

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

**ALÜMİNYUM ALAŞIMLI BORU-PLAKALARIN DIŞTAN
TAKIM YARDIMIYLA SÜRTÜNME KAYNAĞI
YAPILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRE KORKMAZ

DENİZLİ, HAZİRAN - 2017

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



**ALÜMİNYUM ALAŞIMLI BORU-PLAKALARIN DIŞTAN
TAKIM YARDIMIYLA SÜRTÜNME KAYNAĞI
YAPILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRE KORKMAZ

DENİZLİ, HAZİRAN - 2017

KABUL VE ONAY SAYFASI

Emre KORKMAZ tarafından hazırlanan "ALÜMİNYUM ALAŞIMLI BORU-PLAKALARIN DIŞTAN TAKIM YARDIMIYLA SÜRTÜNME KAYNAĞI YAPILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ" adlı tez çalışmasının savunma sınavı 09.06.2017 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

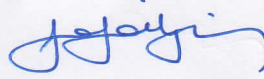
Danışman
Prof. Dr. Alper GÜLSÖZ



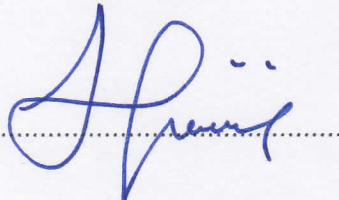
Üye
Prof. Dr. Cemal MERAN
Pamukkale Üniversitesi



Üye
Doç. Dr. Mehmet Burak BİLGİN
Amasya Üniversitesi



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
21/06/2017 tarih ve 24/17... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.



EMRE KORKMAZ

ÖZET

**ALÜMİNYUM ALAŞIMLI BORU-PLAKALARIN DIŞTAN TAKIM
YARDIMIYLA SÜRTÜNME KAYNAĞI YAPILABİLİRLİĞİNİN
İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
EMRE KORKMAZ
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DENİZLİ, HAZİRAN - 2017**

Alüminyum ve alaşımları kaynak kabiliyetlerinin iyi olmasının yanı sıra, yüksek mukavemet ve korozyon direncine sahip olmaları nedeniyle yapısal uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. En çok uygulanan kaynak yöntemleri TIG, MIG ve plazma kaynağı olmasına rağmen, kaynak esnasında oluşan yüksek sıcaklıklardan dolayı Isı Tesiri Altındaki Bölgede (ITAB'da) oluşan metalürjik çökelti yapıyı bozmakta ve mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebeplerden dolayı 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsü tarafından Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) yöntemi bulunmuş ve geliştirilmiştir. Ancak sürtünme karıştırma kaynağı eşanjör, ekonomizer ve kalorifer kazanları imalatı esnasında boruların plakalara kaynakları için kullanılamamaktadır. Bu eksikliği gidermek için oldukça yeni bir yöntem olan Dıştan Takım Yardımıyla Sürtünme Kaynağı (DTYSK) geliştirilmiş olup boruların plakalara kaynakları bu yöntemle yapılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada alüminyum alaşımı AA6063 borular, AA6082 plakalara DTYSK yöntemi ile başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. Öncelikle ön deneyler yapılarak optimum devir sayısı, baskı yükü ve sıcaklık parametreleri belirlenmiştir. Ardından plaka üzerine açılan kaynak ağzı, boru ile plaka arası boşluk ve boru çıkma yüksekliği parametreleri değiştirilerek tüm parametrelerin kesme dayanımı değerlerine, mikro sertlik değerlerine ve kaynak bölgesi içyapı oluşumlarına etkileri incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen bulgular değerlendirilerek çalışma tamamlanmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Sürtünme kaynağı, alüminyum kaynağı, DTYSK, boru-plaka kaynağı

ABSTRACT

EXAMINATION OF THE FRICTION WELDING OF ALUMINUM ALLOY TUBE-PLATES USING AN EXTERNAL TOOL

MSC THESIS

EMRE KORKMAZ

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

DENİZLİ, JUNE 2017

Aluminum and its alloys are frequently used in structural applications due to their good welding ability as well as their high strength and corrosion resistance. Although the most common welding methods for aluminum are TIG, MIG and plasma welding, due to the high temperatures during welding, the metallurgical precipitates formed in the Heat Affected Zone (HAZ) disrupt the interior and affect the mechanical properties negatively. For these reasons, the friction stir welding method was found out and developed by the British welding institute in 1991. However, friction stir welding can not be used for tube to tube plate welds at the manufacture of heat exchangers, economizers and boilers. Friction welding of tube to tube plate using an external tool (FWTPET) which is a fairly new method has been developed to overcome this shortcoming and tube to tube plate welds have started to be made with this method.

In this study, aluminum alloy AA6063 pipes were successfully joined with AA6082 plate by FWTPET method. First, preliminary experiments were carried out to determine the optimum number of cycles, pressure load and temperature parameters. Then, by changing the weld mouth on the plate, the gap between the tube and the plate, and the tube projection parameters, the effects of all parameters on shear strength values, micro hardness values and the formation of internal structure of the weld zone were investigated. The study was completed by evaluating the findings obtained as a result of the experiments.

KEYWORDS: Friction welding, aluminum welding, FWTPET, Tube to tube plate welding

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
2. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	8
2.1 Alüminyumun Tarihsel Gelişimi	8
2.2 Alüminyumun Genel Özellikleri ve Kullanım Alanları	9
2.3 Alüminyum Alaşımının Sınıflandırılması	12
2.4 Alüminyum Alaşımına Uygulanan Isıl İşlemler	15
2.4.1 Isıl İşlem Uygulanamayan Alüminyum Alaşımları	17
2.4.1.1 1xxx Alaşımları	17
2.4.1.2 3xxx Alaşımları	18
2.4.1.3 4xxx Alaşımları	18
2.4.1.4 5xxx Alaşımları	19
2.4.2 Isıl İşlem Uygulanabilen Alüminyum Alaşımları	19
2.4.2.1 2xxx Alaşımları	19
2.4.2.2 6xxx Alaşımları	20
2.4.2.3 7xxx Alaşımları	21
3. METALLERE UYGULANAN KAYNAK YÖNTEMLERİ	22
3.1 Sürtünme Kaynağı	22
3.1.1 Sürtünme Kaynak Çeşitleri	24
3.1.1.1 Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı	24
3.1.1.2 Volan Kaynaklı Sürtünme Kaynağı	25
3.1.1.3 Kombine Kaynak Yöntemi	26
3.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağı	26
3.3 Dıştan Takım Yardımıyla Sürtünme Kaynağı	29
4. MATERYAL VE YÖNTEM	31
4.1 Deneylerde Kullanılan Numunelerin Malzemeleri ve Boyutları	31
4.2 Çalışma Öncesi Planlama	32
4.3 Deney Düzenegi	34
4.4 Ön Deneyler	40
4.4.1 Takım Devir Sayısı ve Sıcaklığın DTYSK Yöntemine Etkisi	42
4.4.2 Takımın Boru Üzerine Yaptığı Baskı Kuvvetinin DTYSK Yöntemine Etkisi	42
4.4.3 Boru Sabitleme Deliği Açılarak Borunun Merkezlenmesinin DTYSK Yöntemine Etkisi	47
4.4.4 Plaka Üzerine Açılan Kaynak Ağzının DTYSK Yöntemine Etkisi	49
4.4.5 Borunun Plakadan Çıkma Yüksekliği ve Plaka İle Boru Arası Bırakılan Boşluğun DTYSK Yöntemine Etkisi	52
4.5 Asıl Deneyler	55

4.5.1	Numune Hazırlama	57
4.5.2	Hazırlanan Numunelerin DTYSK Yöntemiyle Kaynaklanması..	58
4.5.3	Kesme Deneyi Sonuçları	60
4.5.4	İçyapı Analizleri	63
4.5.4.1	Makro Dağlama Analizleri.....	63
4.5.4.2	Mikro Dağlama Analizleri	65
4.5.5	Mikro Sertlik Ölçümleri.....	69
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	70
6.	KAYNAKLAR.....	73
7.	ÖZGEÇMİŞ	77

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Alüminyum değer zinciri	8
Şekil 2.2: (a) BAC 146 tipi uçak, (b) Gövdesi 5mm kalınlığında AA5083 alaşımından yapılmış gemi, (c) Al-Zn-Mg alaşımı kullanılan zırhlı savaş aracı	9
Şekil 2.3: (a) Reynolds marka lxxx serisi ticari alüminyum alaşımından yapılmış alüminyum folyo, (b) 1350 serisi alüminyum elektrik bara tesisatı	17
Şekil 2.4: 3003 alaşımı kullanılan ısı eşanjörü	18
Şekil 2.5: (a) Yüksek hızlı tekne gövdesi 5083 veya 5383-H113/H321, (b) Tekne iç gövde sertleştiricileri, zemin kaplaması ve üst bölgeler	19
Şekil 2.6: Uzay mekiği yakıt tanklarında kullanılan 2xxx serisi alüminyum alaşımları	20
Şekil 2.7: Geniş arena çatılarında destek amacıyla kullanılmış AA6061 veya AA6063 alaşımlı alüminyum borular	20
Şekil 2.8: Uzay mekiği parçalarında kullanılan AA7050 veya AA7175-T74 alüminyum alaşımları	21
Şekil 3.1: Metallere uygulanan kaynak yöntemleri	22
Şekil 3.2: Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı	24
Şekil 3.3: Volan tahrikli sürtünme kaynağı	25
Şekil 3.4: Sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi	26
Şekil 3.5: (a) SKK takım; (b) SKK düzeneği	27
Şekil 3.6: Alüminyum alaşımlarının SKK’da kaynak bölgelerinin şematik gösterimi	27
Şekil 3.7: Alüminyum alaşımlarının SKK’da kaynak bölgelerinin mikroskopik içyapı gösterimi	28
Şekil 3.8: SKK’da pim etrafında oluşan plastik akışın şematik gösterimi	28
Şekil 3.9: DTYSK mekanizması ve kaynak esnasındaki metal akışı	30
Şekil 4.1: (a) Kaynak yapılacak boru, (b) Kaynak yapılacak plaka	32
Şekil 4.2: Deney iş akış şeması	33
Şekil 4.3: Deney düzeneği	34
Şekil 4.4: DTYSK esnasında kullanılan takım	35
Şekil 4.5: DTYSK esnasında kullanılan dik başlı freze tezgahı ve hidrolik sistem	36
Şekil 4.6: Hidrolik takım yükleme sisteminin (a) Şematik gösterimi, (b) Üç boyutlu görüntüsü	37
Şekil 4.7: Ön deneyler esnasında kullanılan numune tutturma aparatı	38
Şekil 4.8: Asıl deneyler esnasında kullanılan tutturma aparatı ve numunelerin bağlanmış şekli	38
Şekil 4.9: Kesme deneyi için (a,b) Numune tutturma aparatı, (c) Numunenin bağlı hali	39
Şekil 4.10: Boru ile plakanın kaynak öncesi durumu ve boyutları	41
Şekil 4.11: (a) Kaynak esnasında çatlak oluşan numune, (b) Kaynak esnasında çatlak oluşmamış numune görünümü	42
Şekil 4.12: Kaynak esnasında yeterli hamurlaşma olmamış numune	43

Şekil 4.13: DTYSK yapılmış alüminyum numune	45
Şekil 4.14: Ön deneyler için hazırlanan tüm alüminyum deney numuneleri	45
Şekil 4.15: (a) Kesme deneyi yapılan alüminyum numune, (b) Kesme deneyi sonrasında kopmuş numune görüntüsü.....	46
Şekil 4.16: Ön deneyler sırasında kaynaklanmış numunelerin makro dağlama görüntüleri.....	47
Şekil 4.17: DTYSK sırasında kaynaklanan borunun takım tutturma aparatına temas eden yüzeyindeki deformasyon	48
Şekil 4.18: Boru sabitleme deliği açılarak kaynak yapılmış numune	48
Şekil 4.19: Numune üstünde ergiyen metalin dışarıya doğru süpürülmüş kısmının görüntüsü	49
Şekil 4.20: Plaka üzerine kaynak ağzı açılmış numune	49
Şekil 4.21: DTYSK yönteminde kullanılan plakanın; (a) Kaynak ağzı açılmış hali, (b) Kesit resmi, (c) Teknik resmi	50
Şekil 4.22: Kaynak ağzı açılarak kaynağı yapılmış numune	51
Şekil 4.23: Kaynak ağzı açılarak kaynak yapılmış numunenin kesit görünümü.....	52
Şekil 4.24: 3 mm çıkma yüksekliğine sahip numunenin görünümü	53
Şekil 4.25: DTYSK yönteminde kullanılan boru numunesi ölçüleri	54
Şekil 4.26: Plaka üzerine açılan delik çapının 22 mm olduğu kaynaklı numunenin kesit görüntüsü	55
Şekil 4.27: Plaka üzerine açılan delik çapının 23 mm olduğu kaynaklı numunenin kesit görüntüsü	55
Şekil 4.28: DTYSK yönteminde kullanılan kaynak ağzı açılmış plakanın teknik resmi	58
Şekil 4.29: Kaynak ağzı açılarak kaynaklanmış numunelerin, (a) Üst görünüşü, (b) Alt görünüşü	59
Şekil 4.30: Sabitleme deliği ve kaynak ağzı açılan (A) ve sabitleme deliği ve kaynak ağzı açılmayan (B) numunelerdeki plaka-boru arası açıklık farkı	61
Şekil 4.31: N22-21 numaralı numunenin baskı kuvvetinin kaynak esnasındaki değişimi	62
Şekil 4.32: N 22-20 numaralı numunenin baskı kuvvetinin kaynak esnasındaki değişimi	63
Şekil 4.33: 21 mm çaplı plakada kaynak ağzının makro dağlanmış durumları	64
Şekil 4.34: 20 mm çaplı plakada kaynak ağzının makro dağlanmış durumları	65
Şekil 4.35: Değişik büyütme oranlarında içyapı görüntüleri alınan bölgenin tayini.....	66
Şekil 4.36: Kaynak ağzı açılmış numunenin 1 numara ile gösterilen bölgesinin 50x büyütme oranındaki içyapı görüntüsü	67
Şekil 4.37: 1 numaralı bölgenin 100x büyütme oranındaki içyapı görüntüsü ..	67
Şekil 4.38: 1 numaralı bölgenin 500x büyütme oranındaki içyapı görüntüsü ..	68
Şekil 4.39: 1 numaralı bölgenin (200x büyütme) tane büyüklükleri	68
Şekil 4.40: Mikro sertlik ölçümleri	69

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Alüminyum saflık değerleri.....	10
Tablo 2.2: Alüminyumun saflık derecelerine göre fiziksel özellikleri	10
Tablo 2.3: Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kısa gösterimleri	14
Tablo 2.4: Alüminyum alaşımlarının temper şekilleri (TS EN 755-2:2010)....	16
Tablo 4.1: Plaka malzemesi olarak kullanılan EN AW-6082-T6'nın kimyasal bileşimi (%).....	31
Tablo 4.2: Boru malzemesi olarak kullanılan EN AW-6063-T5'in kimyasal bileşimi (%).....	31
Tablo 4.3: EN AW-6063 (EN AW AlMg0,7Si) ve EN AW-6082 (EN AW AlSi1MgMn) alüminyum alaşımlarının farklı temper işlemlerindeki mekanik özellikleri – TS EN 755-2:2010.....	31
Tablo 4.4: X210Cr12 Soğuk iş takım çeliğinin kimyasal bileşimi (%).....	35
Tablo 4.5: Baskı kuvvetinin kesme dayanımına etkisi.....	43
Tablo 4.6: DTYSK ön deney parametreleri ve sonuçları.....	44
Tablo 4.7: Kaynak ağzı açılarak ve açılmadan kaynağı gerçekleştirilen numunelerin kesme dayanımı sonuçları	51
Tablo 4.8: DTYSK asıl deney parametreleri.....	57
Tablo 4.9: DTYSK yönteminde kullanılan kaynak ağzı ölçüleri.....	58
Tablo 4.10: Asıl deneylerin sonuçları	60

ÖNSÖZ

Çalışmamın tüm aşamalarında katkı ve yönlendirmeleri ile beni destekleyen, bilgi birikimlerini benden hiç esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Alper GÜLSÖZ hocama teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, çalışmamın olgunlaşmasında engin bilgi ve deneyimleri ile önemli bilimsel katkılarda bulunan Prof. Dr. Cemal MERAN hocama teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında yardımları ile araştırmalarıma katkılar sağlayan Araş. Gör. Mustafa Alper SARIİPEK'e ve Araş. Gör. Dr. Recep YURTSEVEN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, tüm hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen ailem ile eşim Merve Bergin KORKMAZ ve sevgili kızımız Arya Beren KORKMAZ'a minnettarlığımı belirtmek isterim.

1. GİRİŞ

Alüminyum ve alaşımları düşük yoğunluk, yüksek şekillendirilebilme kabiliyetleri ve yüksek mukavemet gibi özelliklerinin yanı sıra üzerinde oluşan doğal oksit tabakası sayesinde korozyon dirençlerinin yüksek olması nedeniyle başta taşımacılık sektörü olmak üzere birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Alüminyumun taşımacılık sektöründe çokça kullanılmasının nedeni hiç şüphesiz hafifliğinin getirdiği düşük enerji tüketimidir. Alüminyumun metaller arasında kullanım oranı çelikten sonra ikinci sırada gelmektedir. Alüminyum ve alaşımlarının kaynak kabiliyetleri oldukça iyidir. Kaynak yöntemleri ergitme kaynağı ve basınç kaynağı olarak iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Ergitme kaynağı yöntemleri arasında en sık kullanılan yöntemler TIG, MIG ve plazma kaynağı olmasına rağmen, kaynak esnasında oluşan yüksek sıcaklıklardan dolayı Isı Tesiri Altındaki Bölgede (ITAB'da) oluşan metalürjik çökelti yapıyı bozmakta ve mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemektedir. Sıcaklıklar kaynak edilen metalin ergime sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıktadır. Alüminyumun ergitme kaynak yöntemlerinde gözenek, çatlak gibi kaynak hatalarına rastlanmaktadır. Ayrıca alüminyum, çeliğin kaynağında olduğu gibi kaynak esnasında renk değiştirmedeği için ergitme kaynak yöntemi ile kaynağı zordur ve eğitimli personele ihtiyaç duyulmaktadır.

