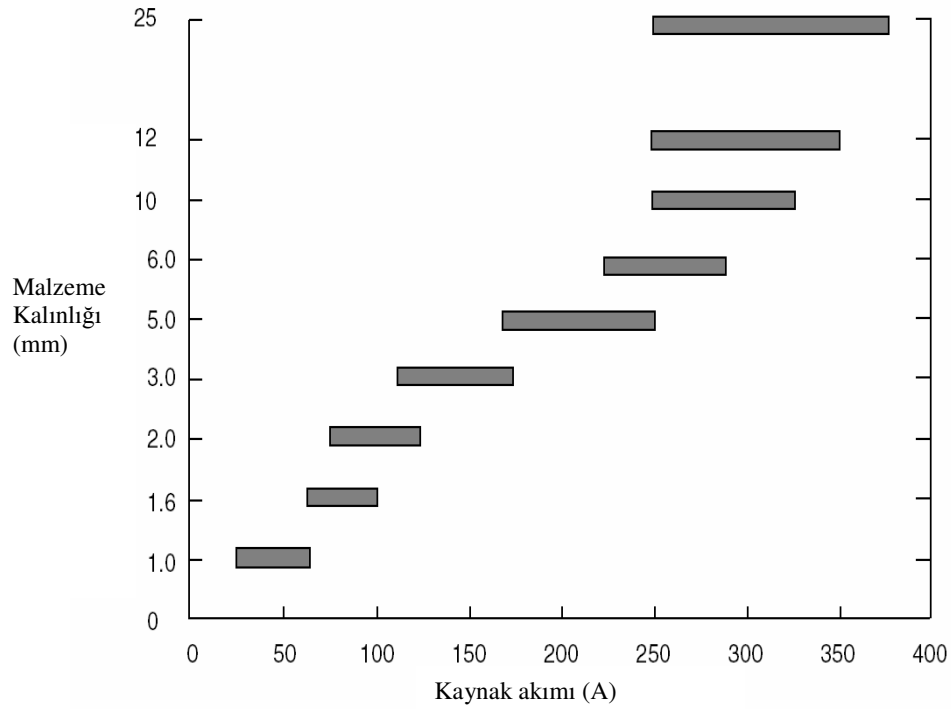
Malzemelerin bir çoğu için TIG kaynak yönteminde geleneksel olarak elektrodun güç kaynağının negatif kutbuna(DCEN) bağlanması tercih edilirken, alüminyum kaynağında bu yöntem oksit tabakasının kaldırılmasında yetersiz kalmaktadır. Gaz korumalı ark kaynağında üretilen ısıya büyük kısmı pozitif kutupda oluşur. Elektrodun güç kaynağının pozitif kutbuna bağlı olduğu TIG kaynağı uygulamalarında aşırı ısınma ve elektrodun ergimesi durumu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle alüminyum için manuel TIG kaynağı uygulamalarında alternatif akım kullanılmaktadır. Oksit film tabakasının kaldırılması elektrod pozitif yarı çevriminde gerçekleşirken, elektrod soğutma ve kaynak köküne penetrasyonu elektrod negatif yarı çevrimi sağlamaktadır. Alternatif akım sinüs dalgasına göre arkın sönümlenmesi ve tekrar oluşturulması her yarı çevrimde gerçekleştirilmektedir. Örnek olarak 50 Hz bir güç kaynağında saniye de 100 yarı çevrim oluşur. Arkın ani tutuşturulması için yüksek frekans (HF), yüksek voltaj (9-15000 V), akım uygulaması ile ark boşlukları arasında sürekli olarak bir deşarj sağlanır. Bu uygulama gazların iyonizasyonunu sağlayarak, ark tutuşması için minimum gecikmenin sağlanmasına olanak verir [1].

Alüminyum metali zayıf bir elektron emitörü olduğu için elektrod pozitif yarı çevriminde arkın yeniden tutuşturulması daha zordur. Arkın oluşmasında meydana gelecek olan gecikme pozitif yarı çevrimde negatif yarı çevrime göre daha az bir bir akım geçişine neden olur. Böylece arkın kararsız hale gelmesi durumunda, yüzey temizlik işlemi kaybolur. Güç kaynağında transformörün aşırı ısınmasına neden olan doğru akım bileşenleri meydana gelir [2,4].

3.2.2 AC-TIG Kaynağında Kullanılan Koruma Gazları

Alternatif akım kullanılarak yapılan TIG kaynak uygulamalarında genellikle argon gazı kullanımı tercih edilmektedir. Bununla birlikte helyum gazı ve helyum-argoz kaz karışımları da kullanılmaktadır. Argon gazı kullanımı geniş ve sığ bir penetrasyona neden olurken kaynak görüntüsünün parlak ve gümüş renginde olmasını sağlar. Ark tutuşturulması ve ark kararlılığı en iyi argon gazı kullanımında elde edilir [1].

Helyum gazının kullanılması durumunda ark voltajı artarak, daha derin bir penetrasyon sağlanırken ark tutuşması zorlaşır ve ark kararlılığı azalır. Modern kaynak makinalarında bu sorunu gidermek için kaynağı önce argon korumalı olarak başlatan ve daha sonra helyum gazı korumasına geçmeyi sağlayan ekipmanlar bulunabilmektedir. Ancak helyum gazı maliyet açısından argon gazına göre oldukça dezavantajlı olup, çok az bir ark temizliği sağlar. Bazı durumlarda helyum gazı kullanımı ısı tesiri altındaki bölgede soot adı verilen is oluşmasına neden olur.. Bu yüzden % 100 helyum kullanımı AC-TIG kaynağında nadiren görülür [4].



Şekil 3.2: TIG kaynak yönteminde malzeme kalınlığına bağlı olarak kullanılan akım değerleri [1]

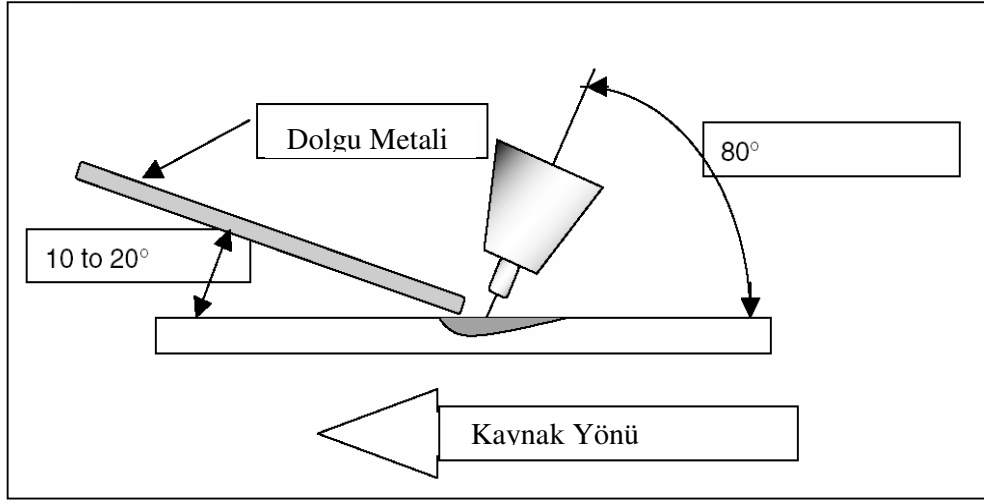
Helyum gazına argon ilave edilerek ark kararlılığının artması sağlanırken, kaynak hızı ve penetrasyon saf helyuma göre azalır ancak argon gazından çok daha iyi duruma gelmektedir. Kaynak sakalının genişliği ve penetrasyon miktarı ilave argon gazı miktarı ile kontrol edilebilmekte olup, en çok kullanılan karışım %25 argon içeren argon helyum gaz karışımıdır [4].

TIG kaynağı yapılırken ön gaz ve son gaz akışının kontrol edilmesi gerekmektedir. Ön gaz akışı kaynak işlemine başlanmadan önce gaz hortumu ve torçun

temizlenmesini sağlarken yerine takılmış olan elektrodun da korunmasını sağlar. Kaynak işlemi uygulandıktan bir süre sonra gaz akışının devam ettirilmesi ise hem kaynak havuzunun hem de elektrodun oksitlenmesini engellemektedir. Gaz akış hızı, gerekli gaz korumasının oluşmasını sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır [1].

Tablo 3.2: Malzeme kalınlığına göre önerilen gaz nozzle çapı ve gaz akış hızı [1]

Malzeme kalınlığı (mm)	Gaz nozlu çapı (mm)	Koruma gaz akış hızı	
		Argon l/dakika	Helyum l/dakika
< 1	9.5	3.4	7.5
1 to 3	9.5	4.5	9.5
3 to 5	12.5	5.6	11.8
5 to 9	12.5	7.0	14.2
9 to 12	16.0	8.0	16.5
12 and above	25.0	12.0	21.0



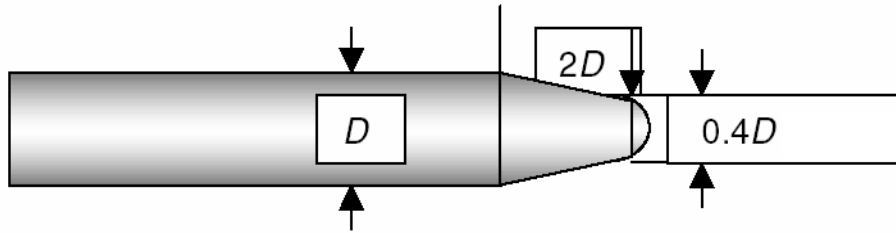
Şekil 3.3: TIG kaynak uygulamasında optimum koşulların sağlanması için önerilen kaynak tekniği [1]

3.2.3 Tungsten Elektrodlar

TIG kaynağında kullanılan birçok elektrod çeşiti bulunmaktadır. Bunlar arasında saf tungsten, thoryum ve zirkonyum alaşımlandırılmalı tungsten elektrodlar en çok kullanılanlardır. Thoryum ve zirkonyum ilavesi ile ark başlangıç özelliklerinin ve ark kararlılığının artırılması sağlanırken, elektrod ömrü de artmaktadır. Alternatif akım kullanılarak yapılan TIG kaynağında saf ve thoryum ilaveli elektrodla nazaran daha yüksek ergime noktasına sahip, kirliliğe ve parçalanmaya karşı daha yüksek

dirençli olan zirkonyumlu elektrodlar kullanılır. Böylece daha yüksek akım değerlerine ulaşmak mümkün olmaktadır [1,4].

Elektrodların ucunun kaynak işlemi sırasında küresel şekilli olmaları istenmektedir. Bu küresel şeklin kaynak boyunca korunması ark kararlılığını sağlamak için oldukça önemli bir parametredir. Elektrod çapının uygulanan akıma göre çok küçük seçilmesi durumunda aşırı ısınma ve elektrodun erimesi ile kaynak metalinde tungsten kirliliğinin oluşumu mümkün olabilir [1].



Şekil 3.4: Ark kararlılığının sağlanması için TIG kaynağında kullanılan elektrod şekli [1].

Tablo 3.3: Tungsten elektrot çapına bağlı olarak uygulanan akım değerleri [1]

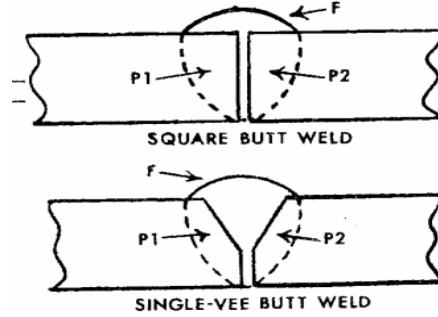
Tungsten Elektrot Çapı (mm)	Akım (A)
1.0	20–50
1.6	50–80
2.4	80–160
3.2	160–225
4.0	225–330
5.0	330–400
6.4	400–550

3.3 Dolgu Metalinin Seçilmesi

3.3.1 Kaynak Metalinin Dilüsyonu

Kaynak sırasında dolgu metali kullanılması ile kaynak metali, ana metal ile dolgu metalinin karışımından oluşan bir alaşım haline gelir. Kaynağın özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden biri de oluşan bu alaşımın özellikleridir. Kaynak metalinin mukavemeti, sünekliği, kaynak çatlaklarının oluşumuna karşı direnci, korozyon direnci ve ısı uygulanabilirliği gibi özellikleri büyük oranda bu dolgu metalinin seçimine bağlıdır [4].

Dolgu metali-ana metal karışımının özellikleri kaynak ağzı açılıp açılmamasına, kaynak ağzı şekline ve kaynak tekniğine bağlıdır. Kaynak ağzı açısının artması ile birlikte dolgu metalinin miktarda artış gösterir. [4]



Şekil 3.5: Kaynak ağzı açılıp açılmaması ve kaynak ağzı genişliğine göre kaynak metalinin bileşiminin değişimi [4]

3.3.2 Çatlak Oluşumu

Alüminyum kaynağında çatlak oluşum riskinin azaltılması için dolgu metalinin seçimi çok önemlidir. Genel olarak ana metale göre çok daha yüksek alaşım yüzdelere sahip dolgu metali seçilmesi çatlak riskini azaltıcı etkiye sahiptir. Örnek olarak 6XXX serisi alüminyum kaynağında, 6XXX serisi dolgu metali kullanmak yerine %5 silisyum içeren 4043 dolgu metali seçimi kaynak oluşum riskini oldukça düşürmektedir. Ana metale göre çok daha düşük ergime ve katılma noktasına sahip olan 4043 dolgu metali ana metalin katılmaya başladığı sıcaklıklarda plastik davranış gösterir ve çatlak oluşumuna neden olan büzülme gerilmeleri sonucu çatlak oluşumunu engeller.[1,5]

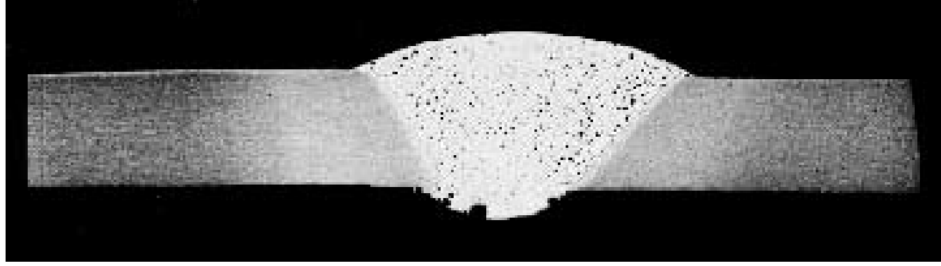
Tablo 3.4: TIG kaynak uygulamalarında dolgu metali seçimi ve özellikleri [1]

Ana Metal	Max.. Mukavemet	Max Süneklik	Tuzlu Su Korozyon Direnci	Minimum Çatlak Hassasiyeti	Max. Anodi Anodizasyon
1100	4043	1050	1050	4043	1100
2219	2319	2319	2319	2319	2319
3103	4043	1050	1050	4043	1050
5052	5356	5356	5554	5356	5356
5083	5183	5356	5183	5356	5356
5086	5356	5356	5183	5356	5356
5454	5356	5554	5554	5356	5554
5456	5556	5356	5556	5356	5556
6061	5356	5356	4043	4043	5654
6063	5356	5356	4043	4043	6356
6082	4043	4043	4043	4043	4043
7005	5556	5356	5356	5356	5356
7039	5556	5356	5356	5356	5356

4. ALÜMİNYUM KAYNAĞINDA MEYDANA GELEN HATALAR

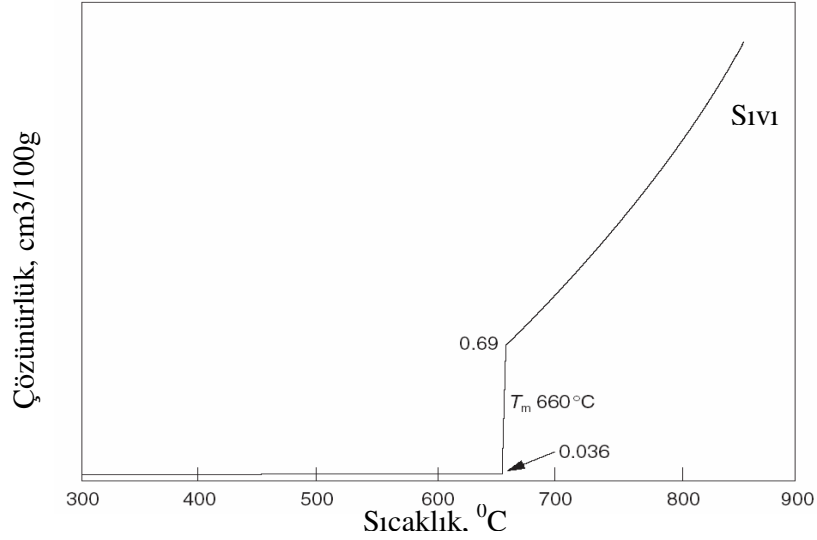
4.1 Kaynak Bölgesinde Meydana Gelen Boşluklar

Kaynak işlemi sırasında, ergimiş kaynak metali içerisinde çözülmüş olan gazların katılaşma sonrası metal içerisinde hapsolması sonucu oluşur. Küresel veya uzamış gaz boşlukları şeklinde gözlemlenirler. Kaynak metali içersine hapsolan gaz boşlukları son derece küçük mikro-boşluklardan, 3-4 mm çapına sahip boşluklara kadar çeşitli büyüklüklerde bulunabilmektedir [1].



Şekil 4.1: 6 mm kalınlığında plakaya uygulanmış TIG kaynağında gözlemlenen poroz yapısı [1]

Alüminyum kaynağında en sık rastlanan boşluk oluşum mekanizması hidrojenin kaynak metali içerisinde hapsolmasıdır. Hidrojen, ergimiş metal içerisinde çok yüksek çözünürlük değerine sahipken, katı alüminyum içerisindeki çözünebilirliği çok düşüktür. Aşağıda verilmiş olan hidrojenin alüminyum içerisinde sıcaklığa bağlı olarak çözünürlüğünü veren grafiğe bakıldığında ergimiş metal içerisinde hidrojen çözünürlüğünün katı metal içerisindeki çözünürlüğünün 20 katı olduğu görülmektedir. Bu nedenle alüminyum kaynağı sırasında boşluksuz bir kaynak yapısı elde edilmesi oldukça zordur [1].



Şekil 4.2: Alüminyum içerisinde hidrojen çözünürlüğü [1]

Otojen kaynaklarda poroz yapı genellikle daha azdır. Kaynak esnasında dolgu metali kullanıldığında, kullanılan telin kirliliğinden dolayı porozite seviyesinde artış olabilir. TIG kaynağında porozite seviyesinin MIG kaynağına göre daha az olduğu gözlemlenmektedir. Bunun nedeni MIG kaynağında kullanılan telin hidrojen kirliliğinin daha fazla olmasıdır. Aynı zamanda artan ark akımı ile birlikte, kaynak banyosunu sıcaklığı da artacağından dolayı ergimiş metal içerisindeki hidrojen çözünürlük hızı artacaktır. Bunun tam tersine, yassı kaynak pozisyonunda, gaz oluşum hızının gaz çözünme hızını aştığı durumlarda ısıyı arttırmak porozite oluşumunu azaltmaktadır. Bu sayede, kaynak bölgesi katılaştıkça hidrojenin baloncuklar halinde kaynak metalinden dışarı çıkması sağlanır. Porozite miktarına aynı şekilde etki edecek diğer bir yöntemde kaynak işlemi sırasında kaynak hızının azaltılması ile sağlanmaktadır. Ark voltaj değerinin veya ark uzunluğunun artırılması ise ergimiş metalin kirliliğinin artmasına yol açacağından porozite miktarında artışa neden olmaktadır. Alüminyum kaynağında hidrojen gazı boşluklarının miktarını etkileyen diğer bir parametrede alaşım elementlerinin miktarıdır. Magnezyum ilavesi ile porozite miktarını azaltmak mümkün olup, %6 magnezyum içeren bir alüminyum alaşımında hidrojen çözünürlüğün ve hidrojen absorpsiyonunun yarı yarıya azaldığı gözlemlenmiştir. Alüminyum-magnezyum alaşımı dolgu kullanmak da gaz boşluklarının miktarını azaltmada kullanılan etkili bir yöntemdir. Diğer yandan alaşım elementlerinden bakır ve silisyum, magnezyumun tersine gaz boşluklarının oluşumunu artırıcı etki yapmaktadırlar [1,4,7].

Kaynak işleminde bir çok hidrojen kaynağı mevcut olmakla birlikte tüketilir kaynak ürünleri primer hidrojen kaynağı olarak karşımıza çıkarlar. Ark kaynağı sırasında kullanılan flux, içerisinde bir miktar nem barındırmaktadır ve dolayısıyla kaynak işlemi esnasında bu nem ark içerisinde bileşenlerine ayrılarak hidrojen açığa çıkartır ve bir çok boşluk oluşumuna neden olur. Bu nedenle alüminyum kaynağı yapılırken özellikle bu fluxların kullanıldığı MMC (manuel metalic arc), SMA (shielded metal arc) ve SA (submerged arc) tekniklerinin kullanılması tavsiye edilmeyen ve yaygın olarak kullanılmayan yöntemlerdir [1,4].

Gaz altı kaynağında kullanılan koruyucu gazlar da içeriğinde nem bulunduran diğer ürünlerdir. Kullanılan gazın çiy oluşturma sıcaklığının -50°C ' nin (39 ppm water) altında olmasına özen gösterilerek poroz yapının kontrol altında tutulması sağlanabilir. Gaz hortumu olarak kullanılan bir çok plastik türüde havadaki suyu geçirirken özelliğe sahip olduklarından kaynak yapısında boşluk oluşumuna sebep olmaktadır. Hortum içerisinde yoğunlaşan su, koruma gazı içerisine karışarak hidrojenin kaynak metaline geçmesine neden olur. Bu yüzden neopren, isoprene gibi plastiklerden yapılmış hortum kullanımı yerine, daha az geçirgen özelliğe sahip olan polytrifluoro-chloroethylene esaslı hortumlar kullanmak kaynak kalitesi açısından yararlı olacaktır. Ancak, yinede plastiklerden yapılmış hortumlar yerine mümkün olduğu kadar metal hortum ve sistemlerin kullanılması, kaynak metali içerisine hapsolan hidrojen boşluklarıyla mücadele en etkili yöntem olacaktır [1,6].

Kaynak işleminde gaz boşluklarının oluşmasına sebep olan diğer bir etmen de ana metalin ve kullanılan kaynak tellerinin yeterli temizliğe sahip olmamasıdır. TIG kaynak telleri kullanılmadan önce tüysüz bir kumaş ile temizlenmeli ve temizlendikten sonra ise çıplak elle tutulmadan kullanılmalıdır. MIG kaynak yönteminde ise piyasada mevcut olarak bulunan telin torça girmeden önce temizlenmesini sağlayan ekipmanları temin etmek mümkündür. Kaynak tellerinin temizlenmesindeki en etkin yöntem ise henüz tel çekme aşamasında, tel yüzeyindeki kir ve oksit tabakasının sıyrılarak temizlenmesidir. Ana metal üzerinde bulunan kirlerin ve oksit tabakasının etkin bir şekilde temizlenmesi de aynı şekilde düşük seviyede gaz boşluklu kaynak elde etmek için uygulanması gerekli bir işlemdir. Bunun için ana metal yüzeyi paslanmaz çelikten yapılmış bir fırça ile mekanik olarak temizlenmelidir [1].

Tablo 4.1: Boşluk oluşum sebepleri ve önlenmesi [1,4]

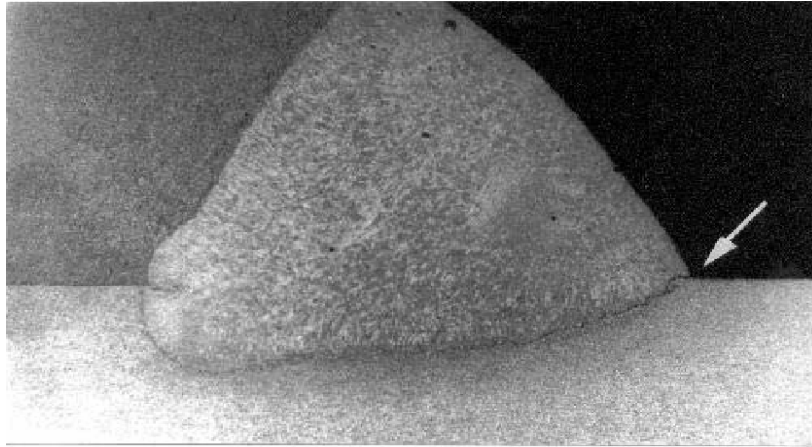
Boşluk oluşum mekanizması	Muhtemel Nedenleri	Alınacak önlemler
Hidrojen gazı hapsolması	Dolgu teli üzerinde bulunan oksit film, gres yağı, tel çekme yağı, ana metal üzerinde bulunan oksitler ve gres yağı, kovan içerisinde bulunan toz ve yağ, kirli koruma gazı, torçda meydana gelen sı sızıntıları, kaynak yüzeyindeki serpintiler	Temiz tel kullanımı, yüksek kalitede koruma gazı kullanımı, kovan değişimi, telin temiz şartlarda bulundurulması, torçun değiştirilmesi, temiz ana metal yüzeyi, mümkün olduğu kadar az serpinti oluşturmak
Gaz/Hava hapsolması	a)Yüksek akıma bağlı olarak meydana gelen kaynak banyosu türbülansı b)Kısmi penetrasyon/dolgu kaynağının kökünden meydana gelen gaz genişlemesi	a)Daha düşük akım kullanımı, kaynak hızının düşürülmesi, kaynak açısının değiştirilmesi b) Kaynak kökü dolgusunda boşluk bırakmak, yüksek ısı girişi sağlamak
Hızlı soğuma nedeniyle gaz tutma	Isı girdisinin çok düşük olması, hızlı ısı kaybı, viskoz kaynak banyosu, soğuk arka bar	Akımın yükseltilmesi, düşük kaynak hızı, ön ısıtma uygulanması, sıcak destek barı kullanımı, koruma gazı olarak argon yerine helyum kullanılması
Düzensiz el besleme	Dirsekli, bloklu veya yanlış boydaki kovan, yanlış veya kötü ayarlanmış tahrik silindirleri, hasarlı temas ucu, dengesiz güç kaynağı	Kablo borusunun doğrultulması, temas ucunun değiştirilmesi, tahrik silindirlerinin basıncının ayarlanması, yivli silindir kullanımı

Kaynak bölgesinde poroz yapıya sebep olan hidrojenin gelebileceği diğer bir kaynak da alüminyumun kendisidir. Her ne kadar hidrojenin katı alüminyum içerisindeki çözünürlüğü çok az da olsa yine de poroz yapı oluşturacak kadar bir etkiye sahiptir. Bu sorun özellikle döküm ve sinterlenmiş alüminyum parçalarının kaynaklanması sırasında görülmektedir. Bu yüzden alüminyum ürün içerisinde çözünmüş hidrojen sınırının 2 ppm ve altında olması istenmektedir. Alüminyum kaynağı sırasında ortamda hidrojen varlığının çok küçük miktarlarda bulunması dahi boşluksuz bir kaynak yapısı elde edilmesini mümkün kılmamaktadır [1].