Basınç kaynaklarında ise ergimeye gerek kalmadan daha düşük sıcaklıklarda kaynak işlemi tamamlanabilmektedir. Belli basınç altında malzemelerin birbirleri ile birleşmesi suretiyle yapılan bir kaynak yöntemi olduğu için dolgu metaline de gerek duyulmamaktadır. Bu yüzden basınç kaynakları alüminyum ve alaşımlarının kaynaklarında avantajlı olmaktadır.

Dıştan Takım Yardımıyla Sürtünme Kaynağı (DTYSK) yöntemi 2006 yılında Kumaran ve diğ. tarafından geliştirilen, 2008 yılında patentlenen bir kaynak yöntemidir. DTYSK yöntemi basınç kaynağı yöntemleri içerisinde bulunan sürtünme karıştırma kaynağı ve sürtünme kaynağı yöntemlerinin karışımı bir yöntemdir. Bu yöntemde sürtünme karıştırma kaynağına benzer bir şekilde omuz ve pimden oluşan bir takım farklı baskı kuvvetleri ve devirlerde boru üzerine temas etmekte ve boru üzerinde sürtünme kaynaklı yumuşama sağlamaktadır. Sürtünme karıştırma

kaynağından farklı olarak pin karıştırma işi yapmamaktadır. Ayrıca takım ya da iş parçasına ilerleme hareketi verilmemektedir. Sürtünme kaynağından farklı olarak ise iş parçası dönmekte ve sabit tutulmaktadır. Bu yöntem farklı boru ve plaka malzemelerinin birleştirilmesine olanak sağlamaktadır. En büyük dezavantajı ise sadece küçük boyutlu iş parçalarının birleştirilebilmesidir (Kumaran ve diğ. 2010), (Meran ve diğ. 2015).

Eşanjör, ekonomizer ve kalorifer kazanları imalatı esnasında boruların plakalara kaynakları oldukça zaman almakta ve maliyetlidir. Bu çalışmada ergitme kaynak yöntemleri yerine alüminyum alaşımlarından üretilen boruların ve plakaların DTYSK yöntemi uygulanarak birleştirilmesinin geliştirilmesi ve geleneksel kaynak yöntemleriyle gerçekleştirilen boru-plaka birleştirmelerinde ortaya çıkan kaynak sürelerinin ve maliyetin azaltılması amaçlanmaktadır. Çalışmada baskı kuvvetinin kontrol altına alınması amacıyla yeni bir düzenek imal edilerek devir sayısı, malzeme cinsi, boru et kalınlığı gibi faktörlerin boru-plaka bağlantılarının sürtünme kaynağı yapılabilirliği üzerine etkileri tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemleri ile tespit edilip sonuçlar analiz edilerek en uygun kaynak parametreleri oluşturulmaya çalışılmıştır. Çalışma sonuçlarının eşanjörlerde daha yaygın olarak kullanılan çelik malzemelere de uygulanması için ileride yapılacak çalışmalara yol göstereceği öngörülmektedir.

1.1 Literatür Özeti

Meran ve diğ. (2015), çalışmalarında yeni bir sürtünme kaynağı yöntemi olan ve yukarıda kısaca açıklanan DTYSK yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada AlMgSi0,5 (EN AW 6060) alüminyum alaşımı boru ve plaka DTYSK yöntemi ile kaynaklanmıştır. Plaka boyutları 4x50x70 mm olarak kesilmiş ve tam ortalarına Ø21 mm delik açılmıştır. Boru numuneleri 20 mm çapında ve 2 mm et kalınlığındaki borudan 40 mm, 41 mm ve 42 mm uzunluğunda kesilerek hazırlanmıştır. Deneyler esnasında 900 min⁻¹, 1180 min⁻¹ ve 1500 min⁻¹ olmak üzere 3 farklı devir sayısında kaynak yapılmış ve baskı yükü sabit tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek çekme dayanımı değeri 275 MPa ile 1500 min⁻¹ ve 40 mm uzunluğunda boru kullanıldığı durumda elde edilmiştir.

Kumaran ve diğ. (2011^a), yaptıkları deneysel çalışmada 6x50x70 mm ölçülerinde numuneler kesilerek kullanılmıştır. Çalışmanın teorik kısmında ANN (Artificial Neural Network) yöntemi kullanılarak DTYSK işleminin mukavemet değerleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Giriş ve çıkış parametreleri GA (Genetik Algoritma) yöntemi ile optimize edilmiştir. Ayrıca işlem parametrelerinin belirlenmesi amacıyla istatistiksel yöntem olan ANOVA metodu kullanılmıştır. BPNN (Backpropagation neural network) ve GA yöntemleri kullanılarak takım dönme hızına, pim açıklığına ve omuz çapına bağlı olarak değişen gerilme değerleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Giriş parametreleri ve ANN yönteminden çıkan sonuç parametreleri GA yöntemi ile optimize edilmiştir. Bu optimize edilmiş sonuçlar deneysel değerler ile karşılaştırılmıştır. Deneysel veriler ile teorik veriler arasında çok küçük farklar tespit edilmiştir. İstatistiksel teknik olan ANOVA metodunda ise işlem parametrelerinin sonuçlara etkisinin yüzdelik olarak bulunması için çalışılmıştır. Metoda göre devir sayısı %57,95 ile en büyük etkiyi göstermektedir. Daha sonra sırasıyla omuz çapı %36,33' lük ve pim açıklığı %3,99' lük bir etki göstermektedir.

Kumaran ve diğ. (2011^b), çalışmalarında DTYSK yönteminin optimizasyonu için Taguchi metodu ve Genetik Algoritma yöntemlerini kullanmışlardır. Deneyler sırasında 6x50x70 mm ölçülerinde numuneler kesilerek kullanılmıştır. İşlem parametreleri olarak takım devir sayısı 1030 min⁻¹, pim açıklığı 1 mm ve omuz çapı 30 mm olarak seçilmiştir. Deneyler sırasında devir sayısının 500 min⁻¹ seçildiği durumda yeterli ısı girdisi oluşmamış ve büyük çatlaklar meydana gelmiştir. Devir sayısını 1500 min⁻¹ seçtiklerinde ise aşırı plastik deformasyon sonucu iyi bir bağlantı sağlanamamıştır. Makro yapı analizleri için Tucker's çözültisi (4,5 ml HNO₃, 2,5 ml H₂O, 1,5 ml HCl, 1,5 ml HF) kullanılmıştır. Mikro yapı analizleri için ise Keller çözültisi (2ml HF, 3ml HCl, 5ml HNO₃, 190 ml saf su) hazırlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda takım devir sayısı 1030 min⁻¹, pim açıklığı 1 mm ve omuz çapı 30 mm için maksimum çekme dayanımı değeri 64,53 MPa olarak bulunmuştur.

Kumaran ve diğ. (2012), DTYSK yöntemi ile geleneksel kaynak yöntemlerinden biri olan TIG kaynağı yöntemini çevreye olan etkileri bakımından karşılaştırmışlardır. Deneysel çalışmalar için 6x50x70 mm ölçülerinde numuneler keserek kullanmışlardır. Kullanılacak boru numuneleri ise 19 mm çapında kesilmiştir. Mikroyapı analizleri için Keller çözültisi (2ml HF, 3ml HCl, 5ml HNO₃, 190 ml saf su) hazırlanmıştır. Kaynaklanan numunelerden ve ana metalden kesilen parçalar

korozyon dirençlerini karşılaştırmak amacıyla test solüsyonları içerisine atılmıştır. Ayrıca mukavemet değerlerini karşılaştırmak amacıyla çekme deneyine tabi tutmuşlardır. Sonuç olarak DTYSK yönteminin TIG kaynak yöntemine göre daha çevreci olduğu sonucuna varılmıştır.

Balaji ve diğ. (2011), çalışmalarında DTYSK yöntemini takım dönme sayısı, çıkma yüksekliği ve batma derinliği olarak 3 farklı parametrede incelemiştir. Bu parametreleri değerlendirirken Taguchi metodundan yararlanılmıştır. Analizler için ise ANOVA metodunu kullanılmıştır. Deneyler sırasında 6x50x70 mm ölçülerinde numuneler kesilerek kullanılmıştır. 19 mm çapındaki boru numuneleri ise etrafında 2 mm çapında delikler delinerek hazırlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda takım devir sayısını 710 min^{-1} , çıkma yüksekliğini 3 mm ve batma derinliğini 1,5 mm olarak kabul etmişlerdir. ANOVA yöntemi sonucunda işlem parametrelerinin kaynağa olan etkilerini takım devir sayısı için %46,98, batma derinliği için %30,71 ve çıkma yüksekliği için %22,29 olarak hesaplanmıştır.

Kumaran ve diğ. (2013^a), DTYSK kaynak yönteminde kullanılan ticari saflıktaki alüminyum borular üzerine çapları 2 mm, 3 mm ve uzunlukları 3 x 6 mm dikey, 3 x 6 mm yatay ve 3 x 6 mm bir tarafı açık olacak şekilde 5 farklı şekilde delik açmışlardır. Çatlakların görülebilmesi için penetrant sıvı testi yapılmıştır. Sonuçta 2 mm ve 3 mm çaplı deliklerle hazırlanan numunelerde çatlığa rastlanmazken, diğer şartlarda hazırlanan numunelerde çatlaklara rastlanmıştır. Ayrıca 2 mm çapındaki delikle yapılan numunelerin çekme dayanımı ve sertlik değerlerinin diğer numunelere göre daha fazla olduğu bulunmuştur.

Kumaran ve diğ. (2013^b), çalışmalarında DTYSK yönteminde kullanılan 4 farklı boru çapına sahip olan numunelerin çekme dayanımı ve sertlik değerlerini karşılaştırmışlardır. Deneyde kullanılan boru iç çapları sırasıyla 15,5 mm, 14 mm, 10,5 mm ve 7,5 mm boru dış çapları sırasıyla 19 mm, 16 mm, 11,61 mm ve 9.15 mm seçilmiştir. Makro yapı analizleri için Tucker's çözeltisi (4,5 ml HNO₃, 2,5 ml H₂O, 1,5 ml HCl, 1,5 ml HF) kullanılmıştır. Mikro yapı analizleri için ise Keller çözeltisi (2ml HF, 3ml HCl, 5ml HNO₃, 190 ml saf su) hazırlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda kaynak arayüzü bölgesinden yapılan ölçümler sonucunda Vickers sertlik değeri 3 no'lu (boru iç çapı 10,5 ve boru dış çapı 11,61 mm) numunede 76,88 HV olarak en yüksek çıkmıştır. Çekme dayanımı değerlerinde de yine 3 no'lu numune

99,24 MPa ile en yüksek dayanıma sahip çıkmıştır. Sonuç olarak bu çalışmada boru iç çap değeri 7,5 mm'den daha yüksek olan değerlerde kaynak bağlantısında bir sıkıntı olmazken, iç çap 7,5 mm'nin altına indiğinde kaynak hatalarına rastlanmıştır. Ayrıca çapı 7,5 mm'nin altında olan numunelerde çekme dayanımı değerinin de düştüğü gözlemlenmiştir. Çalışma, sanayi uygulamalarında mühendislere yüksek kaliteli kaynak elde etmeleri için fikir sunmaktadır.

Muthukumaran ve diğ. (2011), çalışmalarında DTYSK yöntemini bakır plaka ile alüminyum borunun kaynaklı bağlantısını yapmak amacıyla kullanmışlardır. Deneyler esnasında takım devir sayısını 1500 min^{-1} ve 1030 min^{-1} , pim çapını 15,8 mm, 15,6 mm ve 15,4 mm, pim ve boru arası açıklığını ise 0,8 mm, 0,6 mm, 0,4 mm olarak seçerek analiz yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek mukavemet değeri takım devir sayısı 1500 min^{-1} , pim çapı 15,8 mm ve boşluk değerinin 0,8 mm olduğu durumda 148 MPa olarak ölçülmüştür.

Balaji ve diğ. (2012), çalışmalarında DTYSK yöntemi ile alüminyum boruları alüminyum plakalara kaynak yaparken ergiyen metal hacmini artırmak amacıyla dolgu plakası kullanmışlardır. Dolgu plakası kullanmadan 6 mm kalınlıkta plaka ile 19 mm çapında ticari saflıktaki alüminyum boru kullanarak yapılan kaynakta, ergiyen metal hacmini $354\text{-}1582 \text{ mm}^3$ olarak hesaplamışlardır. Dolgu plakası kullanılan durumda ise ergiyen metal hacmi $1625\text{-}2851 \text{ mm}^3$ olarak hesaplanmıştır. İşlem parametreleri olarak takım devir sayısı, batma derinliği ve boru çıkma yüksekliği seçilmiştir. Çalışmada Taguchi ve ANOVA metotlarından yararlanılmıştır. Çekme dayanımı değerlerine göre karşılaştırma yapılmıştır. Devir sayısı 710 min^{-1} , 1120 min^{-1} , 1400 min^{-1} , batma derinliği, 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm ve çıkma yüksekliği 1 mm, 2 mm, 3 mm olarak seçilmiştir. En yüksek mukavemet değerine 710 min^{-1} devirde, 2 mm çıkma yüksekliğinde ve 1,5 mm batma derinliğinde 76,02 MPa olarak ulaşılmıştır.

Kumar ve diğ. (2011), DTYSK yöntemi ile çelik boruların, alüminyum plakalara kaynaklı bağlantı yapılabilirliği üzerine çalışmışlardır. Çalışma Taguchi L_9 ortogonal dizini metodu ile modellendirilmiştir. Deneysel ve tahmini verilerin karşılaştırılması amacıyla GA yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca işlem parametrelerinin yüzdelik katkılarının bulunması için istatistiksel metot olan ANOVA metodunu da kullanmışlardır. Deneyler sırasında $6 \times 50 \times 70 \text{ mm}$ ölçülerinde numuneler kesilerek kullanılmıştır. Çelik numuneler ise dış çapı 19 mm, iç çapı 15 mm olan SA106 Grade

B çelik borudan her bir numune uzunluğu 40 mm olacak şekilde kesilerek kullanılmıştır. İşlem parametreleri olarak devir sayısı (710 min^{-1} , 1120 min^{-1} , 1400 min^{-1}), takım omuz genişliği (24 mm, 26 mm, 28 mm) ve pim çapı (12 mm, 13 mm, 14 mm) seçilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen çekme deneyleri verileri incelendiğinde devir sayısı 1120 min^{-1} , 28 mm omuz çapı ve pim açıklığının 1 mm (pim çapı 28 mm olan) olduğu parametrelerde $64,96 \text{ MPa}$ ile en yüksek çekme dayanımı bulunmuştur. ANOVA yöntemi ile omuz çapı parametresinin yüzdelik katkı oranı %47,40 ile en yüksek değerde çıkmıştır.

Muthukumaran ve diğ. (2012), çalışmalarında DTYSK yöntemi kullanarak çelik boruları alüminyum plakalara kaynaklı bağlantı yapmışlardır. Mekanik ve metalürjik testler yapılarak sonuçlar analiz edilmiştir. Deneyler sırasında $6 \times 50 \times 70 \text{ mm}$ ölçülerinde ticari saflıktaki alüminyum plakalar kesilerek kullanılmıştır. Çelik numuneler ise dış çapı 19 mm olan SA106 Grade B çelik borudan her bir numune uzunluğu 40 mm olacak şekilde kesilerek kullanılmıştır. Borular 2 mm çıkma yüksekliği olacak şekilde ve çıkma yüksekliği olmadan kaynaklanarak karşılaştırılmıştır. İşlem parametreleri Taguchi metodu kullanılarak 1400 min^{-1} takım devir sayısı, 1 mm pim açıklığı ve 28 mm omuz genişliği olarak seçilmiştir. Boru çıkma yüksekliği olmadan yapılan deneyler sonucunda çekme mukavemet değeri $67,93 \text{ MPa}$ çıkmıştır. Boru çıkma yüksekliği olan deneyler sonucunda elde edilen çekme mukavemet değeri ise $70,45 \text{ MPa}$ 'dır. Çıkma yüksekliği olan numunelerden ölçülen sertlik değerleri ($98,6 \text{ HV}$), çıkma yüksekliği olmadan yapılan deneyler sonucunda çıkan sertlik değerine ($55,6 \text{ HV}$) göre oldukça yüksektir. Sonuç olarak çıkma yüksekliği olan numuneler ile yapılan kaynak işlemleri çıkma yüksekliği olmaksızın yapılan kaynak işlemine göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

Kumaran ve diğ. (2014), çalışmalarında DTYSK yönteminde boruların plakalara kaynaklı bağlantısında çıkma yüksekliği etkisini incelemişlerdir. Bu inceleme için altı farklı çıkma yüksekliği değeri kullanmışlardır. Deneyler sırasında 6 mm kalınlığında ticari saflıktaki alüminyum plakadan $50 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ ölçülerinde numuneler kesilerek kullanılmıştır. İşlem parametreleri olarak takım devir sayısı 1030 min^{-1} , pim açıklığı 1 mm, ilerleme oranı $0,2 \text{ mm/min}$ ve omuz çapı 30 mm olarak seçilmiştir. Ayrıca kaynaklar çıkma yüksekliği -1 mm, 0 mm, 1 mm, 2 mm, 3mm ve 4 mm olmak üzere altı farklı değer kullanarak yapılmıştır. Sonuç olarak 1 mm çıkma

yüksekliği olan numunelerde 84,72 MPa çekme dayanımı ve 70,58 HV sertlik değeri ile en yüksek değerlere ulaşılmıştır.

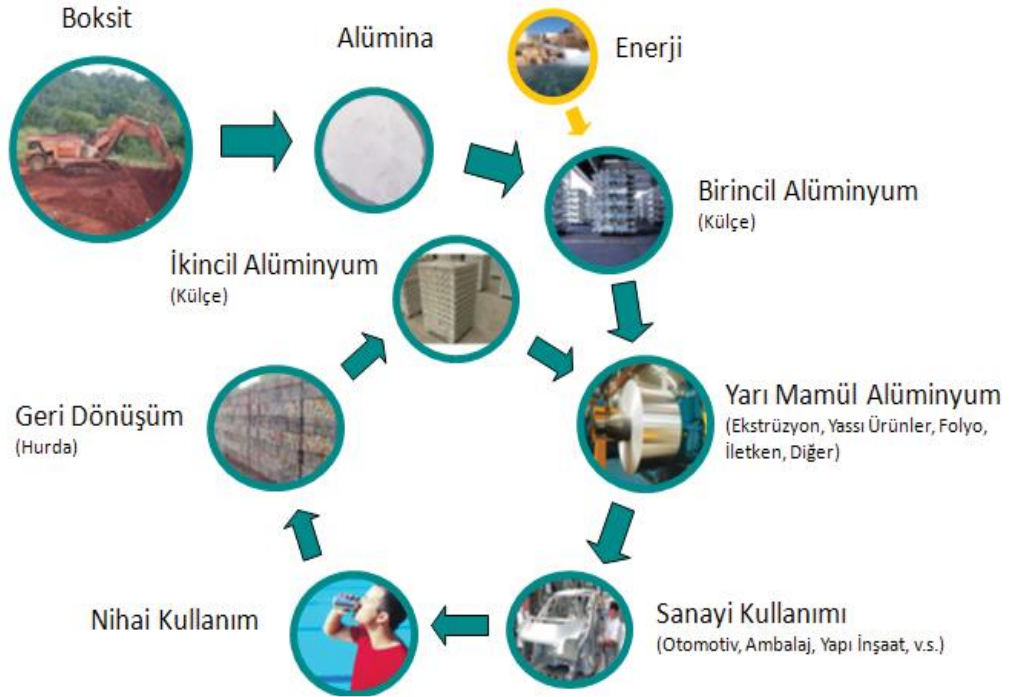
Bilgin ve diğ. (2015), ferritik paslanmaz çelik malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı yapılabirliği üzerine çalışmışlardır. Deneyler esnasında 3 mm x 100 mm x 200 mm boyutlarında X6Cr17(AISI 430) ferritik paslanmaz çelik malzeme kullanmışlardır. İlerleme hızı, takım baskı kuvveti, takım devir sayısı, takım pim açısı parametrelerini optimize edebilmek için Genetik Algoritma yöntemini kullanmışlardır. En yüksek çekme dayanım değeri 476 MPa olarak 1120 min⁻¹ devir sayısı, 125 min⁻¹ ilerleme hızı, 4,5 kN baskı kuvveti ve 0° takım açısı parametrelerinde ulaşmışlardır.

Literatür çalışmalarında DTYSK yönteminin parametrelerinden olan baskı yükü ve sıcaklık parametrelerinin çalışılmadığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde plaka üzerine açılacak kaynak ağzının dayanım değerlerine etkisi de incelenmemiştir. Literatür çalışmalarından farklı olarak bu çalışmada plaka üzerine açılan kaynak ağzının, baskı yükü ve sıcaklığı sabit tutarak devir sayısı, çıkma yüksekliği ve boru plaka arası boşluğun AA6063 borunun AA6082 plakalara dıştan takım yardımıyla sürtünme kaynak edilebilirliği esnasındaki etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

2. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

2.1 Alüminyumun Tarihsel Gelişimi

1808 yılında Humphry Davy Alümina bileşiğinin yeryüzünün keşfedilmemiş metali olduğunu iddia etmesinin ardından bilim adamları bu yeni metali ortaya çıkarmak için çaba sarf etmişlerdir. 1825'te Danimarkalı bilim adamı Hans Christian Oersted (1777-1851) laboratuvarında potasyum ile alüminyum klorür bileşiğinin reaksiyonu sonucu ilk metal örneğini üretmeyi başarmıştır. 2 yıl sonra Friedrich Wöhler aynı metot yardımıyla alüminyum üreterek bu metalin yumuşaklığını ve hafifliğini ortaya çıkarmayı başarmıştır. 1854'te Henri Sainte-Claire Deville Fransa'da potasyum yerine daha ucuz olan sodyumunda kullanılabildiğini göstermiş ve 1855'te alüminyum üretilmiştir (Habashi 2003).



Şekil 2.1: Alüminyum değer zinciri (Demirci 2011)

Bu tarihe kadar yapılan üretimler hep limitli üretim sınıfında kalmış ve gerçek anlamda alüminyumun boksit cevherinden üretimi 1886 yılını bulmuştur. 1886'da Paul Héroult ve Charles Hall birbirlerinden habersiz olarak aynı yöntemi (Hall-Heroult) geliştirmişlerdir. Bu yöntem günümüzde hala kullanılmaktadır (Mathers 2002). Alüminyum doğada boksit cevheri olarak bulunmaktadır. Alüminyum değer

zincirinde ikinci halkayı alümina oluşturmaktadır. Değer zincirinin üçüncü halkası birincil alüminyumdur. Şekil 2.1’de alüminyum değer zinciri görülmektedir (Demirci 2011).

Alüminyumun cevherinden üretimi iki aşamalıdır. Birinci aşamada alüminyum oksidin, Al_2O_3 (alümina), cevherden ayrıştırılması, ikinci aşama ise alüminanın 980-1000 °C’de erimiş kriyolit (Na_3AlF_6) çözeltisi içerisinde indirgenmesi işidir.

2.2 Alüminyumun Genel Özellikleri ve Kullanım Alanları

Alüminyumun hafifliği, yüksek mukavemeti ve korozyon direnci gibi özellikleri bu metali geleneksel ve yeni uygulamalar için kullanılacak ideal bir malzeme konumuna getirmektedir. Dünyadaki alüminyum kullanımı metal bazında demirden sonra ikinci sıradadır. Alüminyumun otomobil ve ağır taşıtlarda, gıda paketlenme ürünü olarak, binalarda yapı elemanı olarak, elektrik iletim malzemesi olarak, savunma ve uzay sanayinde, makine ve takımların üretiminde ve dayanıklı tüketim malları üretiminde kullanımı hızla artmaktadır. Teknolojideki gelişmeler ile beraber ekolojik olarak sürdürülebilir ürünler alüminyumun gelişmesine katkı sağlayacak faktörlerdir (Sverdlin 2003).

Alüminyum sivil uçaklarda %80 ve bazı araçlarda ise %40 kadar hafifleme sağlamaktadır. Alüminyum, yük ve konteyner gemilerinin gövde ve üst bölümlerinde ve zırhlı savaş araçlarında (Şekil 2.2) yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Mathers 2002).



(a)

(b)

(c)

Şekil 2.2: (a) BAC 146 tipi uçak, (b) Gövdesi 5mm kalınlığında AA5083 alaşımından yapılmış gemi, (c) Al-Zn-Mg alaşımı kullanılan zırhlı savaş aracı

Yüksek elektrik ve termal iletkenliğe sahip olan alüminyum $2,7 \text{ g/cm}^3$ 'lük düşük bir yoğunluğa sahiptir. Alüminyum, üzerindeki oksit film tabakası sayesinde korozyona karşı çok dayanıklıdır (Sverdlin 2003). Saf alüminyumun mukavemeti oldukça düşüktür ve bu yüzden özellikle yapısal uygulamalarda kullanımı çok azdır. Saf alüminyumun mukavemetini artırmak için bakır (Cu), mangan (Mn), magnezyum (Mg), silisyum (Si) ve çinko (Zn) gibi metallerle alaşımlandırmak gereklidir (Mathers 2002). Tablo 2.1'de alüminyumun saflık değerleri ve Tablo 2.2'de alüminyumun saflık derecelerine göre fiziksel özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 2.1: Alüminyum saflık değerleri (Brandt 1984).

Alüminyum, %	Saflık derecesi
99,5000 - 99,7900	Ticari saflık
99,8000 - 99,9490	Yüksek saflık
99,9500 - 99,9959	Süper saflık
99,9960 - 99,9990	Ekstrem saflık
>99,9990	Ultra saflık

Tablo 2.2: Alüminyumun saflık derecelerine göre fiziksel özellikleri (Brandt 1984).

Özellik	Saflık, %				
	99,999	99,990	99,800	99,500	99,000
Ergime noktası, °C		660,2	-	-	657
Kaynama noktası, °C		2480	-	-	-
Gizli ergime ısı, cal/g		94,6	-	-	93,0
Özgül ısı, cal/g, (100 °C)		0,2226	-	-	0,2297
Yoğunluk, g/cm ³ , (20 °C)	2,7	2,7	2,71	2,71	
Elektriksel direnç, $\mu\Omega\text{-cm}$, (20 °C)	2,63	2,68	2,74	2,8	2,87
Isıl direnç katsayısı		0,0042	0,0042	0,0041	0,0040
Termal genleşme katsayısı $\times 10^6$ (20 – 100 °C)		23,86	23,5	23,5	23,5
Isıl iletkenlik, (100 °C)		0,57	0,56	0,55	0,54
Yansıtma toplamı, %		90	89	86	-
Elastisite modülü, N/mm ²		68258	-	-	68948

Aşağıda alüminyum ile mühendislik uygulamalarında daha fazla kullanılan çelik fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından karşılaştırılmıştır. Aşağıdaki maddeler incelendiğinde çelik ile alüminyum arasındaki önemli farklılıkların özellikle kaynak davranışlarını etkilediği görülmektedir.

- İki metalin ve oksitlerinin arasında ergime sıcaklığı farklıdır. Demir oksidin ergime sıcaklığı demirin ergime sıcaklığına yakın iken, alüminyum oksit alüminyumun ergime sıcaklığının yaklaşık 1400 °C üzerinde 2060 °C’ de ergir. Bu değerler kaynak işlemi açısından çok önemlidir. Çünkü iyi bir kaynak elde edebilmek için kaynak öncesinde oksit tabakasının tamamen temizlenmesi gerekmektedir.

- Alüminyum oksit tabakasının oldukça dayanıklı, yüksek kararlılıkta ve kendini yenileyebilme özelliklerine sahip olması alüminyuma mükemmel bir korozyon direnci sağlamaktadır. Bu korozyon direnci alüminyumun ilave bir koruma yöntemine ihtiyaç duyulmadan kullanılmasını sağlamaktadır. Bu korozyon direnci anotlama yöntemi ile daha da geliştirilebilir.

- Alüminyumun ısıl genleşme katsayısı çelik ile kıyaslandığında yaklaşık iki kat daha fazladır. Bu da alüminyumun kaynak esnasında çarpılmalara ve burkulmalara daha fazla maruz kalmasına neden olmaktadır.

- Alüminyumun ısıl iletkenlik katsayısı çeliğin yaklaşık altı katı daha fazladır. Alüminyumun kaynağı için kullanılan ısı kaynağının çeliğe göre daha yoğun ve konsantre olması gerekmektedir. Özellikle kalın kesitli malzemeler için kaynak ısısının hızlıca yayılarak kaybolması birleştirme kaynaklarında kusurlara yol açmaktadır.

- Alüminyumun özgül ısı değeri çeliğin iki katıdır.

- Alüminyum yüksek elektrik iletkenliğine sahiptir. Bu değer bakırın sahip olduğu değerın %75’i iken çeliğin sahip olduğu değerın yaklaşık altı katıdır. Özellikle nokta direnç kaynağı yaparken yüksek elektrik iletkenliğine sahip malzemelerde bu değerın yüksek olması ısının hızlı yayılması nedeniyle dezavantajlı olmaktadır.

- Alüminyumun sıcaklığı yükseldikçe çelik gibi renk değiştirmez. Bu da kaynakçıların kaynak sırasında ergimenin başlayacağı zamanı kestirmelerinde zorluk çıkarmakta ve çelik kaynağından alüminyum kaynağına geçiş yapan kaynakçılar için yeniden bir eğitim gerektirmektedir.

- Alüminyumun yüzey merkezli kübik yapıya sahip olması sıcaklık azaldıkça çentik dayanım kaybına maruz kalmamasını sağlar. Gerçekte bazı alaşımlarda sıcaklıklar düşerken gerilme mukavemeti ve sünekliklerinde artış görülmektedir. Örneğin EW-5083 (Al Mg 4,5 Mn) malzeme -200 °C’de bir süre bekletildikten sonra uzamasında %60’ lık bir artış görülmektedir (Mathers 2002).

2.3 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum-bakır alaşımı uygulanan ilk alaşımlardan birisidir. 1910’lu yıllarda bu alaşımlar için çökeltme sertleştirmesinin bulunmasından sonra havacılık sektöründe kullanıma olanağı bulmuşlardır. O zamandan beri iyi kalite karbon çeliğinin mukavemetine eş hem de çeliğin ağırlığının üçte biri olan geniş ürün yelpazesinde alaşımlar geliştirilmiştir. Alüminyum alaşımlarının gelişimde en önemli etken özellikle 2. Dünya Savaşı sırasında alüminyumun uçaklarda yapı elemanı olarak kullanılmasından kaynaklanmaktadır (Mathers 2002).

Alüminyum diğer tüm saf metaller gibi deformasyon ve kırılma dayanımının gerekli olduğu uygulamalarda kullanılamayacak kadar düşük mukavemetlidir. Bu yüzden değişik elementler ile alaşımlandırılarak mukavemeti artırılır. Alüminyum levhaların çekme dayanımı AA1199-O alaşımı için 45 MPa iken, AA7055-T77 alaşımı için 700 MPa değerine kadar çıkarılabilmektedir. Yapısal uygulamalarda genellikle korozyon direnci, süneklik, tokluk gibi özellikleri en düşük seviyede karşılaması ve maliyetin uygun olması şartıyla mukavemeti en yüksek alaşım seçilir (Tiryakioğlu ve Staley 2003).

Alüminyumda kullanılan başlıca alaşım elementleri bakır, silisyum, mangan, magnezyum, lityum ve çinkodur. Alaşım özelliklerini geliştirmek amacıyla nikel, krom, titanyum, zirkonyum ve skandiyum gibi elementler küçük miktarlarda

eklenebilmektedir. Aşağıda alaşım elementlerinin temel etkileri görülmektedir (Mathers 2002):

- Magnezyum (Mg) katı çözeltili sertleşmesi yoluyla mukavemeti artırırken pekleşme kabiliyetini de iyileştirir.

- Mangan (Mn) katı çözeltili sertleşmesi aracılığıyla mukavemeti artırır ve pekleşme kabiliyetini iyileştirir.

- Bakır (Cu) önemli bir mukavemet artışı sağlar, çökeltme sertleşmesine olanak sağlarken korozyon direnci, süneklik ve kaynak kabiliyetinde düşüşe neden olmaktadır.

- Silisyum (Si) mukavemeti ve sünekliği artırır, magnezyum ile beraber kullanımı çökeltme sertleşmesi sağlar.

- Çinko (Zn) mukavemeti önemli derecede artırıp çökeltme sertleşmesine de izin verirken, gerilmeli korozyona yol açabilir.

- Demir (Fe) saf alüminyumun mukavemetini artırır, genellikle olması istenmeyen gereksiz bir elementtir.

- Krom (Cr) gerilmeli korozyon direncini artırır.

- Nikel (Ni) yüksek sıcaklık mukavemetinin artışına katkıda bulunur.

- Titanyumun (Ti) tane inceltici etkisi vardır ve genellikle dolgu elementi olarak kullanılır.

- Zirkonyumun (Zr) tane inceltici etkisi vardır ve genellikle dolgu elementi olarak kullanılır.

- Lityum (Li) mukavemeti ve elastisite modülünü artırıp çökeltme sertleşmesine olanak sağlarken yoğunluğu da düşürür.

- Skandiyum (Sc) çökeltme sertleşmesi aracılığıyla mukavemette artış sağlar ve özellikle kaynak metalinde tane inceltici etkisi vardır.

- Kurşun (Pb) ve Bizmut (Bi) talaşlı imalat kabiliyetini artıran elementlerdendir.

Alüminyum alaşımları dövme ve döküm ürünleri olmak üzere iki gruba ayrılır. Sonrasında bu gruplar kimyasal bileşimlerine bağlı olarak alt gruplara ayrılır. Son olarak da ısıl işlem durumlarına göre bir gruplama yapılmaktadır (Mathers 2002).

Dövme yoluyla üretilen alüminyum alaşımları içerdikleri ana alaşım elementine göre sınıflandırılırlar. Bu alaşımları tanımlamak üzere dört rakamlı bir işaretten yararlanılır. İlk hane alaşım grubunu belirtir. Son iki hane alüminyum alaşımını tanımlamak için kullanılır (Smith 1986). Örneğin AW-1098-%99,98 Al, AW-1090-%99,90 Al (Mathers 2002). İkinci hane ise özel alaşım modifikasyonlarını veya başka element katkısı olup olmadığını göstermektedir (Smith 1986).

Alüminyum ve alaşımlarının Avrupa standartlarına göre iki çeşit gösterimi vardır. Birincisi malzeme numaraları ile gösterim (EN 573-1), ikincisi ise kimyasal sembolü kısa gösterimdir (EN 573-2) (Yüksel ve Meran 2016). Avrupa sisteminde, 'AC' döküm ürünleri, 'AW' dövme ürünleri ifade etmektedir. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kısa gösterimleri Tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.3: Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kısa gösterimleri (Yüksel ve Meran 2016)

Malzeme Kısa Gösterimi	Açıklama
EN AW-Al99,99	1xxx serisi
EN AW-AlCu5,5MgMn	Alüminyum - Bakır Alaşımları
EN AW-AlMn0,5Mg0,5	Alüminyum - Mangan Alaşımları
EN AW-AlSi2	Alüminyum - Silisyum
EN AW-Al99,98Mg1	Alüminyum - Magnezyum
EN AW-AlMgSiCu	Alüminyum - Magnezyum - Silisyum Alaşımları
EN AW-AlZn5,5Mg1Cu	Alüminyum - Çinko Alaşımları
EN AW-AlLi2,5Cu2Mg1	Diğer elementler (Lityum, Demir vb.)

2.4 Alüminyum Alaşımına Uygulanan Isıl İşlemler

Alaşımın mekanik özelliklerini sadece içerdikleri kimyasal bileşimi değil aynı zamanda uygulanan tavlama, soğuk şekillendirme, çökelme sertleştirme gibi ısıl işlem koşulları da etkilemektedir. Bu koşulların tasarımcı ve kaynak mühendisine çok açık bir şekilde açıklanması oldukça önemlidir. İşte bu koşulların açıklanması amacıyla geliştirilen sistemde alaşımda meydana gelen gerilim sertleştirme miktarı ve ısıl işlem koşulları açıkça belirtilmiştir. Temper koşulları beş farklı tanımlama ile ve her tanım için bir harf kullanılarak belirlenmiştir. Daha hassas özellikleri belirlemek amacıyla bu harfler yanına bir ya da birden daha fazla numara eklenmiştir (Mathers 2002). Alüminyum alaşımlarına uygulanan temper şekli kısa gösterimleri Tablo 2.4’de verilmiştir.