4.2 Kaynak Sırasında Oksit Film Tabakasının Kaldırılması

Kaynak işleminden önce, porozite seviyesinin azaltılması için oksit tabakasının temizlenmesi gerekmektedir. Aynı zamanda yetersiz ergime ve kaynak metali içerisinde oksit filmin hapsolmasını önlemek için kaynak işlemi sırasında bu oksit tabakasının disperse edilmesi gerekmektedir [4].

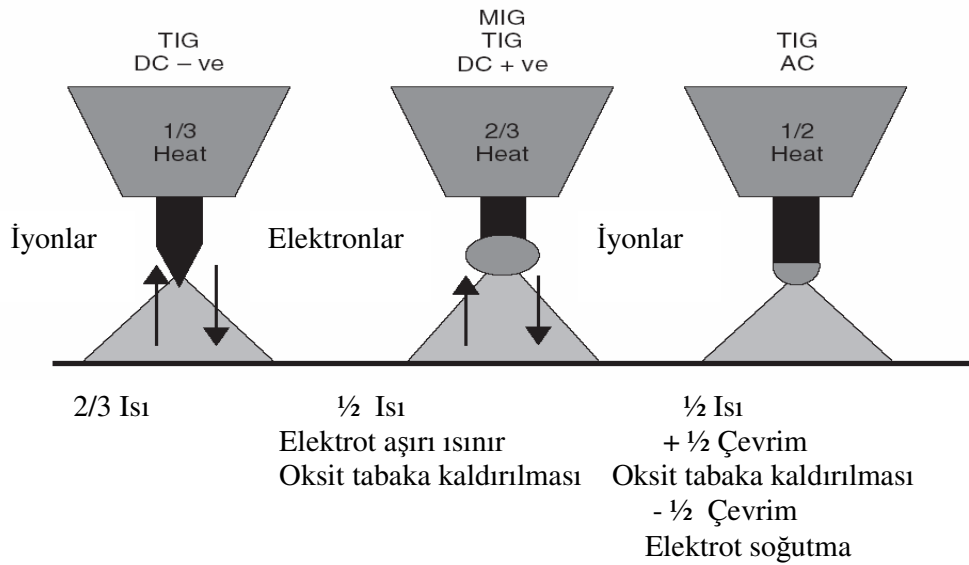
Alüminyum oksit oldukça direngen ve hızlı oluşan yapısıyla, alüminyuma mükemmel bir korozyon direnci sağlamaktadır. Aynı zamanda 660 °C' de ergiyen alüminyumla kıyaslandığında 2060 °C ergime sıcaklığıyla çok yüksek bir ergime noktasına sahiptir. Diğer çoğu metalin oksit formları kendi metalleriyle hemen hemen aynı veya daha düşük ergime noktasına sahip oldukları için kaynak sırasında kaynak banyosunun üstünde curuf formunda toplanırlar. Alüminyum metali, yüzeyindeki oksit film disperse edilmeden ergime noktasına kadar ısıtılırsa, ergimiş haldeki metalin etrafı bir oksit tabakası ile sınırlandırılır. Bu sınırlayıcı tabakanın uygun yöntemlerle ortadan kaldırılması gerekmektedir. Lehimleme, pirinçle lehimleme, MMA (metal ark), SA (submerged ark) gibi flux kullanılan kaynak proseslerinde bu film tabakasını dağıtmak için kullanılan fluxın çok agresif olması gerekmektedir. Bu tabakanın tamamen dağıtılmadığı durumlarda kaynak bölgesi porozite içerebileceği gibi servis koşullarında korozyona uğraması da muhtemeldir. Bu nedenle alüminyum kaynağında genellikle MMA ve SA yöntemlerinin kullanılması sağlıklı bir yöntem değildir ve yaygın olarak kullanılmazlar [1,3].



Şekil 4.3: Kaynak metali içerisinde hapsolmuş oksit [1]

Diğer taraftan gaz korumalı ark kaynaklarında istenen sonucu vermede kullanılan etkili bir yöntem olan katodik temizleme yapılabilmektedir. Güç kaynağının pozitif kutbuna bağlanan elektrod üzerinden doğru akım geçirildiğinde, parça üzerinden elektroda doğru elektron akışı meydana gelirken ters yöne doğru iyonların hareketi sağlanmaktadır. Hareket eden bu iyonlarla parça yüzeyi iyon bombardımanına uğrayarak, yüzeyde bulunan oksit film tabakasının kırılarak disperse olur. MIG kaynağında yalnızca DC elektrod pozitif (DCEP) akım kullanılarak oksit film tabakası kaldırılır. DC elektrod negatif (DCEN) akım kullanımı ark kararsızlığına ve metal transferinin dengesiz gerçekleşmesine sebep olacağı için kaynak kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir [1,4].

TIG kaynağında ise genellikle DCEN kullanılmakta ancak, bu yöntem alüminyuma uygulandığında kaynak kalitesinin düşük olmasına yol açmaktadır. TIG kaynağında DCEP kullanımı ise tungsten elektrotun, üretilen ısıнын 60-70 % i oranında aşırı ısınma yapmasına yol açar ve bunun sonucunda elektrodun erimesine ve zamanından önce tükenmesine neden olmaktadır (Genel kural olarak TIG kaynağı sırasındaki ısı dengesinin pozitif kutupta 2/3, negatif kutupta ise 1/3 oranında olması istenir). Bu nedenle TIG kaynağında alternatif akım kullanılarak pozitif yarı çevrimde oksit film tabakasının kaldırılması, negatif yarı çevrim kullanılarak da elektrodun soğutulması sağlanmaktadır [1].



Şekil 4.4: Katodik temizlik ve ısı dengesine kutupsallığın etkisi [1]

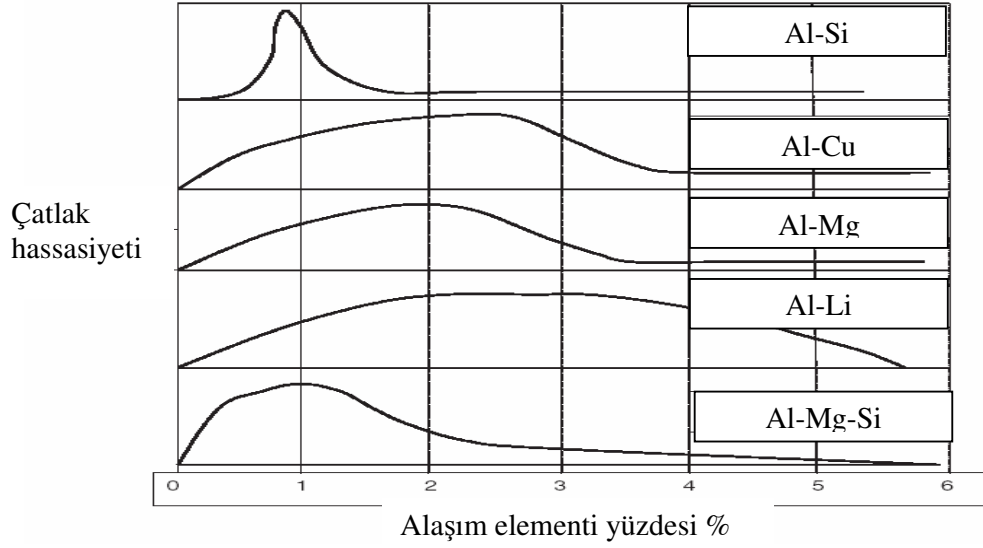
4.3 Sıcak Çatlak Oluşumu

Sıcak çatlak saf metallerin kaynağında rastlanmayan ancak ne yazık ki alüminyum gibi alaşım elementlerinin kullanıldığı tüm alaşım sistemlerinde sıkça karşılaşılan bir kaynak hata türüdür. Genel oluşum mekanizması tüm alaşım sistemlerinde temel olarak aynı olan sıcak çatlak sistemin nasıl katılaştığı ile ilgili bir problemdir [5].



Şekil 4.5: 3 mm kalınlığında A6082 ana metal/4043 dolgu metali kullanılarak TIG yöntemiyle yapılmış kaynakta meydana gelen sıcak çatlak [1]

Saf metale yapılan alaşım elementleri ilavesi ile oluşan alaşımın katılaşma sıcaklığı metalden farklılık gösterir ve bir çok farklı fazın oluşmasına sebep olabilmektedir. Alüminyum alaşımlarında kullanılan alaşım elementlerinin ana metalden daha düşük donma noktaları olan belirli bir aralıkta ötektik noktaları mevcuttur. Diğer bir deyişle, farklı derecelerde de olsa bütün alüminyum alaşımları çatlak hassasiyetine sahiptirler. Hot short range olarak adlandırılan çatlak testi hangi alaşım elementlerinin sıcak çatlak oluşumu için daha yüksek etkiye sahibi olduğunu tespit eder [1,5].



Şekil 4.6: Eriyik konsantrasyonunun çatlak hassasiyetine etkisi

Alüminyum alaşımlarının hepsi, hem yüksek hem düşük alaşımların içeriğinde sıcak yırtılmaya karşı çok yüksek direnç gösterdikleri bir seviyeye sahiptirler. Düşük seviyelerdeki alaşımların içeriğinde çok az miktarda ötektik varlığı mevcuttur. Böylece tane sınırlarındaki sıvı haldeki film süreksizleşir veya çok ince hale gelir. Sıvı filmin mukavemeti;

$$F = \frac{k \gamma A}{t} \text{ formülü ile ifade edilir. (F = katıyı yırtmak için gerekli olan}$$

kuvvet)

A = kesit alanı

t = katı film kalınlığı

k = sabit

γ = katı/sıvı arayüzey gerilimi

Bu formülden yola çıkılarak sıvı film kalınlığının (t) artması, filmi yırtmak için gerekli olan F kuvvetini azaltacağı açıkça görülmektedir. Böylece çatlakların başlaması için gerekli olan kuvvet artacaktır ve çatlakları dolduracak yeterli miktarda ötektik faz elde edilecektir. Çatlak oluşum hassasiyetinin düşmesi ve çatlakların bu şekilde doldurulması ile çatlaksız yapı elde etmek mümkün olacaktır [5].

Özet olarak, kaynak işleminde sıcak çatlak oluşumuyla karşılaşılması için;

- Küçük tane boyutu. Alaşımların içine küçük tane boyutuna sahip olan titanyum, zirkonyum veya skandiyum ilavesi ile,- bu elementlerin katılma sırasında çekirdek görevi görerek tane oluşumunun iyi olması sağlanır.
- Hot short range içerisinde bulunmayan bir alaşım sağlamak için kaynak banyosunun bileşiminin dolgu metali ilavesi ile kontrol edilmesi.
- Mümkün olan en hızlı kaynak hızının kullanılması, kaynağın hot short sıcaklık aralığındaki süresini azaltacaktır. Aynı zamanda yüksek hız, ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) genişliğini ve büzülme gerilimini azaltacaktır.
- Büyük hacimlerde tek bir kerede yapılan kaynak yerine, yüksek hızda, küçük hacimlerle çoklu pasolarla kaynak yapılmalıdır.
- Kaynak yönteminin ve kurulumunun (montajın şekli) minimum kalıntı gerilmesi oluşturacak şekilde seçilmesine dikkat edilmelidir.
- Kullanılacak dolgu metal, ergime noktası ana metale mümkün olduğu kadar yakın olan metallere seçilmelidir.
- Ağız hazırlamak ve espas atmak yeterli miktarda dolgu metalinin eklenebilmesine olanak vererek kaynak metalinin hot short range dışında bulunmasını sağlar [1,5].

4.4 Kaynak İşleminin Neden Olduğu Mukavemet Kaybı

Kaynak işleminin gerçekleşmesi için kaynaklanacak bileşenlerin yüksek sıcaklıklara ısıtılması gerekmektedir. Ergitme kaynağında bu sıcaklık değerleri ana metalin ergime sıcaklığının üzerindeki değerlere çıkmaktadır. Kaynak işlemi sırasında birbirinden farklılık gösteren üç temel bölge bulunmaktadır ; ergimenin gerçekleştiği kaynak metali, ana metal üzerinde bulunan ITAB (ısı tesiri altındaki bölge) ve etkilenmemiş ana metal. ITAB diye tabir edilen bölgenin özellikleri, bu bölgenin kaynak işlemi sırasında bir veya daha çok ısıtma ve soğutma işlemine maruz kalmasından dolayı ana metalden tamamen farklı bir yapıya ulaşır. Özellikle soğuk işlem görmüş veya çökelme sertleştirilmiş yapılmış alüminyum alaşımlarında bu farklılık üst seviyede olmakla beraber, tavlama yapılmış alaşım sistemlerinde bu farklılığın azaltılması mümkün olmaktadır [1].