Tablo 2.4: Alüminyum alaşımlarının temper şekilleri (TS EN 755-2:2010) (Yüksel ve Meran 2016)

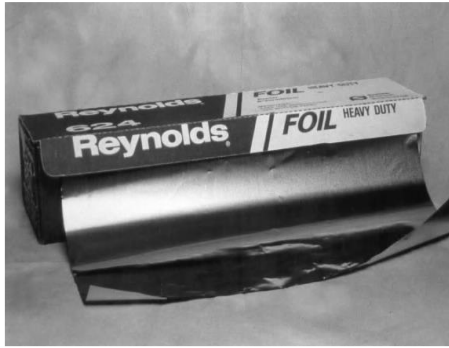
Temper	Açıklama
F	İmal edildiği gibi
O	Sıcak şekillendirme işlemi yapılmış ve tavllanmış
H111	Germe ve doğrultma işlemleri sırasında tavllanmış ve hafifçe gerinme sertleşmesine uğramış
H112	Yüksek sıcaklıkta çalışmaktan veya az miktarda germe doğrultma gibi soğuk şekillendirme işlemlerinden hafifçe gerinme sertleşmesine uğramış
T3	Katı çözeltili ısıl işlemi yapılmış, soğuk şekillendirme sertleşmesine uğramış ve doğal yaşlandırılmış
T3510	Katı çözeltili ısıl işlemi yapılmış, germeyle gerilme giderme uygulanmış ve doğal yaşlandırılmış.
T3511	Standart toleranslara uymak amacıyla germe işleminden sonra hafifçe doğrultmaya izin verir. Bunun haricinde T3510 ile aynı.
T4	Katı çözeltili ısıl işlemi görmüş ve doğal yaşlandırılmış.
T4510	Katı çözeltili ısıl işlemi görmüş, germeyle gerilme giderme uygulanmış ve doğal yaşlandırılmış.
T4511	Standart toleranslara uymak amacıyla germe işleminden sonra hafifçe doğrultmaya izin verir. Bunun haricinde T4510 ile aynı.
T5	Yüksek sıcaklıktaki bir şekillendirme işleminden soğutulmuş, sonra yapay yaşlandırılmış
T6	Katı çözeltili ısıl işlemi görmüş ve yapay yaşlandırılmış
T64	Katı çözeltili ısıl işlemi sonrası eksik yaşlandırma şartlarında yapay yaşlandırılmış
T6510	Katı çözeltili ısıl işlemi yapılmış, germe ile gerilme giderme uygulanmış ve yapay yaşlandırılmış
T6511	Standart toleranslara uymak amacıyla germe işleminden sonra hafifçe doğrultmaya izin verir. Bunun haricinde T6510 ile aynı.
T66	Katı çözeltili ısıl işlemi yapılmış ve yapay yaşlandırılmış
T7	Katı çözeltili ısıl işlemi görmüş ve yapay aşırı yaşlandırılmış
T73	Katı çözeltili ısıl işlemi yapılmış ve gerilmeli korozyon dayanımı amacıyla yapay aşırı yaşlandırılmış
T73510	Katı çözeltili ısıl işlemi görmüş, kontrollü miktarda germeyle gerilme giderme uygulanmış ve gerilmeli korozyon direnci için yapay aşırı yaşlandırılmış
T73511	Standart toleranslara uymak amacıyla germe işleminden sonra hafifçe doğrultmaya izin verir. Bunun haricinde T3510 ile aynı.
T8	Katı çözeltili ısıl işlemi görmüş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış.
T8510	Katı çözeltili ısıl işlemi görmüş, kontrollü miktarda germeyle gerilme giderme uygulanmış ve yapay yaşlandırılmış
T8511	Standart toleranslara uymak amacıyla germe işleminden sonra hafifçe doğrultmaya izin verir. Bunun haricinde T8510 ile aynı.

2.4.1 Isıl İşlem Uygulanamayan Alüminyum Alaşımları

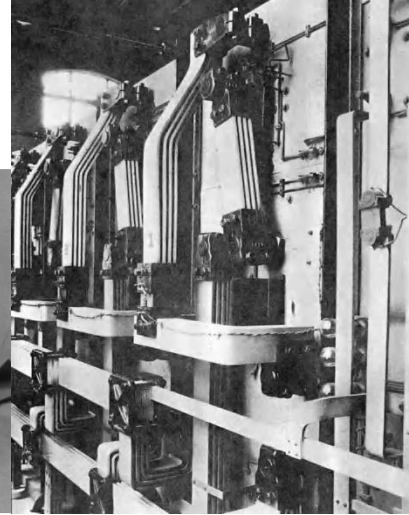
Dövme alüminyum alaşımlarını ısıl işlem uygulanabilen alaşımlar ve ısıl işlem uygulanamayan alaşımlar olarak iki grup altında toplayabiliriz. Isıl işlem uygulanamayan alaşımlarda çökeltme sertleştirme işlemi de uygulanamaz. Mukavemetin artırılması için sadece soğuk şekillendirme işlemi yapılmaktadır. Isıl işlem uygulanamayan dövme alüminyum alaşımları 1xxx, 3xxx, 4xxx ve 5xxx serisi olarak gruplandırılır.

2.4.1.1 1xxx Alaşımları

Bu serideki alaşımlarda alüminyumun oranı en az %99,0 olmaktadır. Temel alaşım elementi olarak demir ve silisyum kullanılmaktadır. Mukavemeti artırmak için %0,12 bakır katılabilir. 1100 alaşımının tavllanmış haldeki çekme dayanımı yaklaşık 90 MPa civarında olup genellikle şekil verilebilen sac şeklinde kullanılır (Smith 1986). Örnek olarak paketleme, folyo (Şekil 2.3a), çatı kaplama, korozyona dayanıklı kaplar ve tanklar gösterilebilir (Mathers 2002). Bunların yanında 1350 serisi alüminyum alaşımı elektrik uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır (Şekil 2.3b) (Kaufman 2006).



(a)

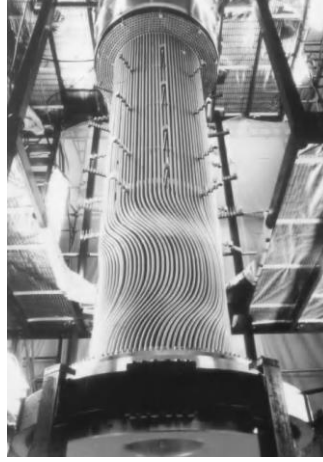


(b)

Şekil 2.3: (a) Reynolds marka 1xxx serisi ticari alüminyum alaşımından yapılmış alüminyum folyo, (b) 1350 serisi alüminyum elektrik bara tesisatı (Kaufman 2006)

2.4.1.2 3xxx Alaşımları

Ana alaşım elementi olarak mangan kullanılmaktadır. Bu alaşım elementi alüminyumun mukavemetini katı çözeltili sertleştirmesi yoluyla artırır. 1100 serisinin %1,25 mangan katılmış halidir ve bu serideki en önemli alaşım 3003'dür. 3003 alaşımının tavllanmış halde mukavemet değeri yaklaşık 110 MPa olup basınçlı kaplar, kimyasal cihazlar vb. gibi çok iyi şekillendirme istenilen yerlerde çokça kullanılmaktadır (Smith 1986). Bunların dışında şekil 2.4'de görüldüğü gibi ısı eşanjörlerinde plaka veya boru şeklinde çok geniş bir şekilde kullanılmaktadır (Kaufman 2006).



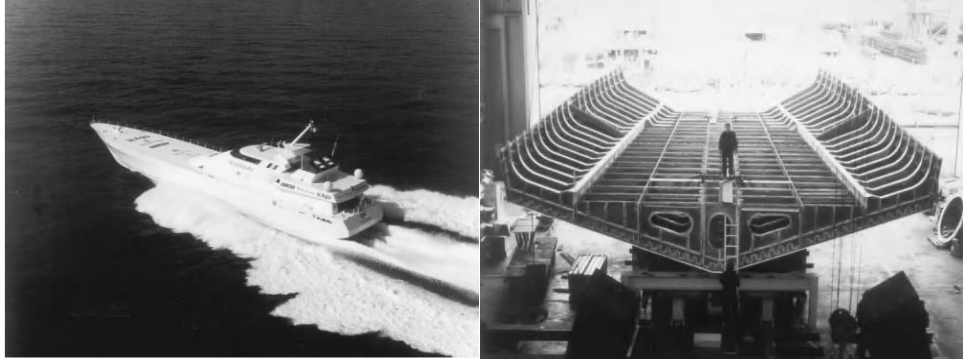
şekil 2.4: 3003 alaşımını kullanılan ısı eşanjörü (Kaufman 2006)

2.4.1.3 4xxx Alaşımları

Ana alaşım elementi olarak silisyum kullanılmaktadır. Yalnızca 4xxx serisi hem ısııl işlem uygulanabilir hem de uygulanamayan alaşımlar içermektedir. Çekme dayanımı aralığı 170-380 MPa arasında değişmektedir. En çok kullanılan serileri 4032 ve 4043 serisidir. Özellikle lehimleme ile kolayca birleştirilebilmektedir (Kaufman 2006).

2.4.1.4 5xxx Alaşımları

Ana alaşım elementi olarak magnezyum kullanılmaktadır. %2,5 Mg ve %0,2 Cr içeren ve tavlınmış durumda çekme dayanımı yaklaşık 193 MPa olan 5052 en önemli sanayi alaşımıdır. Bu alaşım özellikle kamyon, otobüs gibi ağır taşıtlar ile gemilerde sıkça kullanılmaktadır (şekil 2.5).



(a)

(b)

şekil 2.5: (a) Yüksek hızlı tekne gövdesi 5083 veya 5383-H113/H321, (b) Tekne iç gövde sertleştiricileri, zemin kaplaması ve üst bölgeler (Kaufman 2006)

2.4.2 Isıl İşlem Uygulanabilen Alüminyum Alaşımları

Bu grupta bulunan alüminyum alaşımlarında çökeltme sertleştirmesi uygulanabilmektedir. Bu grupta 2xxx, 6xxx ve 7xxx alaşımları bulunmaktadır.

2.4.2.1 2xxx Alaşımları

Ana alaşım elementi olarak bakır kullanılmakta olup çoğunda magnezyumda katılır. İlave olarak çok az miktarlarda bazı başka elementlerde kullanılmaktadır. En çok kullanılan alaşım 2024 alaşımıdır. İçerisinde % 4,5 Cu, %1,5 Mg ve %0,6 Mn bulunmaktadır. Bu alaşımın katı çözelti ve çökeltme sertleştirmesi yöntemleriyle mukavemeti artırılabilir. T6 ısıl işleme yapılmış 2024 alaşımının çekme dayanımı yaklaşık olarak 442 MPa'dır. Bu alaşım grubu uçak yapı (şekil 2.6) elemanlarında kullanılmaktadır (Smith 1986). Bunun dışında araç jantlarında, pistonlarda vb. yerlerde kullanılmaktadır (Mathers 2002).



Şekil 2.6: Uzay mekiği yakıt tanklarında kullanılan 2xxx serisi alüminyum alaşımları (Kaufman 2006)

2.4.2.2 6xxx Alaşımları

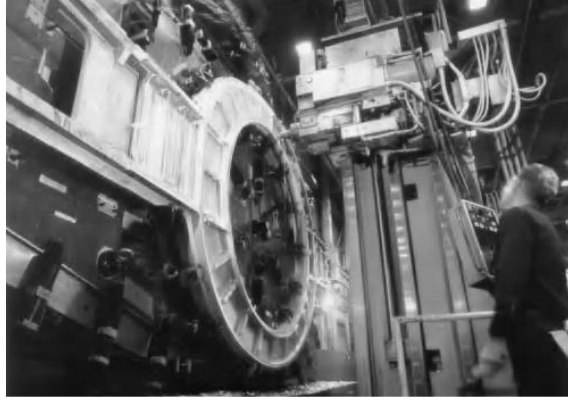
Ana alaşım elementi olarak magnezyum ve silisyum kullanılmaktadır. Bu alaşımı mukavemetlendiren Mg_2Si bileşiğidir. En çok kullanılan AA6061 alaşımında %1,0 Mg, %0,6 Si, %0,3 Cu ve %0,2 Cr bulunmaktadır. T6 ısıl işleme yapılarak mukavemet 290 MPa kadar çıkarılabilir. Gemicilik, borular, raylar vb. gibi genel amaçlı yapı elemanları olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7: Geniş arena çatılarında destek amacıyla kullanılmış AA6061 veya AA6063 alaşımlı alüminyum borular (Kaufman 2006)

2.4.2.3 7xxx Alaşımları

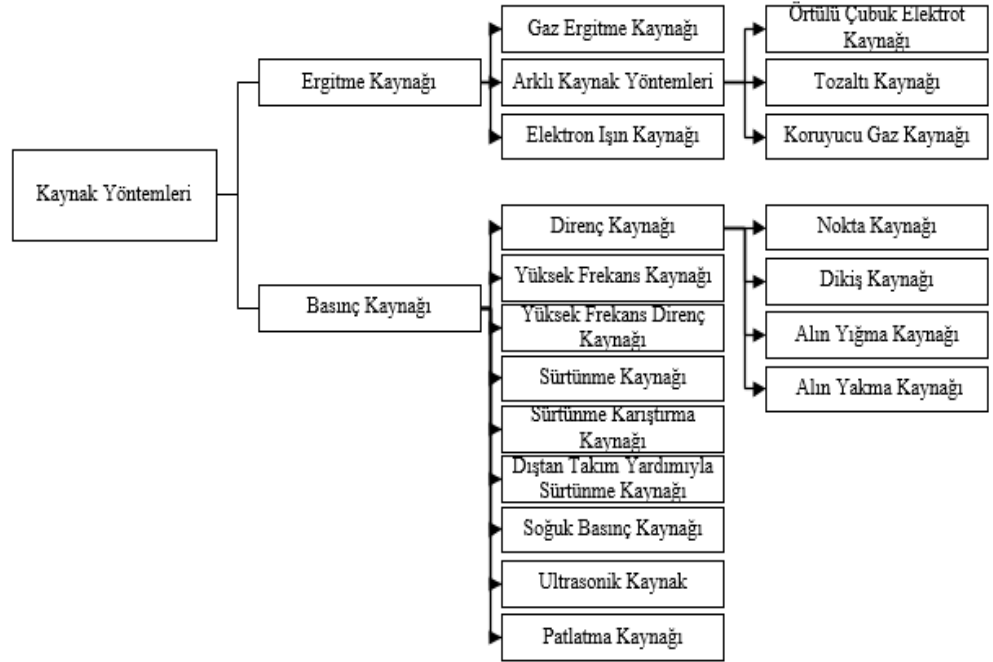
Ana alaşım elementleri ınko, magnezyum ve bakırdır. Bu elementler ısıl işlem uygulandıklarında güçlendirici $MgZn_2$ ökeltisinin ara bileşiklerini oluştururlar. ınko ve magnezyumun alüminyum içerisindeki yüksek özünürl, mukavemeti artıran yüksek yoğunlukta çökelti oluşmasına olanak sağlamaktadır. En önemli alaşımlarından birisi %5,6 Zn, %2,5 Mg, %1,6 Cu ve % 0,25 Cr içeren AA7075'dir. 7075'in çekme dayanımı değeri T6 ısıl işlemi uygulanarak 504 MPa değerine çıkarılmaktadır. En çok uçak yapı (şekil 2.8) elemanı olarak kullanılmaktadır (Smith 1986).



şekil 2.8: Uzay mekiği parçalarında kullanılan AA7050 veya AA7175-T74 alüminyum alaşımları (Kaufman 2006)

3. METALLERE UYGULANAN KAYNAK YÖNTEMLERİ

Metallerin kaynağında kullanılan yöntemleri ergitme kaynak yöntemleri ve basınç kaynak yöntemleri olarak iki grupta toplayabiliriz. Bu gruplarda uygulanan kaynak yöntemleri Şekil 3.1’de verilmiştir. DTYSK sürtünme kaynağı ile sürtünme karıştırma kaynağı karışımı bir kaynak yöntemi olduğundan basınç kaynağı sınıfında bulunmaktadır.



Şekil 3.1: Metallere uygulanan kaynak yöntemleri

3.1 Sürtünme Kaynağı

Sürtünme kaynağı malzemenin ergitilmeden, sürtünme ısısı ile plastik deformasyona uğratarak kaynaklandığı bir basınç kaynağı usulüdür (Anık 1991). Kaynak işleminin iş parçasının ergime sıcaklığı altındaki sıcaklıklarda gerçekleşmesinden dolayı sürtünme kaynağı bir katı hal kaynak işlemi sınıfına dahil edilebilir (Yılbaş ve diğ. 1995). Kaynak işlemi için gerekli ısı, elektrik enerjisi veya başka herhangi bir ısı kaynağı kullanılmadan, basınç altında birbirine temas eden ve dönen iş parçalarının arasında oluşan mekanik enerjinin ısı enerjisine dönüşmesi ile

sağlanır (Şahin ve Akata 2003). Sürtünme kaynağının avantajları arasında yüksek malzeme korunumu, düşük kaynak süresi ve metal ve farklı alaşımların kaynak edilebilirliği gösterilebilir (Şahin ve Akata 2003). Birçok demir ve demir harici alaşımlar sürtünme kaynağı yöntemi ile kaynak edilebilmektedir. Mekanik özelliklerde zayıf bağlantılar oluşan kırılğan faz yapılarına sahip malzemeler geleneksel ergitme yöntemleri ile kaynak yapılamazken sürtünme kaynağı ile kaynaklı birleşimlerini sağlamak mümkündür (Şahin ve diğ. 1997). Sürtünme kaynağı ile yapılan kaynaklarda iyi bir birleşme sağlamak amacıyla uygun kaynak parametrelerinin oluşturulması oldukça önemlidir (Sathiya ve diğ. 2008). Bu parametrelere sürtünme zamanı, sürtünme basıncı ve devir sayısı örnek olarak verilebilir (Fauzi ve diğ. 2010).

Sürtünme kaynağı sabit bir iş parçası ile dönen bir iş parçasının teması ile başlar ve basınç kaynak sıcaklığına ulaşılan kadar giderek artırılır, sonrasında dönen iş parçası durdurularak kaynak sonlandırılır (Yılbaş ve diğ. 1995). Yöntemin başından sonuna kadar ara yüzeyde mevcut bir basınç bulunmaktadır. Kaynak esnasında uygulanan basınç ise hareketli parça ve sabit parça veya dönen iki parça aracılığıyla oluşur. Sürtünme kaynağı işlemi sırasında sıcaklık artışına bağlı olarak akma ve kesme mukavemetlerinde düşmeler görülmektedir (Ateş ve diğ. 1999).

Sürtünme kaynağı aynı veya farklı malzemelerin kaynağında kullanılabilir. Geleneksel kaynak yöntemlerinin uygun olmadığı uygulamalarda tercih edilmektedir. 0,6-200 mm çapları arasında dolu silindirik parçalar kaynak edilebilir. Sürtünme kaynağı yapılacak malzemenin mukavemeti aksenal basınç ve dönme momenti kuvvetlerine karşı yeterli olmalıdır. Ayrıca malzeme sıcak plastik şekil değiştirme kabiliyeti sürtünme kaynağı yapılmasına yetecek derecede olmalıdır.

Sürtünme kaynağının avantajı ergime bölgesinin dar ve mukavemetin yüksek olmasıdır (Anık 1991). Geleneksel kaynak yöntemlerinde olduğu gibi sürtünme kaynağı yönteminde de kaynak parametreleri kaynak kalitesini belirleyen en önemli unsurdur. Malzeme cinsine bağlı olarak değişen bu parametreleri; dönme hızı, sürtünme basıncı, yığma basıncı, sürtünme süresi, frenleme süresi ve yığma süresi olarak sayabiliriz. Dönme hızı ITAB genişliğine etki eder. Sürtünme ve yığma basıncı malzeme özelliğine doğrudan bağlıdır. Ara yüzeydeki oksit filmini elimine edecek bir

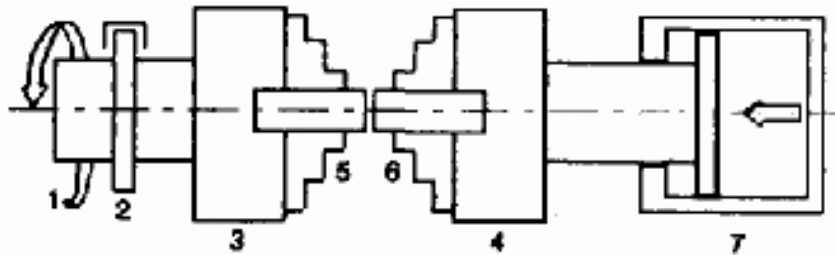
basınç uygulanmalıdır. Ayrıca uygulanan basınç yüzeyin atmosfer ile olan ilişkisini tamamen kesecek ve yüzeyde dengeli ısınma sağlayacak ölçüde olmalıdır. Yığma basıncı malzemelerin akma sınırına bağlıdır. Yığma basıncının yüksek olması aşırı sıcak şekillenmeye yol açarken, düşük tutulması halinde ise kaynaklı bağlantının yetersiz kalmasına sebep olur. Sürtünme ve yığma süreleri malzemenin ısınmasını etkileyeceğinden dolayı, gerekli kaynak sıcaklığına en kısa sürede ulaşılabilir şekilde ayarlanmalıdır (Ateş ve diğ. 1999).

3.1.1 Sürtünme Kaynak Çeşitleri

3.1.1.1 Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı direkt sürtünme kaynağı olarak adlandırılabilir (Ateş ve diğ. 1999). Gerekli olan sürtünme enerjisi, dönme ile sürekli bir tahrik grubu tarafından sağlanmaktadır (Şekil 3.2). Devir sayısı, sürtünme kuvveti ve süresi, malzeme bileşimi gibi parametreler kaynak yapılabirliği etkilemektedir (Anık 1991).

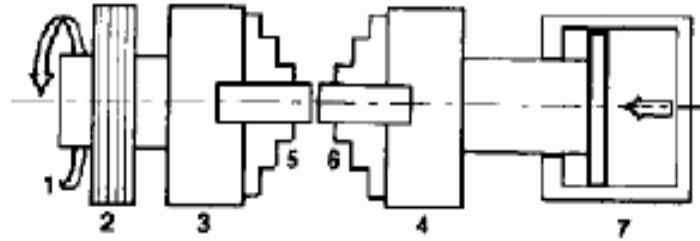
Sabit hızda dönen iş parçasına sabit parça aksenal bir basınçla temas ettirilir. Isı yeterli seviyeye ulaştığında hareketli parça frenleme ile kısa bir sürede durdurulur. Kaynak kuvveti oluşturacak yığma kuvveti artırılır ve numune soğumaya bırakılır (Ateş ve diğ. 1999).



Şekil 3.2: Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı (1) tahrik motoru, (2) fren, (3) dönen iş parçasının bağlandığı ayna, (4) sabit parçanın bağlandığı ayna, (5) dönen iş parçası, (6) sabit iş parçası, (7) yığma silindiri (Anık 1991)

3.1.1.2 Volan Kaynaklı Sürtünme Kaynağı

Volan tahrikli sürtünme kaynağı, atalet kaynağı olarak da adlandırılabilir. Parçalardan birisi volana bağlanır ve volan belirli bir hızda döndürülerek ivmelendirilir (Ateş ve diğ. 1999). Volanda toplanmış dönme enerjisi sürtünme kaynağı işleminin kendi kendini frenlemesiyle parçaya iletilir (Şekil 3.3). Bu kaynak yönteminde kaynak işlemi başlangıç devir sayısı, volanın kütlesi, yığıma basıncı ve süresi gibi parametreler önemli rol oynamaktadır (Anık 1991).



Şekil 3.3: Volan tahrikli sürtünme kaynağı (1) tahrik motoru, (2) değiştirilebilir volan, (3) dönen iş parçasının bağlandığı ayna, (4) sabit parçanın bağlandığı ayna, (5) dönen iş parçası, (6) sabit iş parçası, (7) yığıma silindiri (Anık 1991)

Kaynak kuvveti aksenal olarak uygulandığında serbest parça hareketli parça ile beraber dönerken volan dönme enerjisi parçaların ara yüzeyinde sürtünme enerjisine harcanır. Volanın hızı azalırken, kaynak bölgesi ısınır ve ısı yayılır. Volan tamamen durduktan sonra basınç uygulanarak birleşme sağlanır.

Volan sürtünme kaynağının sürekli sürtünme kaynağına göre avantajları aşağıda verilmiştir.

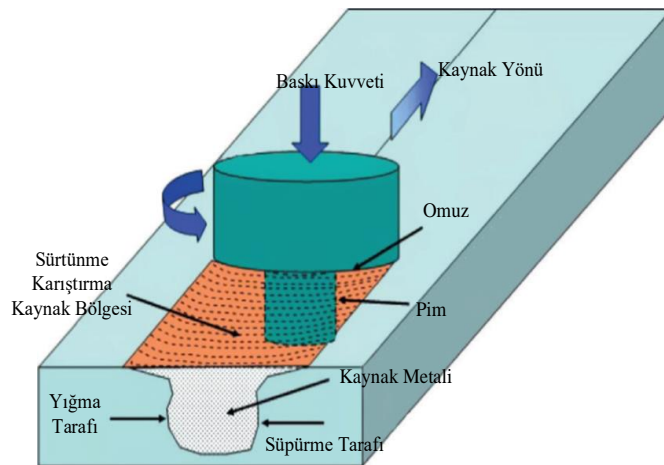
- Volan sürtünme kaynağında daha dar bir ITAB oluşur.
- Volan sürtünme kaynağında daha seri bir üretim yapılmaktadır.
- Volan sürtünme kaynağı daha düşük güç gerektirir.
- Volan sürtünme kaynağında sürekli sürtünme kaynak yöntemine göre daha basit ekipmanlar ile kaynak işlemi yapılmaktadır (Ateş ve diğ. 1999).

3.1.1.3 Kombine Kaynak Yöntemi

Kombine kaynak sürekli tahrikli ve volan tahrikli yöntemlerin beraber kullanıldığı bir yöntemdir. Büyük kapasiteli parçaların birleştirilmesi işlerinde kullanılmaktadır (Ateş ve diğ. 1999).

3.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) bir katı hal kaynak yöntemi olarak 1991 yılında İngiltere’de The Welding Institute (TWI) adlı kurumda geliştirilmiş ve öncelikli olarak alüminyum alaşımlarına uygulanmıştır (Mishra 2007). Yöntemin uygulama alanları genişleyerek alüminyum dışında sert metaller ve plastıklara da uygulanır hale gelmiştir (Givi ve Asadi 2014). Yöntemin uygulama alanları geleneksel kaynak yöntemlerine göre belli üstünlüklerinden dolayı (yorulma dayanımı, statik dayanıklılık, daha az çarpılma gibi) sürekli gelişmektedir (Smith 2014). Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi temel olarak alın altına sabitlenmiş iki plaka arasında yüksek devirde dönen omuzlu bir takımın ucundaki pimin (baticı uç) daldırılarak istenilen kaynak uzunluğu boyunca belli hızda ilerletilmesinden ibarettir (Çam 2003). Şekil 3.4’de SKK yöntemi şematik olarak gösterilmiştir (Mishra 2007). Şekil 3.5’de ise SKK takım ve SKK düzeneği verilmiştir (Besharati ve Asadi 2014). Bu yöntemde dönen takımın iş parçasına sürtünmesi ile açığa çıkan ısı aracılığıyla malzeme plastik deformasyona uğrayarak kaynak gerçekleşir.



Şekil 3.4: Sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi (Mishra 2007)



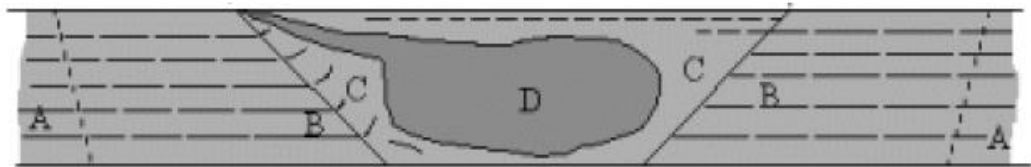
(a)

(b)

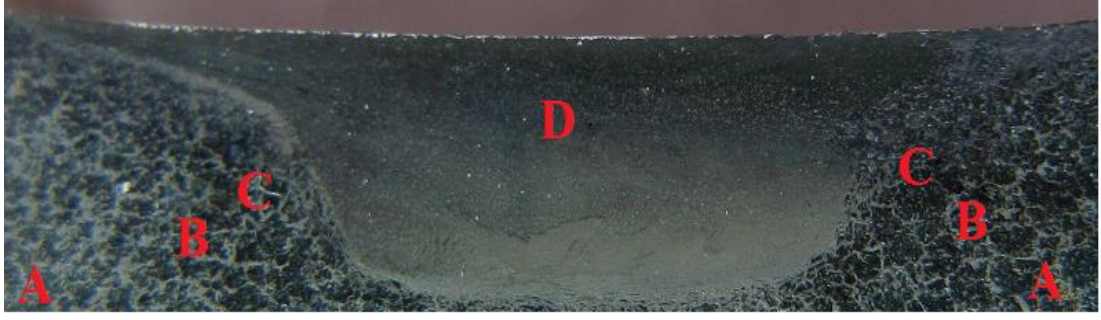
Şekil 3.5: (a) SKK takım; (b) SKK düzeneği (Givi ve Asadi 2014)

Kaynak bölgesinde nasıl bir içyapının oluştuğu şematik olarak Şekil 3.6’da, mikroskobik içyapı görüntüleri ise Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Kaynak bölgesi kaynak işleminden etkilenmeyen bölge, ısı tesiri altındaki bölge (ITAB), termomekanik etkilenen bölge (TEB) ve kaynak metali bölgesi olmak üzere 4 farklı bölgeye ayrılabilir.

Isı tesiri altındaki bölgede plastik deformasyon olmaksızın içyapı ve mekanik özellikler değişir. Termomekanik etkilenen bölgede (TEB) SKK takımı malzemeyi plastik deformasyona uğratar ve işlem esnasında ortaya çıkan ısı da malzemenin bazı özelliklerini etkiler. Yeniden kristalleşen bölge (kaynak metali) ile TEB arasında genellikle belirgin bir sınır vardır. Kaynak metali olarak adlandırılan bölge SKK takımının etkisiyle tamamen yeniden kristalleşen bölgedir (Mishra 2007).

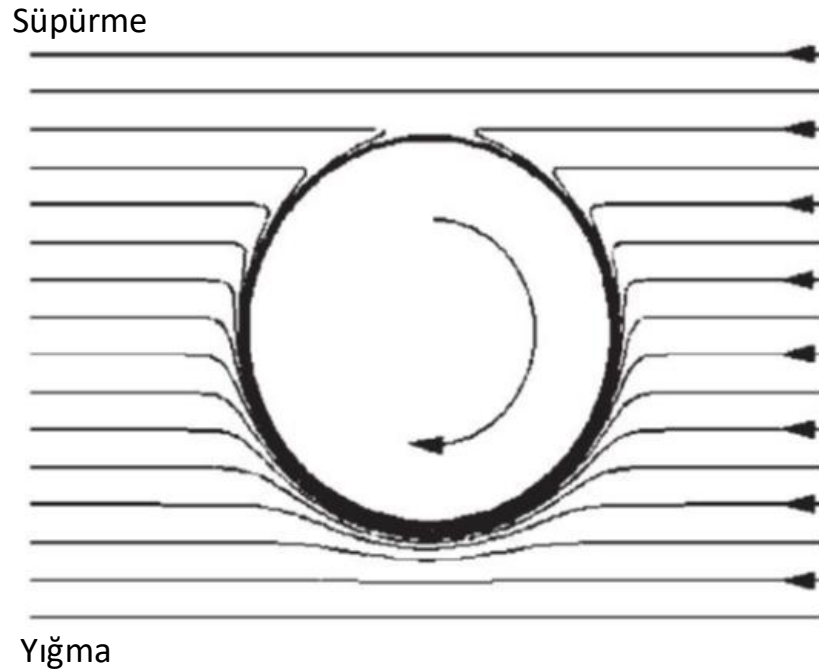


Şekil 3.6: Alüminyum alaşımlarının SKK’da kaynak bölgelerinin şematik gösterimi; A) Kaynak işleminden etkilenmeyen bölge; B) Isı tesiri altındaki bölge (ITAB); C) Termomekanik etkilenen bölge (TEB); D) Kaynak metali (Mishra 2007)



Şekil 3.7: Alüminyum alaşımlarının SKK’da kaynak bölgelerinin mikroskopik içyapı gösterimi; A) Kaynak işleminden etkilenmeyen bölge; B) Isı tesiri altındaki bölge (ITAB); C) Termomekanik etkilenen bölge (TEB); D) Kaynak metali (Givi ve Asadi 2014)

SKK’da pim etrafında malzemenin plastik akışı, bir viskoz akışkanın dönen bir silindir etrafındaki akışı ile benzerdir. Hatasız bir kaynak elde edebilmek için dönen pimin kaynağın yığılma tarafından yeteri kadar malzeme taşınması ve batıcı ucun arkasındaki süpürme tarafının dolması gerekmektedir. SKK’da oluşan plastik akış iki boyutlu olarak Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8: SKK’da pim etrafında oluşan plastik akışın şematik gösterimi (Reynold 2003).

Sürtünme karıştırma kaynağının geleneksel ark kaynağına göre metalürjik avantajları aşağıda verilmiştir (Colligan 2010):

- Distorsiyonlarda azalma,
- Artık gerilmelerde azalma,
- Artan yorulma ve korozyon dayanımı,
- Artan yüzey kalitesi,
- Dolgu metali uyuşmama sorununun ortadan kalkması,
- Artan mukavemet ve tokluk değeri,
- Mekanize işlem kolaylığı

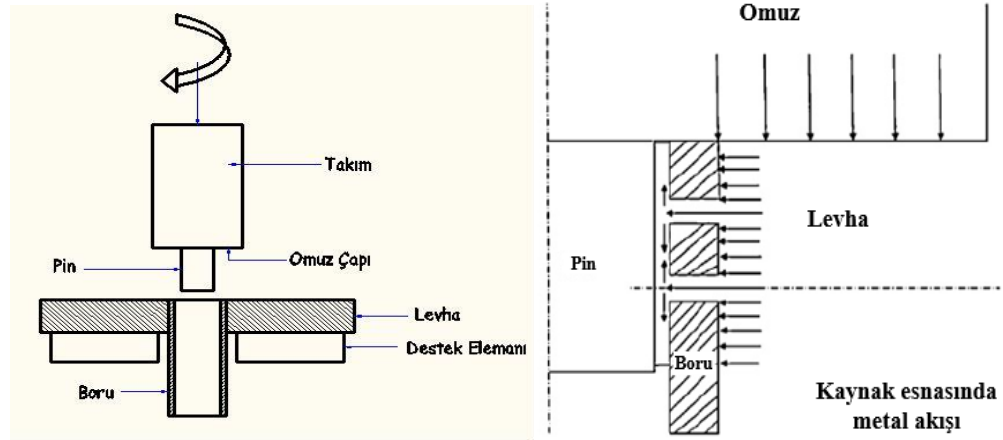
Sürtünme karıştırma kaynağının geleneksel ark kaynağına göre çevresel avantajları aşağıda verilmiştir:

- Koruyucu gaza gereksinim duyulmaması,
- Yüzey temizleme gereksiniminin çok düşük olması,
- Tel, herhangi bir gaz vb. gibi tüketim maddesi kullanımında azalma,
- Kaynak öncesinde yağ çözücü solventlere gereksinim duyulmaması,
- Zararlı emisyon gazlarının kullanılmaması.

3.3 Dıştan Takım Yardımıyla Sürtünme Kaynağı

Dıştan takım yardımıyla sürtünme kaynağı (DTYSK) 2006 yılında geliştirilmiş ve 2008 yılında patentlenmiştir. Bu yöntem farklı boru ve plaka malzemelerinin birleştirilmesine olanak sağlamaktadır. En büyük dezavantajı ise bu yöntemle küçük boyutlu iş parçaları birleştirilememektedir (Kumaran ve diğ. 2010). DTYSK sürtünme kaynağı ve sürtünme karıştırma kaynağının karışımı bir kaynak yöntemidir. Bu yöntemde aynı sürtünme karıştırma kaynağında olduğu gibi omuz ve pimden oluşan bir takım mevcuttur. Bu takım boru yüzeyine farklı baskı yüklerinde ve farklı devirlerde sürtünerek boruda sürtünme kaynaklı yumuşama sağlamaktadır. Sürtünme

kariştırma kaynağından farklı olarak takımın ucundaki pim plakaya temas etmemekte ve boşta d6nerek kariştırma işlemi yapmamaktadır. Aynı zamanda takıma ya da iş parçasına ilerleme hareketi verilmemektedir. Şekil 3.9’da DTYSK mekanizması ve kaynak esnasında malzeme akışı g6r6lmektedir (Meran ve diğ. 2016).