4.4.1 Kaynak Metalinde Meydana Gelen Mukavemet Kaybı

Kaynak metali diye tabir edilen bölge dolgu metali ile ana metalin karışımından oluşan döküm yapısına sahip olan ergimiş kaynak bölgesidir. Ana metalin ve dolgu metalinin bileşimi, dilüsyon miktarı, kaynak işleminin seçimi, kaynakçının kalitesi ve katılaşma hızı kaynağın kalitesini etkileyen kaynak metalinin bileşimini, kalitesini ve tane büyüklüğünü belirleyen ana etmenlerdir [1,4].

Dilüsyon işlemi ile ana metale belirli miktarlarda yaşlandırma sertleştirilmesi yapılabilmesine rağmen, 2XXX serisi kaynak telleri haricindeki çoğu dolgu metallere yaşlandırma sertleştirilmesi yapılamamaktadır. Katılaşma hızının yüksek olması daha iyi tane boyutuna ulaşılmasını sağlayarak mukavemet özelliklerinin iyileştirmektedir. Geniş ve tek seferli kaynak pasoları yerine küçük kaynak dolgularının kullanılması daha iyi mekanik özellikler sağlarken, sıcak çatlak oluşumuna karşı da daha yüksek direnç gösterirler. Ancak kaynak köküne küçük kesitli kaynak dolgusu yapılması çekilme ve büzülme gerilmelerine karşı risk taşımaktadır [1,4].

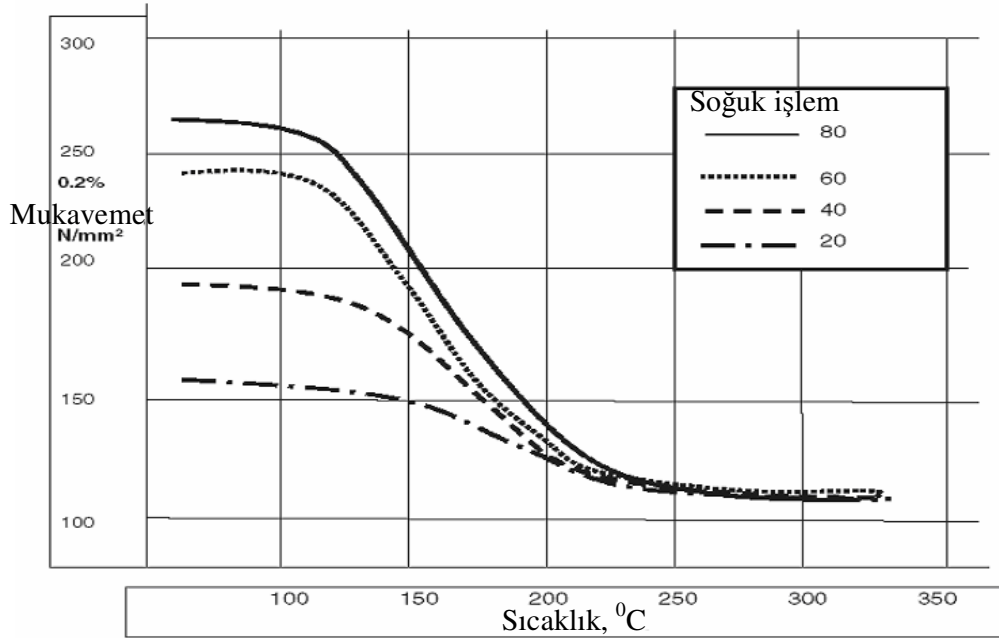
Katı eriyik sertleştirilmesi ve uygun dolgu metali seçimi kaynak metalinin mukavemet özelliklerini arttırmak için yapılabilecek çok sınırlı uygulamalardır. Genel kural olarak, yalnızca ana metal döküm yapısında veya tavllanmış durumda olduğu durumlarda kaynak metalinin özellikleri ana metal özellikleri benzer hale gelmektedir. Örnek olarak soğuk işlem ile sertleştirilmiş olan ana metale yapılan kaynak işleminde kaynak metalinin mukavemetinin ana metal ile aynı seviyeye gelmesi için soğuk işlem uygulanması kullanışlı değildir. Ana metale göre kaynak metalinin daha az mukavemetli olduğu ve giderilemediği bu gibi durumlarda malzemenin tasarımı bu eksiklik göz önüne alınarak yapılmalıdır. Bazı durumlarda ise kaynak metaline uygun alaşım elementleri ilavesi ile çökelme sertleştirilmesi yapılarak mukavemet artışı sağlanabilir. Bu yöntemin etkinliği dolgu metalinin bileşimine ve dilüsyonuna bağlıdır. Örnek olarak, 6061 serisi alüminyum alaşımına 4043 dolgu metali kullanılarak yapılan tek pasolu AC-TIG yöntemi ile kaynak sonrası yaşlandırma yapılarak 300N/mm² kopma mukavemetine sahip kaynak elde edilir. Aynı dolgu maddesi kullanılarak çok pasolu MIG kaynağı kullanıldığında ise 230 N/mm² lik mukavemet değeri elde edilir. 4043 dolgu metali yerine yalnızca 0.2% magnezyum içeren 4643 dolgu metalinin kullanıldığı MIG kaynağında ise

yaşlandırma sonrası AC-TIG yöntemi ile elde edilen mukavemet değerine ulaşabilmektedir. Bu örnek kaynak işleminde doğru ve uygun dolgu metali seçimin kaynak mukavemetini nasıl etkilediğini açıkça göstermektedir [1].

4.4.2 Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)

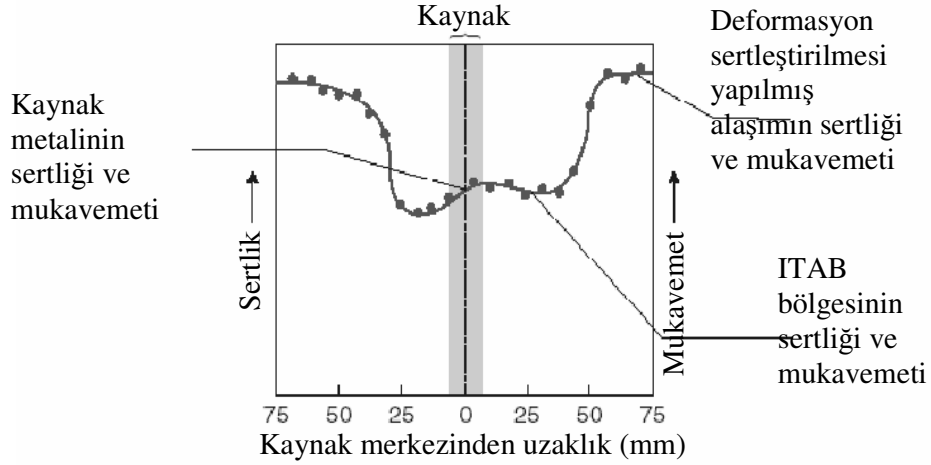
Döküm ve tavllanmış alüminyum alaşımlarının kaynağı sırasında, ısı tesiri altındaki bölgede ana metale göre çok önemli bir mukavemet kaybı meydana gelmemektedir. Ancak, soğuk işlem görmüş veya çökeltme sertleşmesi uygulanmış olan alaşımlarda, ITAB ana metale oranla çok önemli miktarlarda mukavemet kaybına uğramaktadır [1].

Soğuk işlem görmüş alüminyum alaşımlarında mukavemet kaybı ITAB bölgesinin yeniden kristallenmesi sırasında meydana gelmektedir. ITAB bölgesinde yeniden kristalleşme sıcaklığın 200 °C' yi aşmasıyla başlar ve sıcaklığın artmasıyla artarak 300 °C' nin üzerine çıkıldığında tamamen tavlânır [1].

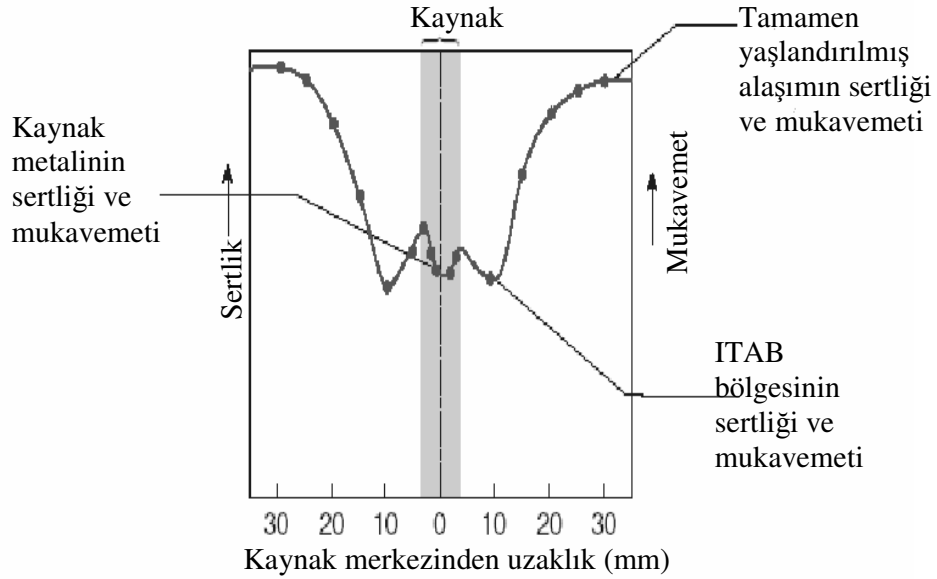


Şekil 4.7: Tavlama sıcaklığının soğuk işlem ve mukavemet üzerine etkisi [1]

Soğuk işlem görmüş alaşımlara benzer şekilde mukavemet kaybı ısı işlem (heat treatable) uygulanabilir alaşımlarda da görülmektedir. Daha kompleks olan bu mukavemet düşüşünün nedeni 2XXX serisi alaşımlarda çökelmiş olan fazın çözülmesinden, 6XXX ve 7XXX serisi alaşımlarda ise çökelmiş fazda kabalaşma (coarsening) veya aşırı yaşlanma meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır [1].



şekil 4.8: Soğuk işlem gormuş alüminyum alaşımlarında kaynağın mukavemete etkisi



şekil 4.9: Yaşlandırma yapılmış 6061 T6 alaşım kaynağında kaynağın mukavemete etkisi

Mukavemet kaybına neden olarak gösterilebilecek diğer bir etmende kaynak havuzu içerisinde alaşım elementlerinin kaybedilmesidir. Başta magnezyum olmak üzere bazı alaşım elementleri düşük kaynama noktasına sahip oldukları iğer kaynak sırasında kaybolurken, lityum gibi oksijene yüksek reaktivitesi olan alaşım elementleri ise oksitlenerek özelliklerini kaybetmektedirler. Bu alaşım elementlerinin kaybını önlemek ve böylece kaynak bölgesinde mukavemet düşmesini engellemek

için yapılması gereken gaz korumasının büyük bir dikkatle ve titizlikle yapılması gerekmektedir.

4.5 Kaynak Hataları ve Kaynak Hatalarının Tespiti

Değişik tekniklerle yapılan kaynak işlemlerinde kaynak bölgesi, kaynak işlemlerinin karakteristik özelliği olan süreksizlikler içermektedir. Genel anlamıyla süreksizlik, herhangi bir cismin olağan yapısındaki farklılaşma olarak betimlenebilir. Kaynak işlemi sırasında oluşan süreksizlikler bir çok şekilde isimlendirilebilir veya gruplandırılabilir. Daha önce bahsedilmiş olan sıcak çatlaklar, gaz bolukları ve oksit tabakası varlığı metalurjik faktörlere bağlı olup, bunun dışında kalan kaynak süreksizlikleri kaynakçının yeteneğine ve eğitim seviyesine bağlıdır. Özellikle yeterli eğitimin verilmemesi ve buna bağlı olarak gelişen yanlış veya eksik yöntem ve malzeme kullanımı kaynak süreksizliklerinin ortaya çıkmasındaki en büyük nedendir. En yaygın olarak karşımıza çıkan kaynak süreksizliklerine bakılacak olursa aşağıdaki şekilde tanımlamak mümkündür.

4.5.1 Kalıntılar

Kaynak metalinde ve/veya kaynak metali ile ana metal arayüzeyinde çeşitli boyut ve şekillerde bulunan metalik olmayan partiküller olarak tanımlanır. Oluşum nedeni, görevi ergimiş kaynak metalini korumak olan örtünün katılaşan kaynak dikişi içerisinde tutulması veya curufun kaynak metali içerisinde hapsolmasıdır [1].

4.5.2 Yetersiz Ergime

Kaynak metali ile ana metal arasında veya daha önceki pasolarla birleşmenin olmadığı bölgelerdir. Uygun olmayan kaynak tekniği, yetersiz kaynak ağzı, düşük kaynak ısısı ve kirlilikler nedeniyle meydana gelir [1].