Şekil 3.9: DTYSK mekanizması ve kaynak esnasındaki metal akışı (Kumaran ve diğ. 2010)

DTYSK y6nteminde plaka 6zerine boru çapından çok az daha b6y6k bir delik açılır. Boru plaka içerisine geçecek Şekilde el ile yerleştirilir. D6nen takım pimi yataklama amaçlı boru içerisinde kalacak Şekilde boru içerisine daldırılır. Takımın omuz kısmı ise boru 6st y6zeyine s6rt6nerek borunun s6rt6nme ısısı ile hamurlaşmasını sağlar. Hamurlaşan metal takım omzunun aşağı y6nl6 baskı kuvvetiyle boru ile plaka çapları arasına boşluklu kısımdan akarak bu kısmı doldurur ve birleşme sağlanır (Meran ve diğ. 2015).

DTYSK’ da kaynak kalitesine etki eden fakt6rler arasında takımın devir sayısı, takımın baskı kuvveti, boru ile takım arasına boşluk, borunun plakadan çıkma y6ksekliliği, temas halinde tutulan s6re, omuz çapı ve sıcaklık sayılabilir. Bu parametrelerden en 6nemli ikisi takım devir sayısı ve baskı kuvvetidir. Bu parametreler doğrudan sıcaklığı etkilemekte ve kaynak b6lgesindeki metal6rjik yapının değişmesine neden olmaktadır (Meran ve diğ. 2016)

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1 Deneylerde Kullanılan Numunelerin Malzemeleri ve Boyutları

Deneyler esnasında plaka numuneleri olarak EN AW-6082-T6, boru numuneleri olarakta EN AW-6063-T5 alüminyum alaşımları kullanılmıştır. Bu malzemelerin kimyasal bileşimleri Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1: Plaka malzemesi olarak kullanılan EN AW-6082-T6’nın kimyasal bileşimi (%)

	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Diğer	Al
EN AW-6082-T6	0,5	0,7-1,3	0,1	0,4-1,0	0,6-1,2	0,2	0,15	0,15	Kalan

Tablo 4.2: Boru malzemesi olarak kullanılan EN AW-6063-T5’in kimyasal bileşimi (%)

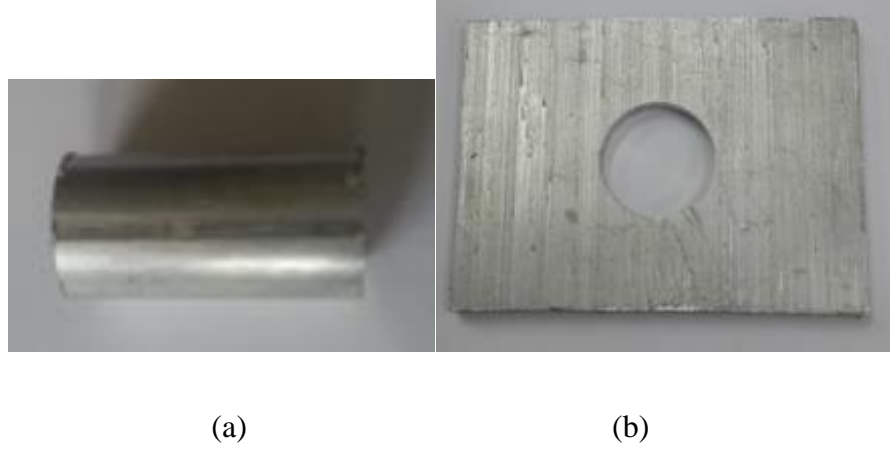
	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Zi	Diğer
EN AW-6063-T5	0,35	0,2-0,6	0,1	0,1	0,45-0,9	0,1	0,1	0,15	0,15

EN AW-6063 ve EN AW-6082 alüminyum alaşımlarının farklı temper işlemlerindeki mekanik özellikleri Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3: EN AW-6063 (EN AW AlMg0,7Si) ve EN AW-6082 (EN AW AlSi1MgMn) alüminyum alaşımlarının farklı temper işlemlerindeki mekanik özellikleri – TS EN 755-2:2010 (Yüksel ve diğ. 2016)

	Temperleme Şekli	R _m (MPa)	R _{p0.2} (MPa)	A (%)	HBW En az	Kesme Dayanımı R _{mk} (MPa)
EN AW- 6063	O	130	-	18	25	R _{mk} =0,52R _m = 0,52x175= 90
	T4	130	65	14	50	
	T5	175	130	8	65	
	T6	215	170	10	75	
EN AW- 6082	O	160	110	14	35	R _{mk} =0,52R _m = 0,52x290= 150
	T4	205	110	14	70	
	T5	270	230	8	90	
	T6	290	250	8	95	

Kaynak edilecek borular $\text{Ø}20 \times 2$ mm, plakalar $5 \times 50 \times 70$ mm ölçülerinde olacak şekilde hazırlanmıştır (Şekil 4.1).



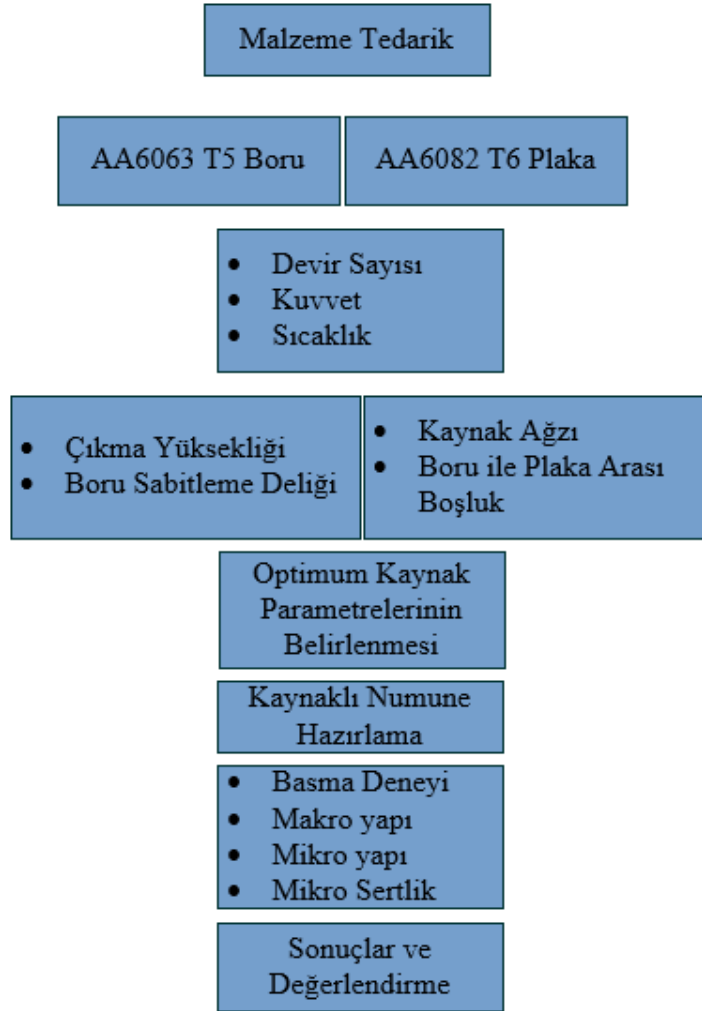
Şekil 4.1: (a) Kaynak yapılacak boru, (b) Kaynak yapılacak plaka

4.2 Çalışma Öncesi Planlama

Kaynak kalitesinin artırılması ve daha mukavemetli bağlantılar elde edebilmek amacıyla çalışmaya ön deneyler ile başlanmıştır. Ön deneyler sırasında ortaya çıkan sonuçlara göre optimum kaynak parametreleri belirlenmiştir. Bu şekilde bir çalışma daha sonra yapılacak olan kaynaklardaki hataların önüne geçerek hem zamandan hem de maliyetten tasarruf edilmesini sağlayacaktır. Optimum çalışma şartlarını belirlemek amacıyla her bir parametre için beş adet kaynaklı numune hazırlanmıştır. Bu beş numunenin üçü basma deneyi, kalan diğer ikisi ise mikro ve makro yapı gözlemleri için hazırlanmıştır. İlk aşamada kaynak esnasında boru üzerine takım tarafından uygulanacak baskı yükü ve dönme sırasında takım ile iş parçası arasındaki sürtünme nedeniyle ortaya çıkacak optimum sıcaklık için gerekli süre belirlenmeye çalışılmıştır. Değişik baskı kuvvetleri ve sıcaklıklarda yapılan kaynaklar sonucu numunelere basma deneyi, mikro ve makro yapı incelemeleri yapılarak uygun baskı kuvveti ve sıcaklık belirlenmiştir. Buradaki amaç baskı kuvveti ve sıcaklık etkisiyle iş parçası üzerinde gerekli hamurlaşmayı sağlayacak ısı girdisine ulaşabilmektir. Hamurlaşma için yeterli sıcaklığa alüminyumun ergime sıcaklığının yaklaşık 0,6-0,7 katı bir sıcaklıkta (yaklaşık $440 \text{ }^\circ\text{C}$) ulaşılmıştır. Yeterli hamurlaşmanın oluşmasından sonra boru ile

plaka arasında kaynaklı bağlantının yapılmasını sağlayan optimum baskı kuvveti değeri de 250-350 MPa olarak ölçülmüştür.

Bu değerin az olması halinde gerekli kaynak bağlantısına ulaşamamış, değer çok yüksek olduğunda ise gerekli hamurlaşma sıcaklığına ulaşmadan iş takımı plaka ile temasa geçmiş ve kaynaklı bağlantı sağlanamamıştır. Deneylerde belirlenmesi gereken bir diğer parametre de devir sayısıdır. 950 min⁻¹ değerinden daha düşük devir sayılarında yetersiz ısı girdisi sebebiyle hamurlaşma oluşmaması nedeniyle kaynaklı bağlantılar elde edilememiştir. Bu yüzden kaynak parametresi olarak 950 min⁻¹ ve üstü devir sayılarında çalışılmıştır. Ön deneyler sonucunda ilk belirlenen parametreler baskı kuvveti, sıcaklık ve devir sayısıdır. Şekil 4.2’de çalışma planı iş akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Deney iş akış şeması

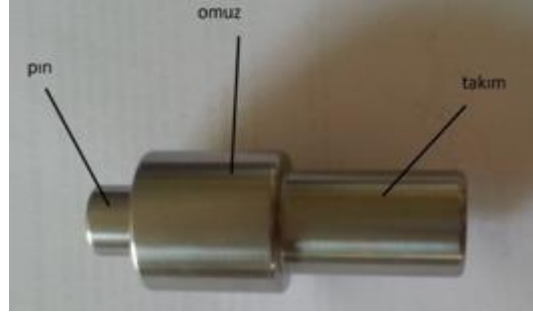
4.3 Deney Düzenegi

Deneyleerde kullanılan düzenek Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Deney düzenegi kaynağın yapıldığı freze, yük kontrol ünitesi, hidrolik kontrol ünitesi, hidrolik basınç ayar ünitesi ve baskı kuvveti gösterge panelinden oluşmaktadır. Yük kontrol ünitesi içerisindeki piston sayesinde üst tabla ve bağlı olduğu iş parçası yukarı doğru hareket edebilmektedir. Hidrolik kontrol ve basınç ayar ünitesi yardımıyla da kaynak esnasında istenilen baskı yükü ayarlanabilmektedir. Gösterge paneli ve bilgisayara veri aktarabilen cihaz sayesinde yük sürekli gözle kontrol edilebilmekte ve her kaynak esnasında yaklaşık olarak aynı baskı yükü uygulanabilmektedir.

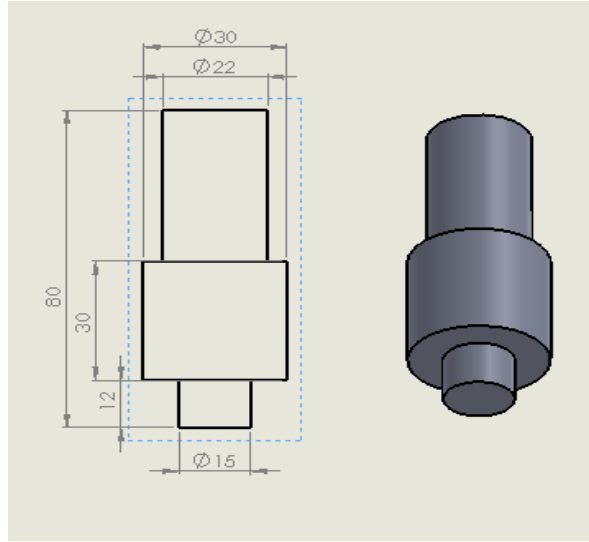


Şekil 4.3: Deney düzenegi

Takım malzemesi olarak Şekil 4.4’de görüldüğü gibi X210Cr12 soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır. Takımlar kullanılacak boyutlara getirildikten sonra ısıtım uygulanmıştır. Isıtım işlemi olarak X210Cr12 soğuk iş takım çeliğinin özelliklerine göre 970 °C’de yarım saat ostenitleme işleminin hemen ardından yağda soğutma yapılmıştır. Soğutma işleminden sonra 180 °C’de bir saat boyunca menevişleme yapıp takım kullanıma hazır konuma getirilmiştir. Tablo 4.4’de soğuk iş takım çeliğinin kimyasal bileşimi gösterilmiştir.



(a)



(b)

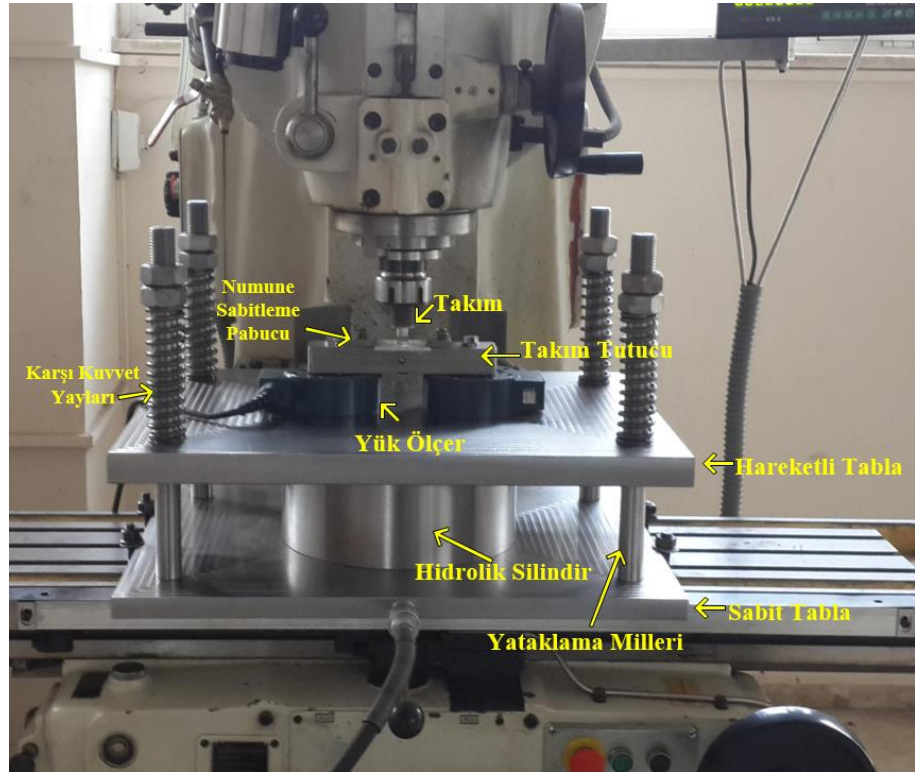
Şekil 4.4: DTYSK esnasında kullanılan takım (Meran ve diğ. 2016)

Tablo 4.4: X210Cr12 Soğuk iş takım çeliğinin kimyasal bileşimi (%)

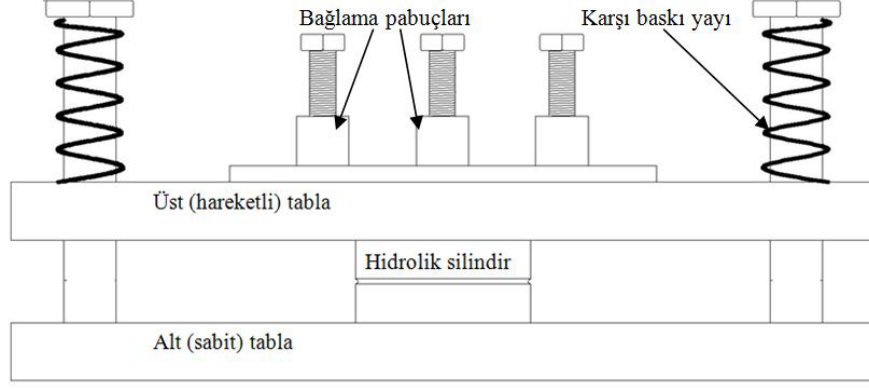
C	Si	Mn	P	S	Cr
1,90-2,20	0,10-0,60	0,20-0,60	0,030	0,030	11,00-13,00

DTYSK uygulamalarında Smarc X5032 marka dikey freze tezgahı kullanılmıştır. Tezgah mili devir sayısı 30 min^{-1} ile 1500 min^{-1} aralığında belli değerlere ayarlanabilmektedir. DTYSK yönteminde kaynak esnasında uygulanan yükü sabit tutmak en önemli parametrelerden biridir. Klasik tezgahlarda bu yükü sabit tutmak oldukça zordur. Kaynak esnasında iş parçası sabitken dönen takım dikey yönde aşağı doğru hareket ettirilerek kaynak işlemi yapılır. Bu işlem esnasında baskı kuvveti

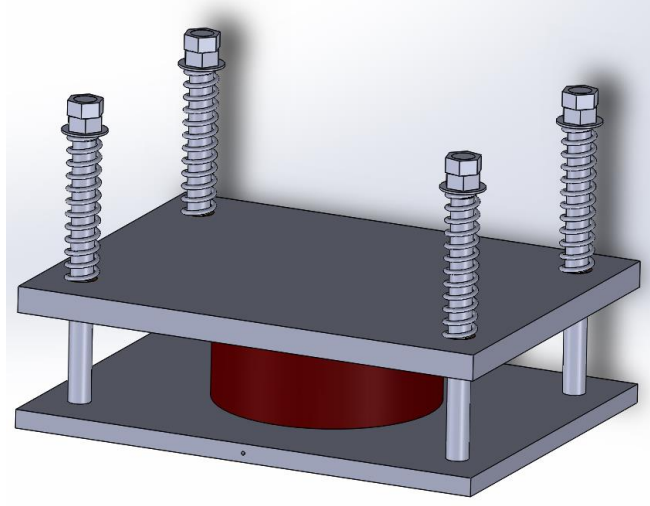
tamamen frezeyi kullanan kişinin manuel olarak uyguladığı kuvvete eşit olmaktadır. Bu da her kaynak esnasında farklı baskı yüklerinin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden baskı kuvvetini sabit tutabileceğimiz özel bir hidrolik sisteme ihtiyaç duyulmuştur. Sistem iki ana plaka arasına yerleştirilmiş kontrollü hareket sağlayan hidrolik silindirden oluşmaktadır. Bu iki tabla eksen kaçıklığına sebep vermeyecek şekilde dört adet mil yardımıyla sabitlenmiştir. Miller üzerine konulan karşı kuvvet yayları sayesinde piston eski konumuna gelebilmektedir. Basınç ayar ünitesi sayesinde hidrolik silindirdeki pistonu giden yağ basıncı ayarlanabilmektedir. Bu sistem sayesinde kaynak işlemi esnasında parçanın bağlandığı üst tabla freze tablasına dikey yönlü yukarı doğru hareket edecektir. Takım ise sabit konumda belli bir devir sayısında dönecektir. Bu sayede baskı kuvveti her kaynak işlemi esnasında yaklaşık olarak sabit kalabilmektedir. Bu da kaynak işlemleri hakkında karşılaştırma yapabilmeyi kolaylaştırmıştır. İmal edilen sistemin parçaları Şekil 4.5’de, şematik gösterimi ve üç boyutlu görüntüsü Şekil 4.6a-b’de verilmiştir.



Şekil 4.5: DTYSK esnasında kullanılan dik başlı freze tezgahı ve hidrolik sistem



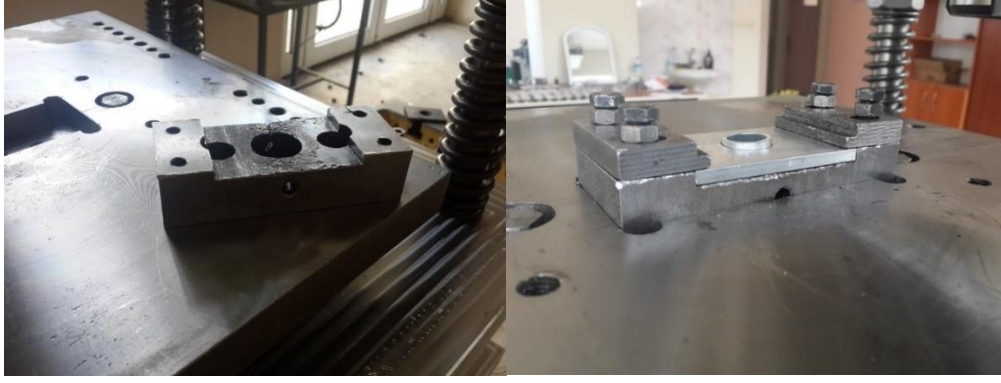
(a)



(b)

Şekil 4.6: Hidrolik takım yükleme sisteminin (a) Şematik gösterimi, (b) Üç boyutlu görüntüsü (Küçükömeroğlu ve diğ. 2010)

Ön deneyler esnasında Şekil 4.7’de gösterilen tutturma aparatı kullanılmıştır. Aparat C40 ıslah çeliğinden imal edilmiş olup herhangi bir ısıl işlem uygulanmamıştır. Tutturma aparatı freze üzerindeki tablaya yuva açılarak cıvata yardımıyla sabitlenmiştir. DTYSK yönteminde boruların plakalara kaynağı esnasında yüksek devirden dolayı kaynağın sağlıklı yapılabilmesi amacıyla numuneler pabuçlar yardımıyla sabitlenmiştir.



Şekil 4.7: Ön deneyler esnasında kullanılan numune tutturma aparatı

Ön deneyler esnasında kullanılan numunelerin aparatın tabanı üzerinde deformasyon oluşturması nedeniyle asıl deneyler esnasında yeni bir tutturma aparatı imal edilmiştir. Şekil 4.8'de gösterilen bu aparatın malzemesi C45 imalat çeliği olup herhangi bir ısıtım işlemi uygulanmamıştır.



Şekil 4.8: Asıl deneyler esnasında kullanılan tutturma aparatı ve numunelerin bağlanmış şekli

Deneylerden sonra kesme mukavemet değerlerinin bulunması amacıyla basma deneyleri yapılmıştır. Deneylerin yapıldığı Alşa Marka hidrolik üniversal test cihazı 600 kN kapasitelidir. Bilgisayara yüklenen yazılım kesme dayanımı sonuçlarını grafikler halinde bilgisayar ortamında görebilme ve saklayabilme imkanı sağlamaktadır.

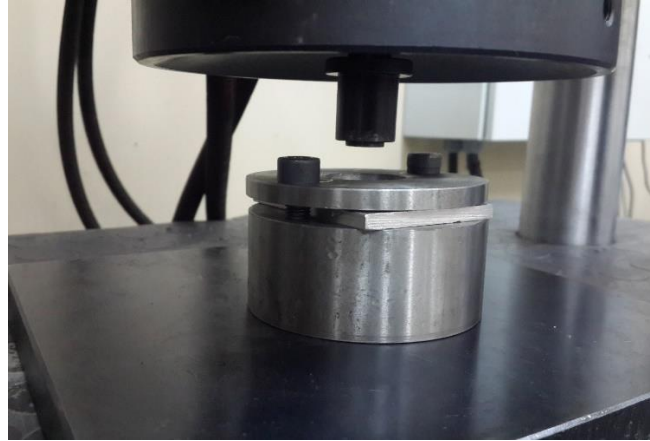
Basma deneylerinin yapılması sırasında numunelerin sabitlenmesi amacıyla Şekil 4.9a-c'de gösterilen bir aparat imal edilmiştir. Bu aparat kaynaklı boru-plaka

numunesini sabitleyerek basma deneyi esnasında kaynaklı parçanın şekil değiştirmesini engellemektedir. Deney sonuçlarının geçerli olabilmesi için kopmanın boru-plaka birleşim noktasından olması gerekmektedir. Bunun için imal edilen ve basma cihazı ucuna takılan pim parçasının dış çapı, kaynaklı boru parçasının dış çapına eşit olacak şekilde üretilmiştir.



(a)

(b)



(c)

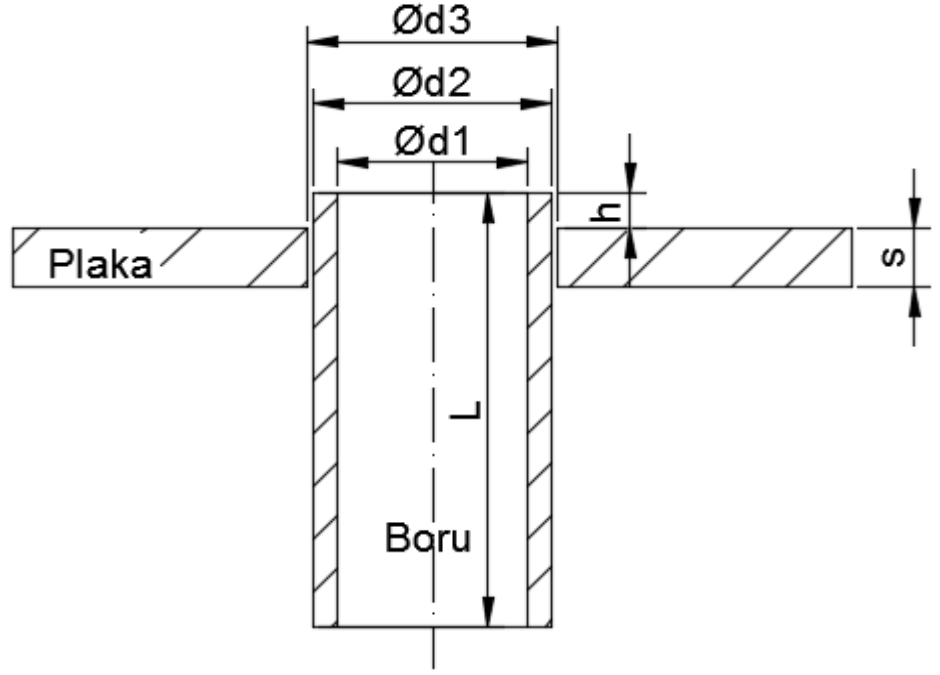
Şekil 4.9: Kesme deneyi için (a,b) Numune tutturma aparatı, (c) Numunenin bağlanmış hali

4.4 Ön Deneyler

DTYSK yönteminde kaynak kalitesini etkileyen faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Takım devir sayısı (min^{-1})
- Takımın kaynak esnasında iş parçasına uyguladığı baskı kuvveti (kg)
- Kaynak esnasında takım omzu ile iş parçası arasında oluşan sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
- Takım omuz çapı
- Takım pim çapı
- Kaynak yapılacak borunun plaka üzerinde kalan kısmı olarak tarif edilen boru çıkma yüksekliği (h)
- Borunun kaynak esnasında takım ile beraber dönmesini engelleyen ve boruyu merkezleyen boru sabitleme deliği
- Plaka üzerine açılan kaynak ağzı
- Boru ile plaka arasındaki boşluk

Şekil 4.10'da boru ile plakanın montaj teknik resmi gösterilmiştir. d_1 boru iç çapını, d_2 boru dış çapını, d_3 plaka delik çapını, h çıkma yüksekliğini, s plaka kalınlığını ve L boru uzunluğunu göstermektedir.



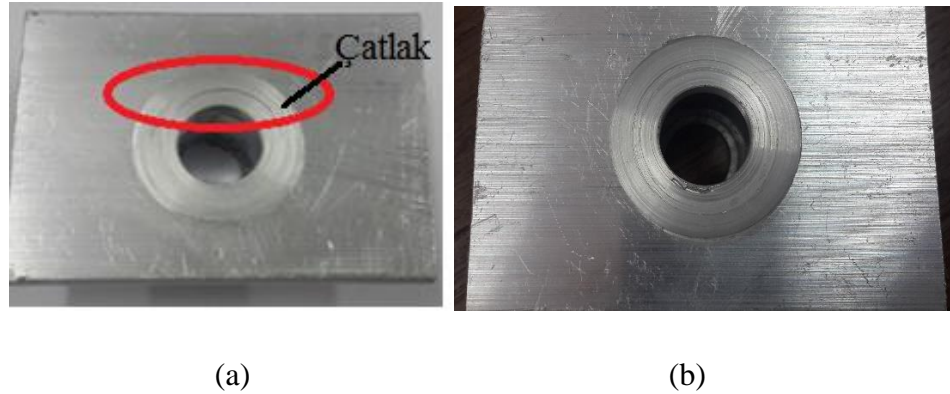
Şekil 4.10: Boru ile plakanın kaynak öncesi durumu ve boyutları

Yapılan ön deney ve asıl deneylerde bu parametrelerden takım omuz çapı ve takım pin çapı sabit alınmıştır. Birinci aşamada yapılan ön deneyler sonucu devir sayısı ve sıcaklık değeri belirlenmiştir. İkinci aşamada yapılan deneyler sonucu optimum baskı yükü ve çıkma yüksekliği belirlenmiştir. Üçüncü aşamada ise boru sabitleme deliği olup olmamasının, plaka üzerine kaynak ağzı açılmasının ve plaka ile boru arası boşluğun kaynak kalitesi üzerine etkileri karşılaştırılmıştır.

Malzeme tedarik sürecinden sonra gelen EN AW-6082-T6 alaşımı malzeme 5x50x70 mm uzunluğunda kesilmiştir. EN AW-6063-T5 alaşımı Ø20x2 mm boru malzemesi ise 30 mm, 31 mm, 32 mm uzunluğunda kesilerek hazırlanmıştır. Kesimden sonra plaka ve boru çevresinde kalan çapaklar eğe ile temizlenmiştir. Deneyler esnasında sırasıyla; Takım devir sayısı ve sıcaklık, baskı kuvveti, boru sabitleme deliği, plaka üzerine açılan kaynak ağzı, boru çıkma yüksekliği ve plaka ile boru arası boşluk parametrelerinin DTYSK üzerine etkileri incelenmiştir.

4.4.1 Takım Devir Sayısı ve Sıcaklığın DTYSK Yöntemine Etkisi

İlk aşamada takım devir sayısı ve sıcaklığın kaynak kalitesine etkisini belirlemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Bu deneyler esnasında borunun plakadan çıkma yüksekliği 3 mm’de sabit tutularak 950 min⁻¹ devir sayısının altındaki devirlerde kaynak yapılmıştır. Düşük devirlerde kaynak yapıldığında Şekil 4.11 a’da gösterildiği gibi yetersiz ısı girdisi nedeniyle çatlaklar meydana gelmiştir. Bundan dolayı daha sonra yapılacak çalışmalarda devir sayısı parametresi olarak 950 min⁻¹, 1180 min⁻¹ ve 1500 min⁻¹ olmak üzere üç farklı devir sayısı seçilmiştir. Bu durum sıcaklığın kaynak üzerine olan etkisini göstermektedir. Kaynak esnasında sıcaklık değeri EN AW-6063-T5 tipi alüminyum alaşımlarının yaklaşık ergime sıcaklığı olan 616 °C’nin 0,6-0,7 katı olan 369-431 °C’ ye ulaşmalıdır. Sıcaklık değerleri Testo marka sıcaklık ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Aynı zamanda cihaz doğruluğunu test etmek amacıyla aralarda Testo 345 SET SH marka infrared termometre cihazı da kullanılmıştır.

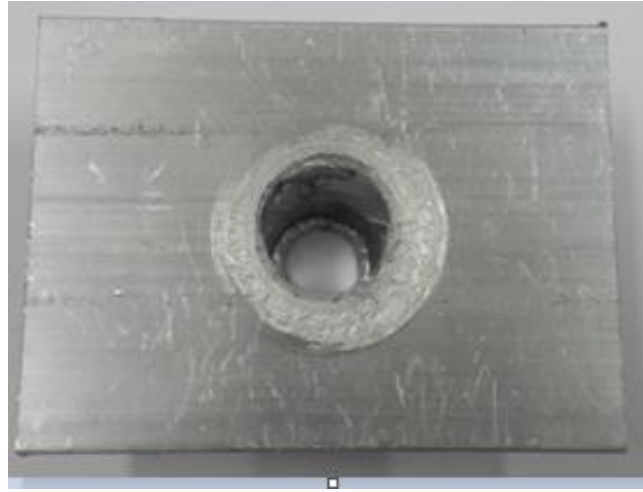


Şekil 4.11: (a) Kaynak esnasında çatlak oluşan numune, (b) Kaynak esnasında çatlak oluşmamış numune görünümü

4.4.2 Takımın Boru Üzerine Yaptığı Baskı Kuvvetinin DTYSK Yöntemine Etkisi

Deneyler esnasında yük kontrol sistemi manuel olarak çalıştırılmıştır. Başlangıç butonuna basıldıktan sonra numunenin bağlı olduğu tabla elle çevrilerek yukarı doğru çıkmakta ve boru ile takım omzu teması geçmektedir. Boruya temasından sonra belli hızla yukarıya doğru harekete devam ettirilmektedir. Takım omzunun boruya ilk temas anında uygulanan kuvvet takım omzunun plakaya temasına

kadar belli bir değere düşmektedir. Maksimum kuvvet ise takım omzu ile plaka teması sonucu oluşmaktadır. Dönen takımın iş parçası üzerine uyguladığı baskı kuvveti değerinin takım omzunun plakaya temas ettiği anda 200 kg'dan daha düşük olduğu durumda Şekil 4.12'deki gibi yeterli hamurlaşmanın sağlanmadığı gözlemlenmiştir. Yapılan bu deneyler sonucunda baskı kuvveti değerinin 200 kg dan daha yüksek olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Devir sayısı 950 min^{-1} ve çıkma yüksekliği 3 mm sabit tutularak, 230 - 350 kg olmak üzere farklı baskı kuvveti değerinde altı numune kaynaklanmıştır. Bu numunelerin kesme deneyi sonuçları Tablo 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.12: Kaynak esnasında yeterli hamurlaşma olmamış numune

Tablo 4.5: Baskı kuvvetinin kesme dayanımına etkisi

Numune Adı	Devir Sayısı (min^{-1})	Çıkma Yüksekliği (mm)	Baskı yükü (En fazla) (kg)	Sıcaklık $^{\circ}\text{C}$ (yaklaşık)	Kesme Dayanımı R_{mk} (MPa)
N1-1	950	3	250	430-450	35
N1-2			230		28
N1-3			240		33
N2-1			345		28
N2-2			315		26
N2-3			280		38

Deney sonuçları irdelendiğinde takımın kaynak esnasında iş parçasına uyguladığı baskı kuvveti değerinin yaklaşık 250 ile 300 kg değerleri arasında olduğu durumlarda elde edilen kaynaklı numunelerin kesme dayanımı değerlerinin daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Uygulanan baskı yükü, devir sayısı ve sıcaklık parametreleri belirlendikten sonra kaynak kalitesi üzerine etki eden diğer parametreler Tablo 4.6’da gösterilmiştir.