4.5.3 Yetersiz nüfuziyet

Kaynak metalinin kök bölgesine tamamen inemeyip o bölgede yeterli ergimeyi sağlayamadığı durumları tanımlar [1].

4.5.4 Yanma Olukları

Kaynak dikişi boyunca yüzeyde görülen süreksizlikler olup, ana metalin ergitilip uzaklaştırılması ve yeterli dolgu malzemesinin beslenmediği durumları tanımlar [1].

4.5.5 Yetersiz Dolgu

Kaynak dolgu malzemesinin kaynak ağzını doldurabilmek için yeterli miktarda olmaması durumudur ve sonuç olarak kesitte malzeme kaybı anlamına gelmektedir [1].

4.5.6 Overlap

Kaynak metalinin yüzeyden yada kaynak kökünden taşması olarak tanımlanan süreksizlik türüdür [1].

4.5.7 Aşırı Yüksek Kaynak Dikişi

Kaynak ağzını doldurabilmek için gerekli olandan çok daha fazla miktarda bulunan kaynak metali şeklinde ifade edilir [1].

4.5.8 Ark Yanıkları

Çok ciddi ana metal süreksizliği olup, kaynak arkının kazara kaynak ağzı dışında yakılması sonucu oluşur. Ana metal üzerinde aniden eritme ve aşırı hızlı soğutma meydana gelen bir bölge oluşur [1].

4.5.9 Sıçrantılar

Ergitme kaynağı sırasında ortaya çıkan ve kaynağın bir parçasını oluşturmeyen metal parçacıklarıdır [1].

Kaynak süreksizliklerinin tespit edilmesindeki en etkili yöntem kaynağa hasarsız malzeme muayene (NDT) yöntemlerinden uygun olan bir veya bir kaçanesinin uygulanmasıdır. Özellikle henüz dizayn aşamasında kaynak işleminin yanında NDT işleminde hesaba katılması ve NDT işleminin üretim prosesi içerisinde yer alması arzulanan kaliteye ulaşılmasında son derece önemlidir [8,9].

Alüminyum ve alaşımlarına çeliklerden farklı olarak, ferro-manyetik özellik göstermedikleri için Manyetik Parçacık testi uygulanamaz. Bunun dışında kalan Sıvı Penetrant, Eddy Current, Ultrasonik Muayene ve Radyografi tekniklerinden her biri olası kaynak süreksizliğine veya şekline uygun şekilde seçilerek uygulanabilmektedir. Bu tekniklerin uygulama yöntem ve şekilleri prensip olarak çeliklerle aynıdır. Aşağıdaki tabloda alüminyum ve alaşımlarının kontrol edilmesinde

kullanılan NDT tekniklerinden uygun tekniği belirlerken dikkat edilmesi gerekli olan noktalar verilmektedir [8].

Tablo 4.2: Sıvı penetrant testi uygulamasının özellikleri [8,9]

Sıvı Penetrant Testi	
+ Hem manyetik hem manyetik olmayan metallere uygulanabilme + Çok kolay taşınabilir sistem + Geniş alanlara çok hızlı bir şekilde uygulanabilme + Kompleks şekilli küçük parçalara uygulanabilme + Kullanımı ve yorumlanması kolay, ucuz sistem	- Yalnızca yüzeye açık hataların tespit edilmesinde - Yüzey temizliğinin ve hazırlığının çok dikkatli bir şekilde hazırlanması gerekliliği - Tekrar test imkanının bulunmaması - Sağlık ve güvenlik sorunlarına neden olan kimyasalların kullanımı

Tablo 4.3: Ultrasonik muayene tekniği uygulamasının özellikleri [8,9]

Ultrasonik Muayene	
+ Yüzey çatlakları ve süreksizliklerinin tespit edilmesinde çok duyarlı + Hata derinliğinin ölçüm imkanı + Kolaylıkla taşınabilir sistem + Muayenenin yalnızca bir yüzeyden yapılabilmesi + Hızlı bulguların değerlendirilmesinin anında olması + İnsan ve çevre sağlığına olumsuz bir etkisinin olmaması	- Operatör çok iyi eğitilmiş ve tecrübeli olması gerekliliği - 3 mm ve altındaki hatalarının tespit edilmesinin zor veya imkansız - Bağlantının geometrisine bağlı olarak kaynak bölgesinin incelenmesinin sınırlandırılması - Bazı uygulamaların oldukça yavaş ve yorucu olması - Test parçası ve kalibrasyon gerekliliği

Tablo 4.4: Radyografik muayene uygulamasının özellikleri [8,9]

Radyografik Muayene	
+ Bütün kaynak uygulamalarında kullanılabilir + Yüzeye ulaşma gerekliliğinin olmaması + Sıcak çatlak ve gaz boşlukları, yanma olukları gibi hacimsel kaynak hatalarının tespitinde çok önemli + Çok yönlü uygulama imkanı	- Oldukça yüksek yatırım maliyeti - İnsan sağlığı açısından tehlikeli olması ve önlem alınması gerekliliği - Çatlak kontrolünde sınırlı uygulama - Olası hata bölgelerinin önceden belirlenmesi - Yalnızca belirli kalınlıktaki parçaların kontrolünün yapılabilmesi - Operatörün iyi eğitilmiş ve tecrübeli olması

5. KALINTI GERİLME ANALİZİ

5.1 Malzemelerde Kalıntı Gerilmeler

Kalıntı gerilmeler bütün malzemelerde, malzeme üretiminin her aşamasında artarak oluşurlar. Isıl işlem, mekanik işlemler, plastik şekil verme, kaynak ve kaplama gibi mühendislik malzemesi üretiminin evrelerini oluşturan her bir süreç bu gerilmelerin oluşum sebepleridir. Örnek olarak ısıtıl işlemde malzeme içerisinde bir sıcaklık dağılımı oluşur ve malzemenin farklı bölgelerinde farklı sıcaklıklar etkin olabilmektedir. Kaynak işlemi ile birleştirmede de aynı türden bir sıcaklık ve bileşim farklılığı mevcut olmaktadır. Malzeme içerisinde farklılık gösteren bu bölgeler de farklı gerilme dağılımına yol açar. Kalıntı gerilmelerin servis koşullarında malzeme içerisinde yüksek değerlerde bulunması da çatlak ilerlemesine, beklenmeyen erken kırılmalara, gerilmeli korozyona, boyutsal hassasiyet gerektiren malzemelerde bu hassasiyetin kontrolünün zorluluğuna yol açar. Malzemelerde kalıntı gerilmeler temel olarak üç etkenden dolayı oluşur [10].

- Mekanik etkenler
- Isıl etkenler
- Kimyasal etkenler

Mekanik etmenler genel anlamda üretim süresince oluşan üniform olmayan plastik deformasyondan kaynaklanır. Bunlar üretim sürecinin doğasından kaynaklanan deformasyonlar olabileceği gibi kaynak, talaşlı imalat, haddeleme ve kumlama gibi üretim sürecinde bulunması olası olan diğer işlem kademelerinden kaynaklanabilirler [10,12].

Isısal etkenlerden kaynaklanan kalıntı gerilmeler de üretim veya ısıtıl işlem süreçlerinde meydana gelen üniform olmayan ısınma ve soğuma koşullarından dolayı meydana gelir. Kaynak işlemi aynı zamanda malzemelerde kalıntı gerilme oluşturabilecek ısısal etmenlerden biridir [11].

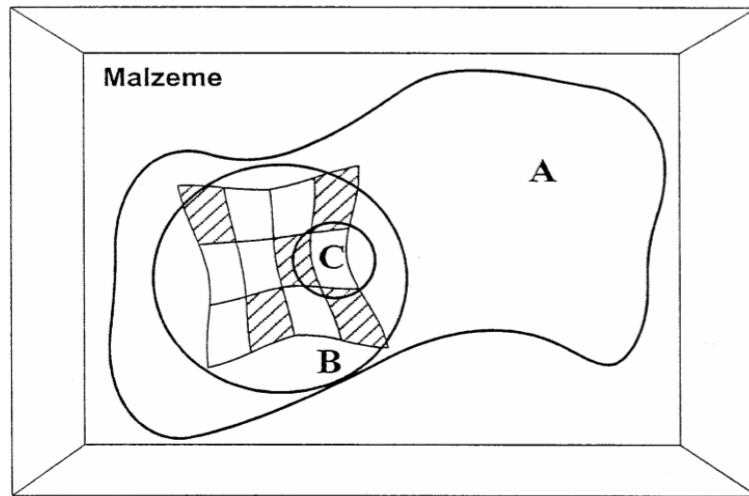
Kimyasal etkenler ise kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanan hacim değişmeleri, faz dönüşümleri, kimyasal yüzey işlemleri ve kaplama işlemleri gibi birçok nedene dayanır [12].

5.2 Kalıntı Gerilme Konusunda Temel Kavramlar

Herhangi bir dış yük ve zorlanma olmaksızın bir hacimde bulunan denge halindeki iç gerilmeler olarak tanımlanan kalıntı gerilmeler, kendi arasında daha spesifik bölümlerde incelenebilecek olan farklı türde kalıntı gerilmeleri kapsayan geniş bir kavramdır [12].

Eğer iki farklı faz içeren bir malzeme göz önüne alınacak olursa Şekil. 5.1’de şematik olarak gösterilen büyüklükler üzerinde farklı türde kalıntı gerilmelerin tanımlanmasını yapmak mümkün olmaktadır [12].

- A.) Bütün malzeme hacmi ile ifade edilebilecek, tane boyutu ölçeğinden daha büyük ölçekteki makro kalıntı gerilmeler
- B.) Tane boyutu ölçeğinde incelenebilecek, tek fazlı malzemelerde tanelerdeki farklılık, çok fazlı malzemelerde fazlar arasındaki farklılıkla ifade edilebilecek mikro kalıntı gerilmeler
- C.) Kristal yapı hataları ve dislokasyonların oluşturduğu, atomal ölçekte ifade edilebilecek mikro kalıntı gerilmeler



Şekil 5.1: Malzeme üzerinde farklı kalıntı gerilmelerin tanımlandığı bölgeler. A.) Makro gerilmeler B.) Mikro gerilmeler C.) Mikroskobaltı gerilmeler [12]

5.3 Kalıntı Gerilmelerin Ölçüm Yöntemleri

Kalıntı gerilmelerin malzeme için zarar verici olabileceği gözönüne alınacak olursa bu gerilmelerin varlığının saptanması ve miktarının ölçülebilmesinin önemi ortaya çıkmaktadır. 1900' lerin başından beri üzerinde çalışılan bir konu olan malzemelerde kalıntı gerilme ölçümü konusunda birçok teknik geliştirilmiştir.

Tablo 5.1: Kalıntı gerilme ölçüm yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları yönünden karşılaştırılması [12]

Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar
Kör Delik	• Basit ve hızlı • Yaygın kullanım • Taşınabilir • Birçok malzemeye uygun	• Veri değerlendirme güç • Hasar verici • Sınırlı çözünürlük
X-Işınları Kırınımı	• Yaygın kullanım • Taşınabilir • Birçok malzemeye uygun • Mikro ve makro kalıntı gerilme ölçebilir	• Basit Ölçümler • Daha küçük numuneler
Synchrotron Radyasyon	• Arttırılmış nüfuziyet • Derinlemesine analiz • Çok hızlı • Mikro ve makro kalıntı gerilme ölçebilir	• Uzman Operator • Sadece Laboratuvarda kullanım
Nötron Kırınımı	• Yüksek Nüfuziyet • 3 boyutlu harita olanağı • Mikro ve makro kalıntı gerilme ölçebilir	• Uzman Operator • Sadece Laboratuvarda kullanım
Eğme, Tabaka kaldırma	• Basit • Yaygın kullanım	• Belirli numune şekli • Hasar verici • Sadece Laboratuvarda kullanım
Manyetik	• Çok hızlı • taşınabilir	• Sadece ferromanyetik malzemelere uygun
Ultrasonik	• Yaygın kullanım • Taşınabilir • Birçok malzemeye uygun • Ucuz	• Hassasiyeti düşük
Raman Spektroskopisi	• Hassasiyeti yüksek • Taşınabilir sistemler mümkün	• Sadece yüzey ölçümleri • Veri değerlendirme güç • Kalibrasyon zor • Sınırlı malzemeye uygulanabilir

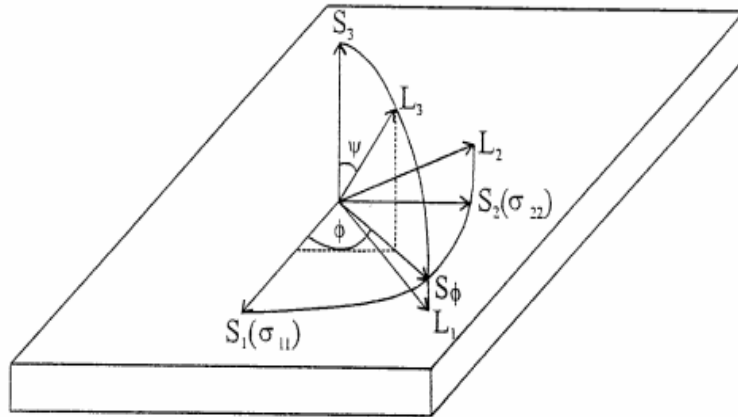
5.4 X- Işınları Kırınımı Yöntemi ile Gerinme ve Kalıntı Gerilmelerin Belirlenmesi

Tablo 5.1’de görüldüğü gibi kalıntı gerilme analizi için mevcut olan bir çok teknik bulunmaktadır. Bu teknikler arasından X-ışınları kırınımı yöntemi her hasarsız bir yöntem olması hem de kolay uygulanarak doğru sonuçlar vermesi açısından öne çıkmaktadır [12].

X-ışınları kırınımı yöntemi öncelikle malzemelerde olan elastik gerinimin belirlenmesine olanak veren bir yöntemdir. Belirlenen gerinme tensörü ve malzeme elastik sabitlerinin hesaplamalarda yardımcı olarak kullanılmasıyla malzemenin içerdği kalıntı gerilme değerleri hesap edilebilir [12].

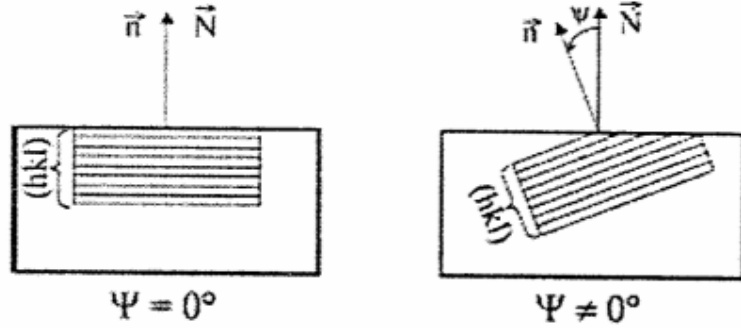
5.5 X-Işınları Kırınımı ile Gerinme Hesabında Kullanılan Eşitlikler

X-ışınları ile gerinme ölçümü yapılırken kullanılan eşitliklerde kullanılan doğrultu ve açıların tanımlandığı ortogonal koordinat sistemi Şekil 5.2’ de verilmiştir. Bu şekilde L harfi ile yapılan tanımlamalar laboratuvar ortamında yer alan eksenleri, S harfi ile yapılan tanımlamalar ise numune yüzeyinde yer alan eksenleri ifade etmektedir.



Şekil 5.2: Laboratuvar ve numune koordinat sistemi ve açıların tanımlanması [12]

Şekilde Si eksen takımı yüzeyi ifade eder ve S_1 ve S_2 bu numune yüzeyine ait olan eksen takımını tanımlar. Laboratuvar eksen takımını ise L tanımlar ve L_3 X-ışınları difraksiyonu ile ölçülen (hkl) düzlemlerinin normalini belirler. L_2 ise, S_1 ve S_2 ile aynı düzlemde ve S_2 ile ϕ açısı yapar.



Şekil 5.3: Numune normal ve (hkl) düzlemleri normalinde ψ açısının şematik gösterilmesi

L_3 eksenindeki doğrultusundaki gerinme hesabı yaklaşımı için H. Dölle tarafından, kırınım verilerinden elde edilen bir $d_{\phi\psi}$ latis parametresi için aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$\left(\varepsilon_{33} \right)_{\phi\psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} \quad (4.1)$$

eşitlikteki d_0 gerilme içermeyen durumdaki latis parametresidir. Bu gerinme tensör dönüşümü kullanılarak, numune koordinat sistemindeki ε_{ij} gerinmesi olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

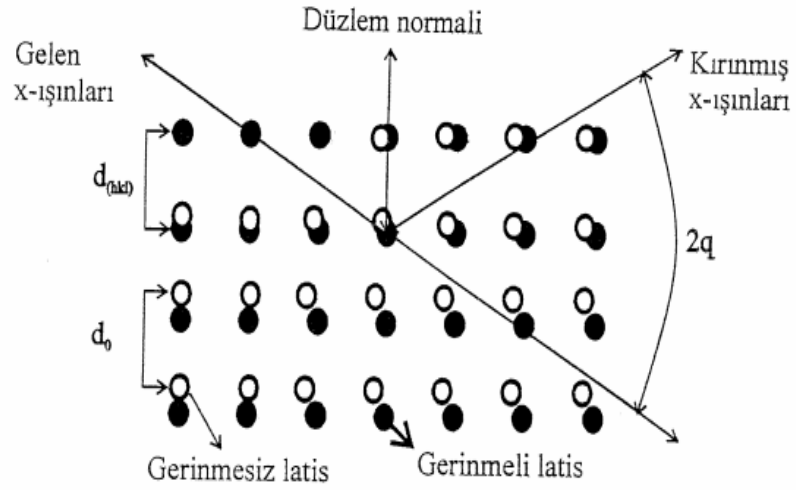
$$\left(\varepsilon_{33} \right) = a_{3k} a_{3l} a_{kl} \quad (4.2)$$

Bu formülde a_{3k} ve a_{3l} terimleri sırasıyla L_3 , S_k , S_l arasındaki yön kosinüsleridir. Yön kosinüsleri matris olarak verilirse aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$a_{ik} = \begin{vmatrix} \cos \phi \cos \varphi & \sin \phi \cos \varphi & -\sin \varphi \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ \cos \phi \sin \varphi & \sin \phi \sin \varphi & \cos \varphi \end{vmatrix} \quad (4.3)$$

bundan sonra formülde a_{3k} ve a_{3l} yerine konursa X-ışınları kırınımı ile gerinme hesabının temel eşitliği aşağıdaki şekilde ortaya çıkar.

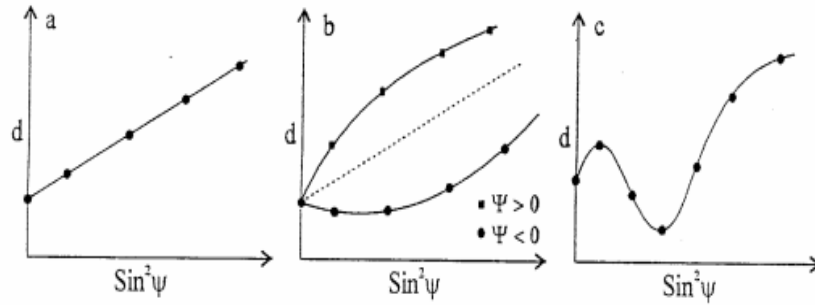
$$\left(\varepsilon_{33} \right)_{\phi\psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} = \varepsilon_{11} \cos^2 \phi \sin^2 \psi + \varepsilon_{12} \sin 2\phi \sin^2 \psi \quad (4.4)$$



Şekil 5.4: Gerinmeli-gerinmesiz durumlarda latis ve X-ışınları kırınımı

Şekil 5.4’de X ışınları ile malzeme atomlarının karşılaşması durumunda aralarındaki etkileşim ve kırınımın gerçekleşmesinin şematik olarak gösterimi basitçe verilmiştir. Bu şekilde gerinmeye uğramış latis ve gerinmesiz latis yapısı da gösterilerek normal durum ile gerinmeli durum arasındaki fark ortaya konmuştur.

Çok kristalli malzemelerde bir (hkl) düzlemi için farklı ψ açılarında yapılan tiltlerde d latis parametresindeki değişim elde edilebilir. Bu verilerle çizilen $d\text{-}\sin^2\psi$ grafiklerinde tipik olarak 3 farklı davranış gözlenir.



Şekil 5.5: En yaygın rastlanan üç tip $d\text{-}\sin^2\psi$ eğrisi

5.6 d-sin²ψ Analizleri

Eşitlik (4,4) altı bilinmeyenli lineer bir eşitliktir. (ε_{11} , ε_{12} , ε_{22} , ε_{33} , ε_{13} , ε_{23}) ve eğer her bağımsız yön için $d_{\phi\psi}$ ölçülürse eşitlik çözülebilir. Pratikte daha kesin sonuçlar elde edebilmek için çok daha fazla ölçüm yapmak gereklidir. Bir önceki bölümde belirtilen verilerin eğride salınma göstermesi gibi sorunların ortadan kaldırılması ve uygun verilerin seçilerek kullanılabilmesi amacıyla çok sayıda ölçüm yapılması gerekmektedir [12].

Birçok farklı ölçüm yapmanın getirdiği zaman alıcı analizleri kısaltmak ve karmaşık verilerin daha basite indirgenmesini sağlamak amacıyla daha basit bir prosedür, daha az sayıda veri elde edilebilmesi için d-sin²ψ grafiğinin eğimini kullanarak sonuca gidebilecek şekilde aşağıda konmuştur.

$$\varepsilon_{ij} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{vmatrix} \quad (4.5)$$

Sadece pozitif ve negatif ψ tiltleri kullanılarak sonuca gidilebilir. Eşitlik (4,5)'deki gerinme tensörleri için yeni bir düzenleme yapılacak olursa (4,4) aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} = \{\varepsilon_{11} \cos^2 \phi + \varepsilon_{12} \sin^2 2\phi + \varepsilon_{22} \sin^2 \phi - \varepsilon_{33}\} \sin^2 \psi + \varepsilon_{33} \quad (4,6)$$

Bu eşitliğin tanımlanabilmesi ile eşitlikte yer alan ε_{11} , ε_{12} , ε_{22} ve ε_{33} gerinme tensörlerinin hesabı için daha basit bir analiz yapılması artık mümkündür.

5.7 X-Işınları Kırınımı verileri ile Kalıntı Gerilme Analizi

X ışınları kırınımı ile gerinme değerlerinin elde edilmesi ile S_i koordinat sistemindeki gerilmeler Hook Kanunundan faydalanılarak hesap edilebilir.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (4,7)$$

C_{ijkl} , S_i koordinat sisteminde tanımlanan elastik sabitlerdir. Herhangi başka bir koordinat sistemindeki gerilmeler ise:

$$\sigma'_{mn} = a_{mi} a_{nj} \sigma_{ij} \quad (4,8)$$

olarak bir ikinci derece tensörü halinde verilir. Burada a yön kosinüsüdür.

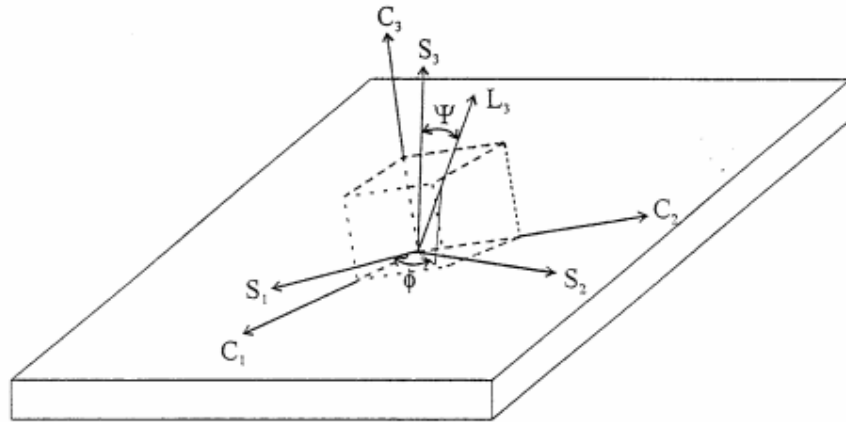
Bir önceki başlıkta tanımlanan basitleştirilmiş gerinme analizi prosedürü bütün X-ışınları kırınımı ile gerilme ölçümleri için de aynen uygulanabilir [12].

$$\varepsilon_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix} \quad (4.9)$$

Numune koordinat sistemindeki gerinme ise eşitlik (4,7)'nin tersi olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir [12]:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (4,10)$$

Burada S_{ijkl} elastik uyum sabitlerini ifade eder. Hesaplamalar için gerekli olan elastik uyum sabitleri S_i koordinat sisteminde tanımlı olmak durumundadır ve birim hücre koordinatlarındaki elastik sabitler kullanılarak elde edilebilirler. Şekil 4,5'te birim hücre koordinatları, laboratuvar ve numune koordinatları ile birlikte gösterilmiştir.



Şekil 5.6: Birim hücre koordinatları C_i , laboratuvar koordinatları L_i ve numune koordinatları S_i ile aralarındaki ilgili açıların tanımlanması [12]

Bu durumda tensör dönüşümü uygulanarak örneğin ε_{11} için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\varepsilon_{11} = a_{1m}a_{1n}a_{k0}a_{lp}S_{mnop}\sigma_{kl} \quad (4,11)$$

Burada a_{k0} birim hücre koordinat sistemi arasındaki yön kosinüsüdür. S_{mnop} birim hücre koordinat sisteminde tanımlanmıştır. Bu eşitlik gerinme tensörünün diğer bileşenleri için de benzer şekilde yazılabilir [12].

Analizi yapılan malzeme izotropik ise eşitlik (4,10) aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E}\sigma_{ij} - \delta_{ij}\frac{\nu}{E}\sigma_{kk} \quad (4,12)$$

Eşitlik (4,4) üzerinde eşitlik (4,12) yerine konursa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\begin{aligned} \frac{d_{\phi\psi}-d_0}{d_0} &= \frac{1+\nu}{E}\{\sigma_{11}\cos^2\phi + \sigma_{12}\sin^2 2\phi + \sigma_{22}\sin^2\phi - \sigma_{33}\}\sin^2\psi + \frac{1+\nu}{E}\sigma_{33} \\ &- \frac{\nu}{E}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{1+\nu}{E}(\sigma_{13}\cos\phi + \sigma_{23}\sin\phi)\sin 2\psi \end{aligned} \quad (4,13)$$

İzotropik malzemeler için eşitlik (4,13)'e göre S_i koordinat sisteminde mümkün olan gerilme tensörleri aşağıdaki formda olabilir.

$$\begin{vmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (4,14a)$$

$$\begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (4,14b)$$

$$\begin{vmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix} \quad (4,14c)$$

Burada numune yüzeyinden alınan kırınım verilerinden elde edilen $d\text{-sin}^2\psi$ eğrileri Şekil 4,4'te a grafiğinde ki gibi lineerdir. Aynı şekildeki c grafiğinde görülen salınım σ_{13} ve σ_{23} kayma gerilmelerinin de varlığına işaret eder.

5.8 X-Işınları Kırınımı ile İki Eksenli Kalıntı Gerilme Analizi

Analizi yapılan numunede X-ışınları ile etkileşime giren tabakada gerilme tensörü denklem (4.14a ve 4.14b)' deki gibi iki eksenli ise eşitlik (4.13) aşağıdaki hale dönüşmüş olur:

Burada σ_ϕ , S_ϕ yönündeki gerilme bileşenidir ve formül (4.14a ve 4.14b)'ye göre aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\sigma_\phi = \sigma_{11} \cos^2 \phi + \sigma_{22} \sin^2 \phi \quad (4.16a)$$

$$\sigma_\phi = \sigma_{11} \cos^2 \phi + \sigma_{12} \sin^2 \phi + \sigma_{22} \sin^2 \phi \quad (4.16b)$$

Eşitlik (4,15) X ışınları kalıntı gerilme analizlerinde kullanılan genel formüldür. Farklı ψ tiltleri ile yapılan kırınım analizlerinden elde edilen deneysel verilerin değerlendirilmesinden sonra, $d\text{-sin}^2\psi$ grafiğinden hesaplanan değerler yardımı ile bu eşitlikten kalıntı gerilme değeri hesabı yapılabilir. Bu hesaplamanın yapılabilmesi için analizi yapılan malzemelerin elastik sabitleri E, v, ve gerilim içermeyen latis parametresi d_0 biliniyor olmalıdır.

Yapısında farklılıklar içeren malzemelerde elastik sabitler E,v yerine S_1 ve $S_2/2$ değerleri kullanılabilir. E,v ve S_1 ve $S_2/2$ değerleri literatürden ilgili malzemeler için bulunabilir. S_1 ve $S_2/2$ değerleri E ve v elastik sabitlerine bağlı olarak aşağıdaki şekilde verilir. [12].

$$S_1 = \frac{-v}{E} \quad (4,17a)$$

$$\frac{S_2}{2} = \frac{1+v}{E} \quad (4,17b)$$

Eğer literatürde bu değerler mevcut değilse tek ve çok kristalli malzemeler için bu sabitler birkaç değişik yöntem ile hesaplanabilir. Bunlar mekanik yöntemler, ultrasonik yöntemler veya X ışınları yöntemleridir [1].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda kullanılan malzeme soğuk hadde ve sıcak hadde ürünü alüminyum 6016 alaşımlarıdır. 1.2 mm ve 1.8 mm kalınlığa sahip olan bu alüminyum levhalara TIG kaynağı uygulanıp kaynak parametreleri değiştirilerek kaynaklanabilirlikleri arasındaki farklar araştırılmıştır.

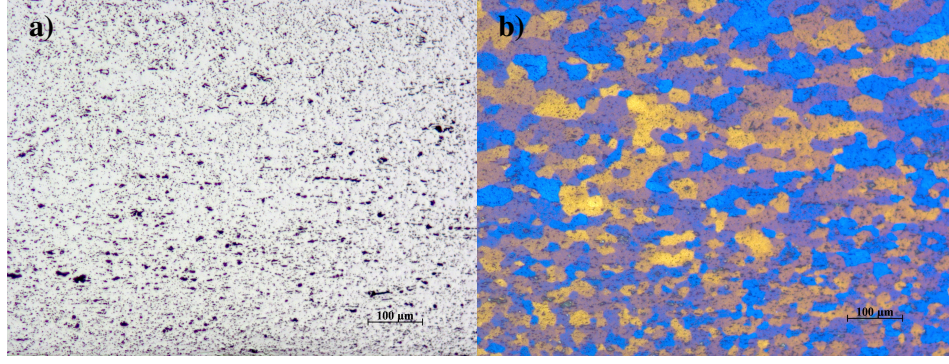
6.1 Deneylerin Yapılışı

Kaynak işleminden önce iki farklı üretim yöntemine sahip bu levhaların mikroyapıları optik mikroskopta incelenmiştir. Kaynak işlemi sonrası mikroyapıdaki değişikliklerin gözlenmesi için yapılan bu çalışmada dağlayıcı olarak Kellar sıvısı kullanılmıştır. Ayrıca yine kaynak işleminden önce numunelere çekme ve eğme deneyleri yapılmıştır.

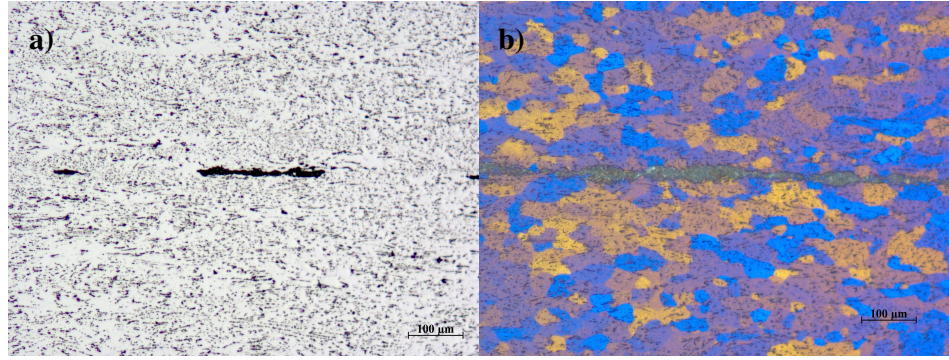
Kaynak yöntemi olarak manuel TIG kaynağı kullanılmış olup kaynak işlemi THY Anonim Ortaklığı kayak atölyesinde yapılmıştır. Dolgu metali olarak 1.6 mm çaplı Al 4043 alaşımı kullanılmıştır. Kaynak işlemi sırasında % 2 toryum içeren 3.2 mm çaplı tungsten elektrot kullanılmıştır. Alternatif akım kullanılarak yapılan kaynak işleminde akım değeri 50 A ile 85 A arasında değiştirilmiştir. Kullanılan Ar koruyucu gazı ve 15 CFH değerindeki gaz akışı sabit tutulmuştur.

6.2 Deney Sonuçları

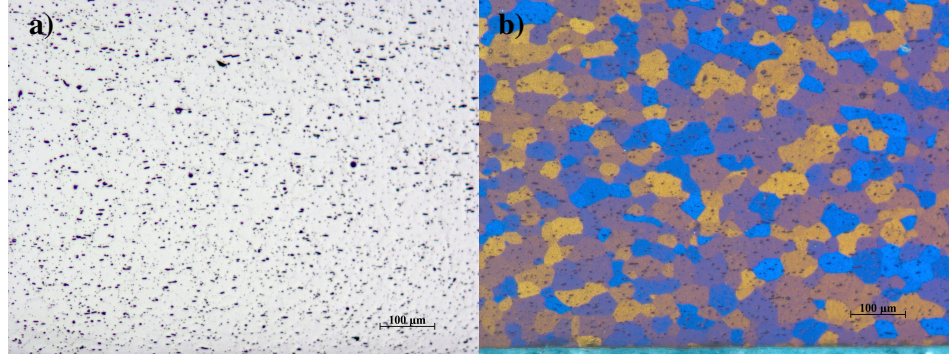
Kaynak işlemi öncesi numunelerin mikroyapıları optik mikroskopta incelenmiştir. Buna göre numunelerin mikroyapıları Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4' te verilmiştir.



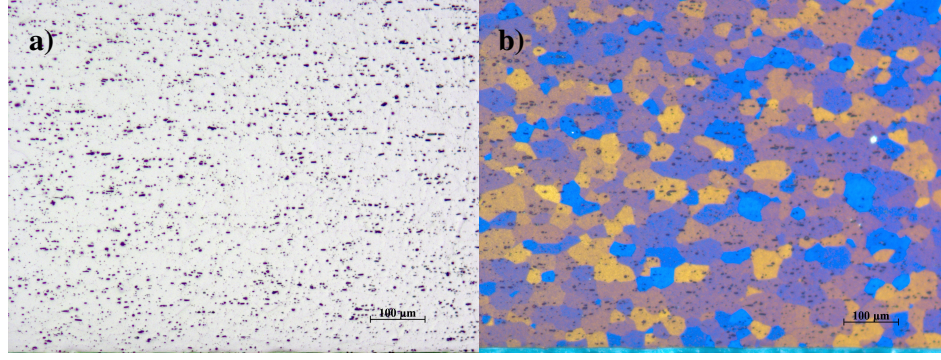
Şekil 6.1: Soğuk haddelenmiş (Twin Roll) Al 6016 alaşıımının hadde yönüne dik 100X büyütmedeki mikroyapısı a) normal ışık b) polarize ışık



Şekil 6.2: Soğuk haddelenmiş (Twin Roll) Al 6016 alaşıımının hadde yönüne paralel 100X büyütmedeki mikroyapısı a) normal ışık b) polarize ışık



Şekil 6.3: Sıcak haddelenmiş Al 6016 alaşıımının hadde yönüne dik 100X büyütmedeki mikroyapısı a) normal ışık b) polarize ışık



Şekil 6.4: Sıcak haddelenmiş Al 6016 alaşımının hadde yönüne paralel 100X büyütmedeki mikroyapısı a) normal ışık b) polarize ışık

Kaynak işlemi öncesi yapılan çekme deneyi sonuçları Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1: Kaynak öncesi numunelere yapılan çekme deneyi sonuçları

	% 0.2 Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	% Uzama
Sıcak hadde (hadde yönüne dik)	132.465	260.850	28.60
Sıcak hadde (hadde yönüne paralel)	125.574	241,667	26.10
Soğuk hadde (hadde yönüne dik)	131.462	240,816	22.20
Soğuk hadde (hadde yönüne paralel)	132.326	249.667	30.10

6.3 Kaynak işlemi sonrası yapılan deneysel çalışmalar

Tablo 6.2: Kaynak sonrası soğuk hadde numunelere yapılan çekme deneyi sonuçları

Sıcak Hadde (Hadde yönüne paralel)	% 0.2 Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	% Uzama
62 A	133,1	203,9	7,6
65 A	124,7	218,7	11,9
68 A	132	216,4	10,4
70 A	129,7	212,3	10,1
72 A	120,9	182,2	8
75 A	131,3	206,6	9,4

Yapılan çekme deneyleri sonucunda malzemenin akma, çekme ve % uzama değerlerinin değişimine bakılarak 1.2 mm kalınlığında sıcak haddelenmiş alüminyum

levhalar için en uygun kaynak akımının 65 A ile 70 A aralığında olduğu görülmektedir.

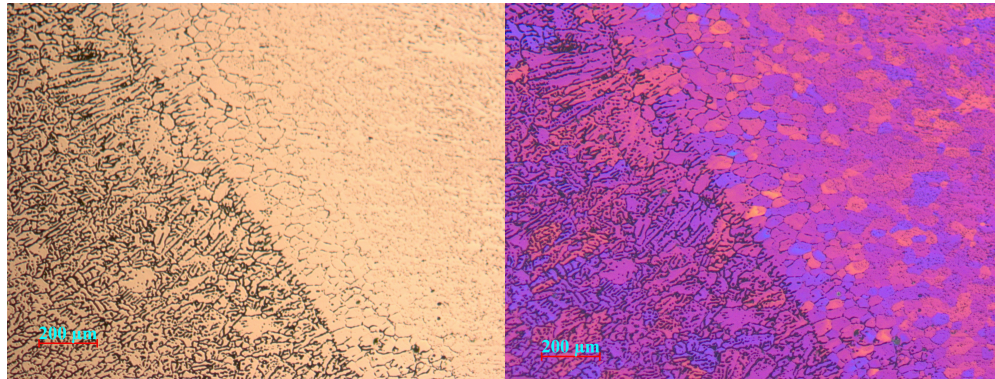
Tablo 6.3: Kaynak sonrası sıcak hadde numunelere yapılan çekme deneyi sonuçları

Soğuk Hadde (Hadde yönüne paralel)	% 0.2 Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	% Uzama
75 A(yetersiz nüfuziyet)	-	-	-
80 A	135,6	186,1	6,5
85 A	132,5	209,8	12,2
90 A	132,2	167,5	2,1
95 A(malzemedede kopma)	-	-	-

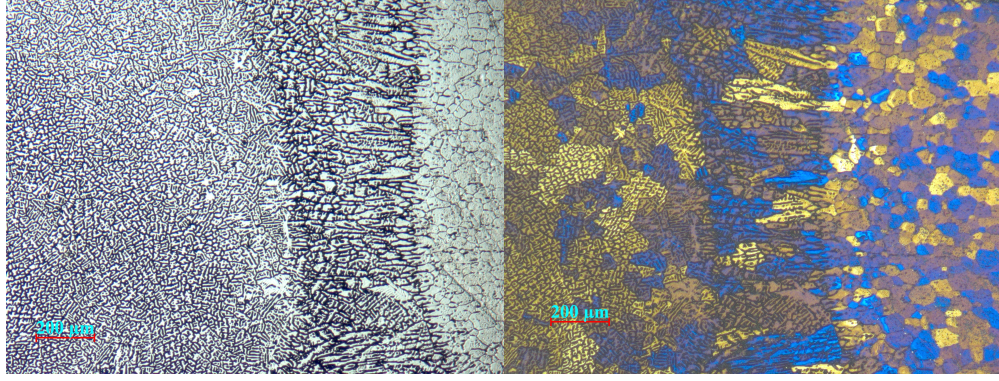
Yapılan çekme deneyleri sonucunda en uygun kaynak akım değeri 85 A olduğu görülmüştür. Akma mukavemetleri birbirine çok yakın çıkmasına rağmen yüzde uzama ve çekme mukavemetleri değerleri artan ve azalan akımla birlikte değişim göstermektedir.

6.4 Kaynak işlemi sonrası mikroyapıda gözlemlenen değişimler

Yapılan kaynak işlemi sonrasında soğuk hadde ve sıcak haddelenmiş ürünlerdeki mikroyapı değişimleri benzer özellik göstermektedir. Kaynak bölgesi genişliği artan akım değeri ile genişlerken ısıdan etkilenmeyen bölgelerin mikroyapı özellikleri aynı kalmıştır. ITAB bölgesi ise yaklaşık olarak 0.5 mm ile 1 mm genişliğindeki bir bölgede gözlemlenmektedir.



Şekil 6.4: Soğuk haddelenmiş Al 6016 alaşımına ait 85 A akımda kaynaklı numunenin 50X büyütmedeki mikroyapısı a) normal ışık b) polarize ışık



Şekil 6.5: Sıcak haddelenmiş Al 6016 alaşımına ait 68 A akımda kaynaklı numunenin 50X büyütmedeki mikroyapısı a) normal ışık b) polarize ışık

6.5 Kaynak işlemi sonrası kalıntı gerilme analizi

Kaynak işlemi öncesinde malzemelere kalıntı gerilme analizi yapılmıştır. Kalıntı gerilme değerlerinin bulunması için X-ışınları difraksiyonu yöntemi kullanılmış olup, 40 mA ve 40 kV değerlerinde çekimler gerçekleştirilmiştir. Yapılan çekimler sonucunda en uygun değerlerin bulunması amacıyla tüm numunelerde görülen $2\theta=99$ dereelik pik kullanılmıştır.

Yapılan analiz işlemleri sonucunda;

Sıcak haddelenmiş malzemelerdeki kalıntı değeri:

-162. 6 Mpa olarak bulunmuştur.

Soğuk haddelenmiş malzemelerde çıkan kalıntı değerleri ise:

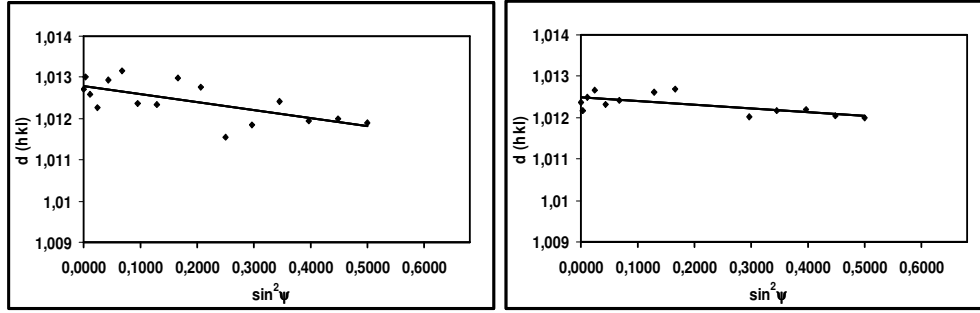
-120 Mpa olarak bulunmuştur.

Yapılan kaynak işlemleri sonrasında;

Sıcak haddelenmiş,

65 A değerindeki kaynaklı parçalarda

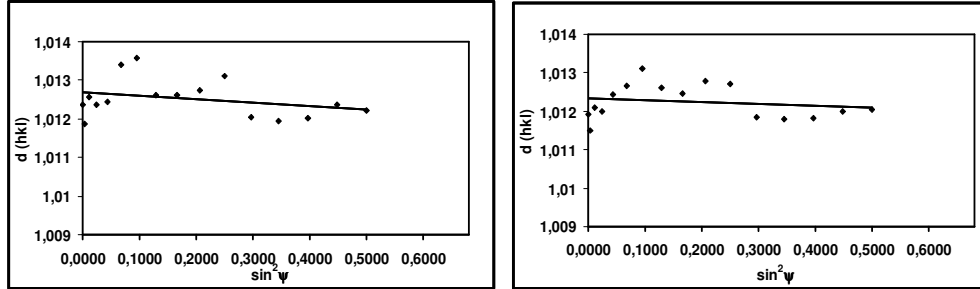
-110 MPa



Şekil 6.6: 65 A değerindeki kaynaklı parçalarda yapılan kalıntı gerilme analizi

68 A değerindeki kaynaklı parçalarda;

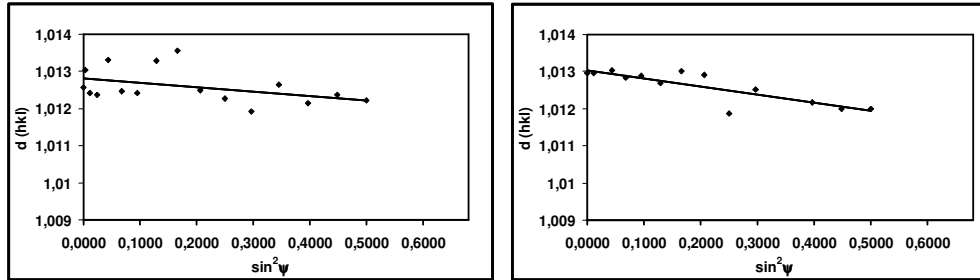
- 105 MPa



Şekil 6.7: 68 A değerindeki kaynaklı parçalarda yapılan kalıntı gerilme analizi

72 A değerindeki kaynaklı parçalarda;

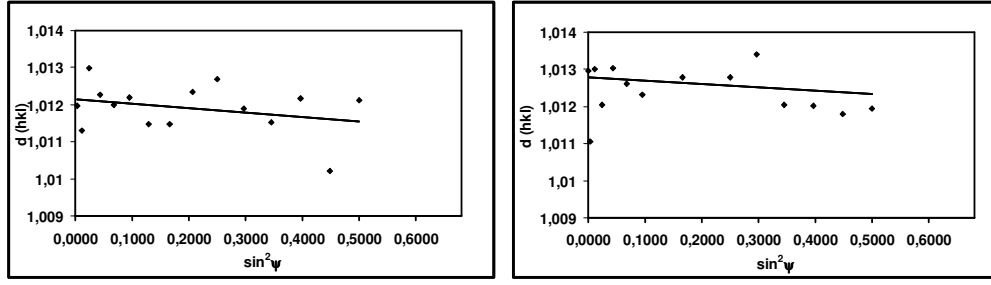
- 130 MPa



Şekil 6.8: 72 A değerindeki kaynaklı parçalarda yapılan kalıntı gerilme analizi

75 A değerindeki kaynaklı parçalarda;

- 180 MPa

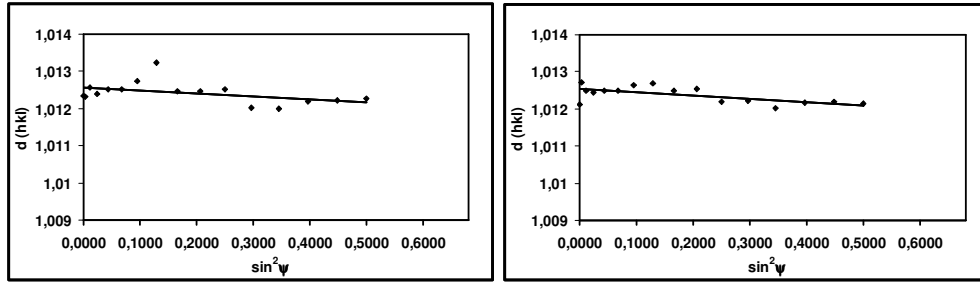


Şekil 6.9: 72 A değerindeki kaynaklı parçalarda yapılan kalıntı gerilme analizi

Soğuk haddelenmiş kaynaklarda:

80 A değerindeki kaynaklı parçalarda;

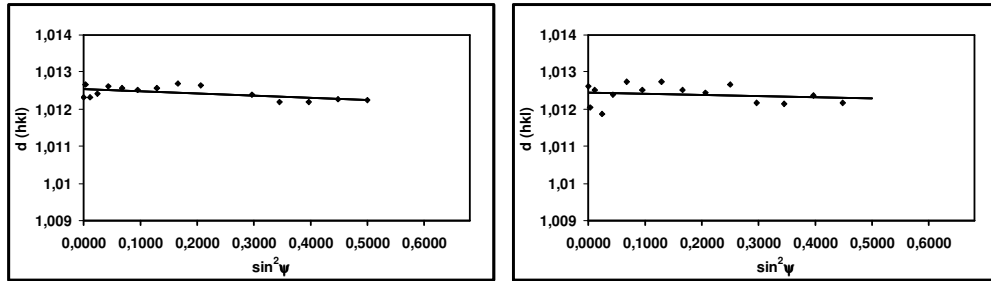
-52 Mpa



Şekil 6.10: 80 A değerindeki kaynaklı parçalarda yapılan kalıntı gerilme analizi

85 A değerindeki kaynaklı parçalarda;

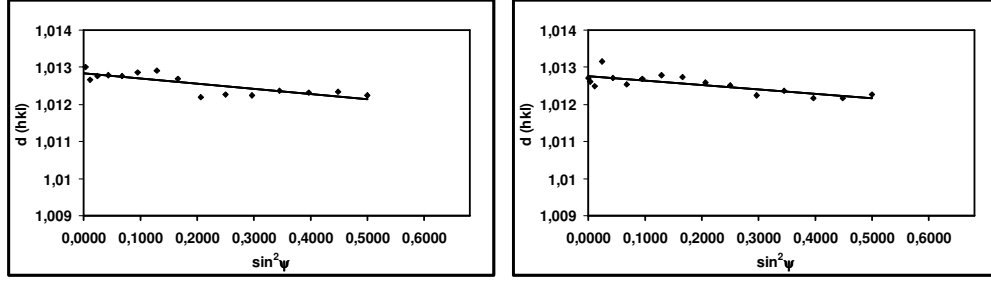
-70 MPa



Şekil 6.11: 80 A değerindeki kaynaklı parçalarda yapılan kalıntı gerilme analizi

90 A değerindeki kaynaklı parçalarda;

-72 MPa



Şekil 6.11: 80 A değerindeki kaynaklı parçalarda yapılan kalıntı gerilme analizi

KAYNAKLAR

- [1] **Mathers,G.**, 2002. The Welding of Aluminium and Its Alloys, Woodhead Publishing Limited, England.
- [2] **Davis, J.R.**, 1993. Aluminum and Aluminum Alloys, ASM Specialty Handbook.
- [3] **Weisman, C.**, 1976. Welding Handbook, Fundamentals of Welding, American Welding Society, Miami, Florida.
- [4] **Griffing, L.**, 1972. Welding Handbook, Section Four: Metals and Their Weldability, American Welding Society, Miami, Florida.
- [5] **Patterson, R. A. and Mahin, K.W.**, 1990. Weldability of Materials, ASM International, Materials Park, Ohio.
- [6] **Lancaster, J. F.**, 1993. Metallurgy of Welding, Chapman and Hall, New York.
- [7] **Jeffus, L.**, 1993. Welding Principles and Applications, Delmar Publishers Inc, England.
- [8] **Cullity, B.D.**, 1978. Elements of X-Ray Diffraction, Addison-Wesley Pub. Company, USA.
- [9] **Suryanarayana, C., and Norton, M. G.**, 1998. X-Ray Diffraction A Practical Approach, Plenum Press, New York.
- [10] **Noyan, I. C. and Kohen, J. B.**, 1987. Residual Stress: Measurement by Diffraction and Interpretation, Springer-Verlag New York Inc., Printed in Germany.
- [11] **Van Acker, K.**, 1996. Internal Stress State in Cold Worked Metals and in Metal Matrix Composites, PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven.
- [12] **Demirler, U.**, 2003. Fiziksel Buhar Biriktirme TiN CrN ve ZrN Kaplamalarda Proses Parametreleri ve Taban Malzemenin Kalıntı Gerilme Üzerine Etkisi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Fırat EŞİT 1981 yılında Kahramanmaraş'ta doğdu. 1999 yılında İzmir Atatürk Lisesi'ni bitirdikten sonra aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde lisans öğrenimine başladı. 2004 yılı Haziran ayı içerisinde Metalurji ve Malzeme Mühendisi olarak mezun olmuş ve aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme programında yüksek lisans öğrenimine başladı. Kasım 2005 tarihinden itibaren İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Malzeme Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.