Tablo 4.6: DTYSK ön deney parametreleri ve sonuçları

Numune Adı	Devir Sayısı (min ⁻¹)	Çıkma Yüksekliği (mm)	Kesme Dayanımı (R _{mk})(MPa)	Kesme Dayanımı ortalaması (R _{mk})	Baskı yükü (En fazla) (kg)	Maks. Sıcaklık (°C)	
N 2-1	950	3	28	30	345	417	
N 2-2			26		315	428	
N 2-3			38		285	431	
N 3-1		2	2	49	48	305	450
N 3-2				45		295	421
N 3-3				48		295	414
N 4-1		1	1	42	36	300	374
N 4-2				35		270	414
N 4-3				32		290	401
N 5-1	1180	3	47	49	250	425	
N 5-2			47		250	447	
N 5-3			53		250	441	
N 6-1		2	2	36	43	250	469
N 6-2				42		290	444
N 6-3				52		250	454
N 7-1		1	1	39	32	260	455
N 7-2				23		255	447
N 7-3				35		275	462
N 8-1	1500	3	31	34	250	427	
N 8-2			37		260	410	
N 8-3			36		250	446	
N 9-1		2	2	45	45	305	446
N 9-2				43		250	433
N 9-3				48		275	418
N 10-1		1	1	38	38	265	440
N 10-2				39		250	433
N 10-3				35		300	420

Her bir parametre için beşer kaynak yapılmıştır. Şekil 4.13’de kaynak yapılmış bir numune ve Şekil 4.14’de kaynaklanan tüm numuneler gösterilmiştir.



Şekil 4.13: DTYSK yapılmış alüminyum numune



Şekil 4.14: Ön deneyler için hazırlanan tüm alüminyum deney numuneleri

Kaynaklı numunelerin üçü kesme dayanımlarını ölçmek amacıyla diğer ikisi ise içyapı analizi için ayrılmıştır. Ön deneyler için hazırlanan numunelerin kesme deney sonuçları karşılaştırıldığında (Tablo 4.6) en yüksek değere ortalama 49 MPa ile 1180 min⁻¹ devir sayısı ve 3 mm çıkma yüksekliği parametrelerinde kaynak yapılmış olan N5-1, N5-2 ve N5-3 numaralı numunelerde ulaşılmıştır. Şekil 4.15’de kesme deneyi esnasındaki ve kesme deneyi sonrasındaki numune görüntüleri verilmiştir.



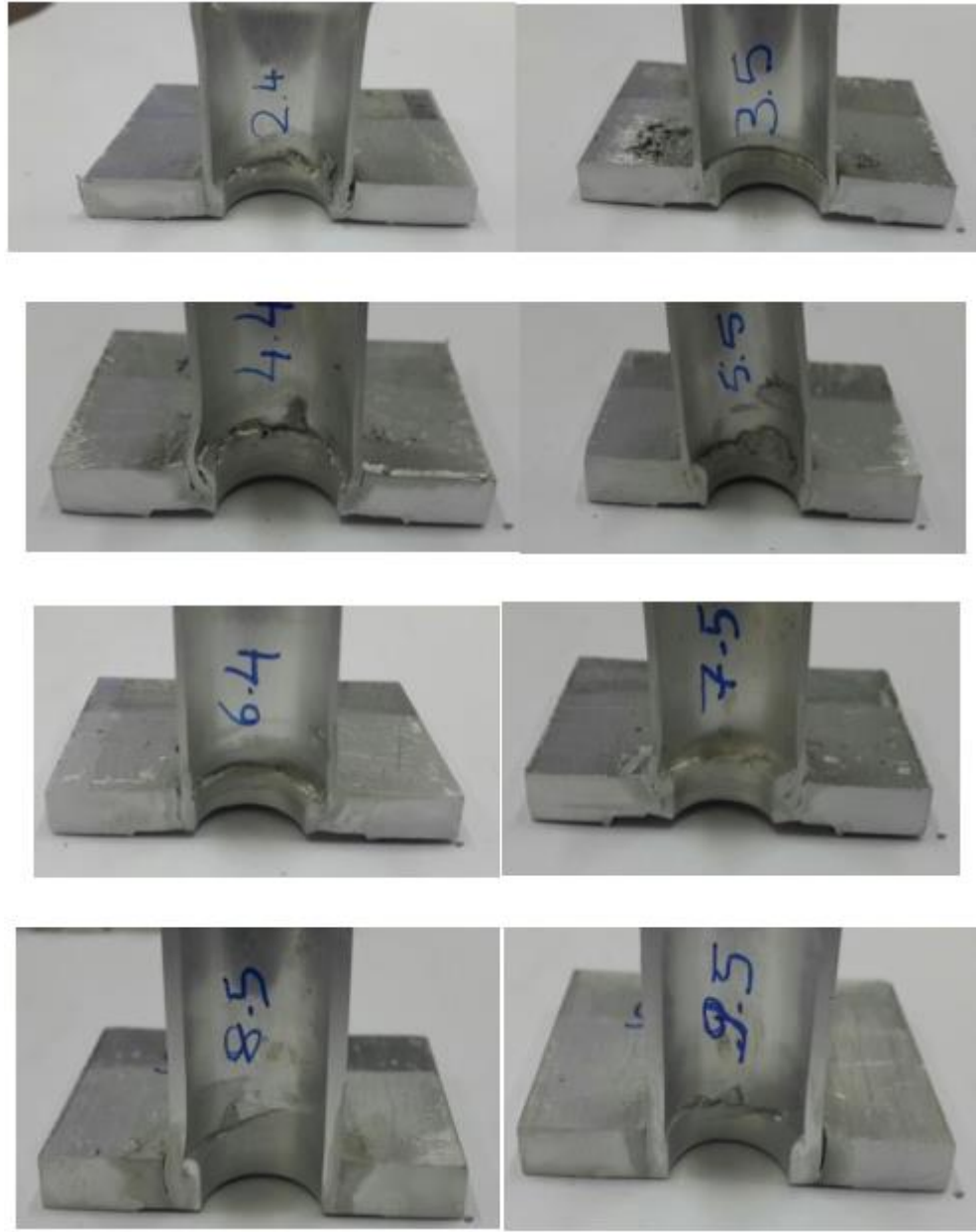
(a)

(b)

Şekil 4.15: (a) Kesme deneyi yapılan alüminyum numune, (b) Kesme deneyi sonrasında kopmuş numune görüntüsü

İçyapı analizi için hazırlanan kaynaklı numuneler makro incelemeler yapılmak amacıyla kesilmiştir. Kesme işlemlerinde Pamukkale Üniversitesi metalografi laboratuvarında bulunan Mecatome adlı cihaz kullanılmıştır. Daha sonra kesilen numuneler üzerinde bulunan çapaklar Mecapol P230 zımpara cihazında zımparalanmıştır. Zımparalama işleminden sonra %10 sodyum hidroksit çözeltisi (10 g sodyum hidroksit (NaOH), 100 ml saf su) hazırlanmış ve numuneler yaklaşık 5 dakika süreyle bu çözelti içerisinde bekletilmiştir. Süre sonunda parçalar etil alkol ile durulanmış ve kurutulmuştur.

Kesme, zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri sonrası bazı numune görüntüleri Şekil 4.16'da verilmiştir. Verilen bu numunelerin kesme dayanımı değerleride Tablo 4.6'da verilmiştir.

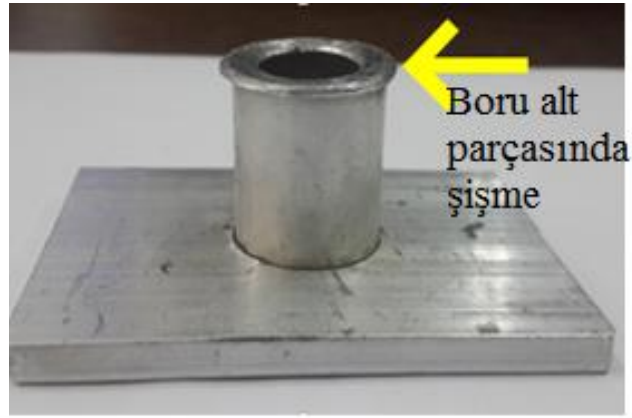


Şekil 4.16: Ön deneyler sırasında kaynaklanmış numunelerin makro dağlama görüntüleri (bkz. Tablo 4.6)

4.4.3 Boru Sabitleme Deliği Açılarak Borunun Merkezlenmesinin DTYSK Yöntemine Etkisi

Deneyler esnasında makro dağlama sonuçları irdelendiğinde bazı numunelerde gözle görülür açıklıkların olduğu görülmektedir. Ayrıca kesilen numunelere bakıldığında ergiyen metalin hacminin bir kısmının boru iç yüzeyine aktığı da görülmektedir. Kaynaklı numunelerden de görüldüğü gibi karşılaşılan bir diğer sorun

ise kaynak esnasında takım dönerken boruya ilk temas sırasında boruyu da bir süreliğine döndürmesi, borunun plaka içerisine tam merkezlenecek konumda durmaması ve bir tarafının plakaya dayanmasıdır. Ayrıca, Şekil 4.17’de görüldüğü gibi borunun numune tutturma aparatına temas ettiği yüzeyinde deformasyon oluşmaktadır. Bu sorunları çözebilmek amacıyla boru üzerine boru sabitleme delikleri açılmıştır. Bu deliklerden bir pim geçirilerek borunun sabitlenmesi sağlanmıştır. Boru sabitleme delikleri kaynak işleminin başlangıcından bitişine kadar boruyu plaka içerisinde merkez konumda tutmakta ve ayrıca borunun dönmesini engellemektedir. Şekil 4.18’de boru sabitleme deliği açılarak yapılmış kaynaklı numune görülmektedir.



Şekil 4.17: DTYSK sırasında kaynaklanan borunun takım tutturma aparatına temas eden yüzeyindeki deformasyon

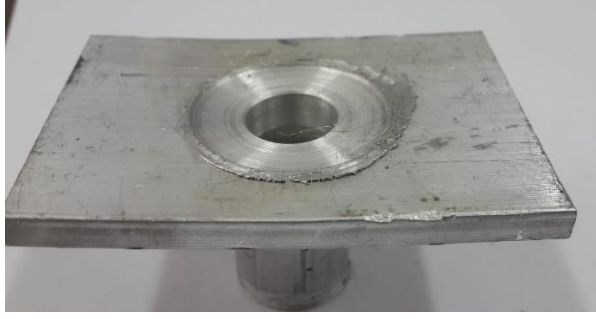


Şekil 4.18: Boru sabitleme deliği açılarak kaynak yapılmış numune

Boru üzerinde sabitleme deliği bulunmasının kaynak üzerindeki olumlu etkilerinden dolayı asıl deneyler esnasında numunelerin tamamına sabitleme delikleri açılmıştır.

4.4.4 Plaka Üzerine Açılan Kaynak Ağzının DTYSK Yöntemine Etkisi

Deneyleer sırasında karşılaştırılan bir diğler parametre ise plaka üzerine kaynak ağzı açılmasının dayanım üzerine etkilerinin incelenmesidir. Kaynak esnasında ergiyen metalin bir kısmı plaka ve boru arasındaki boşluğu doldururken bir kısmı da Şekil 4.19’ da gösterildiğı gibi plaka yüzeyinden dışarıya doğru süpürülmektedir.

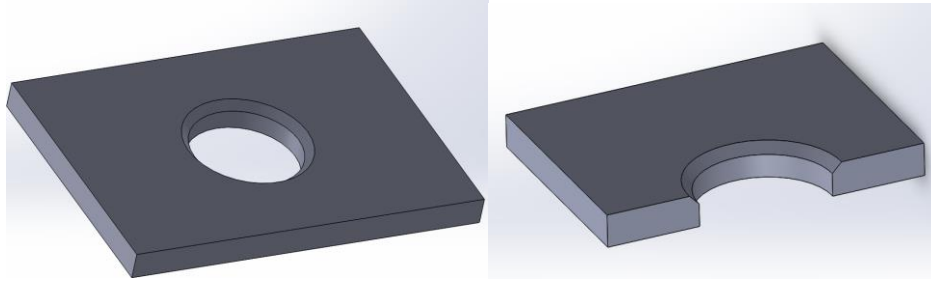


Şekil 4.19: Numune üstünde ergiyen metalin dışarıya doğru süpürülmüş kısmının görüntüsü

Plaka üzerine kaynak ağzı açılması durumunda ergiyen metal hacminin daha fazla kısmı boru ile plaka arasına akarak dolmaktadır. Kaynak ağzları iç çap 21 mm ve dış çap 24 mm olacak şekilde 45°’lik açı ile açılmıştır. Kaynak ağzı açılmış numune görüntüsü Şekil 4.20’de 3 boyutlu gösterimi ise Şekil 4.21’de verilmiştir.

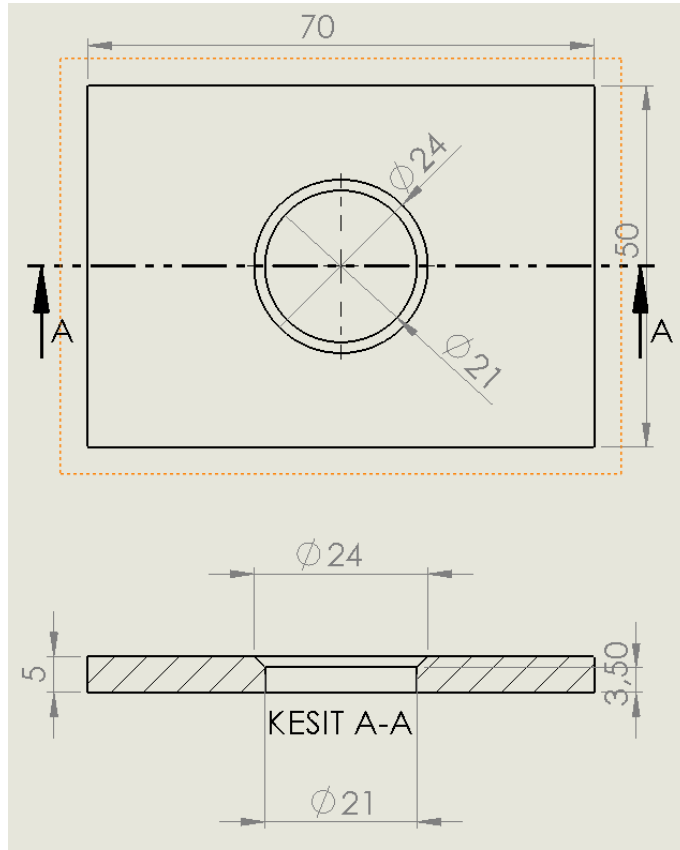


Şekil 4.20: Plaka üzerine kaynak ağzı açılmış numune



(a)

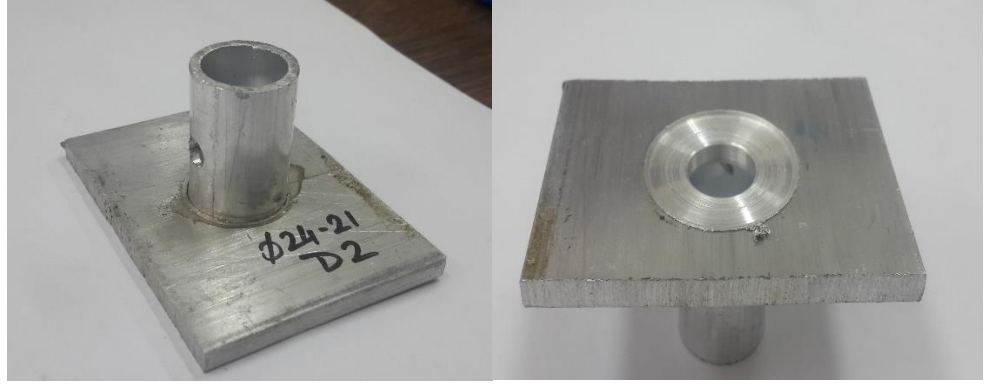
(b)



(c)

Şekil 4.21: DTYSK yönteminde kullanılan plakanın; (a) Kaynak ağzı açılmış hali, (b) Kesit resmi, (c) Teknik resmi

1180 min^{-1} devir sayısı ve 3 mm çıkma yüksekliği parametrelerinde yapılacak olan deneyler için kaynak ağzı açılmak suretiyle dört adet numune hazırlanmıştır. Kaynak ağzı açılarak kaynağı gerçekleştirilen numune Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4.22: Kaynak ağzı açılarak kaynağı yapılmış numune

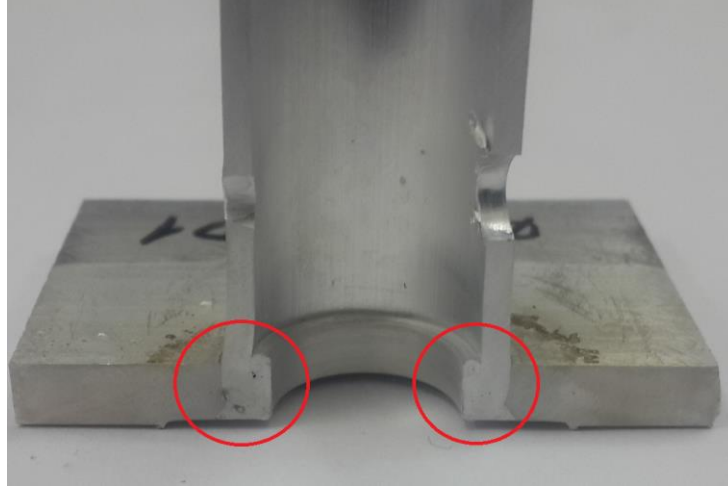
Bu dört numuneden üçü kesme deneyi için diğeri ise makro dağlama yapılmak üzere kullanılmıştır. Kesme deneyi sonuçları değerlendirildiğinde kaynak ağzı açılarak kaynağı gerçekleştirilen numunelerin dayanım değerlerinin % 10 daha yüksek çıktığı görülmüştür. Bu değerler Tablo 4.7' de verilmiştir.

Tablo 4.7: Kaynak ağzı açılarak ve açılmadan kaynağı gerçekleştirilen numunelerin kesme dayanımı sonuçları

Numune Adı	Devir Sayısı (min ⁻¹)	Kaynak Ağzı	Çıkma Yüksekliği (mm)	Kesme Dayanımı (R _{mk})	Kesme Dayanımı ortalaması (R _{mk})	Baskı yükü (ort) (kg)	Sıcaklık °C (ortalama)
N1 24-21	1180	Var	3	51	55	265	440
N2 24-21				57		300	
N3 24-21				58		280	
N 5-1	1180	Yok	3	47	49	265	437
N 5-2				47		270	
N 5-3				53		250	

Kaynak ağzı açılarak kaynağı yapılan numunelerden bir tanesi makro yapı incelemesi için kesilmiştir. Kesilen numune önce zımparalanmış ve daha sonra parlatılmıştır. Parlatma işleminden sonra %10 sodyum hidroksit çözeltisi (10 g NaOH, 100 ml saf su) hazırlanmış ve numuneler yaklaşık 5 dakika süreyle bu çözelti

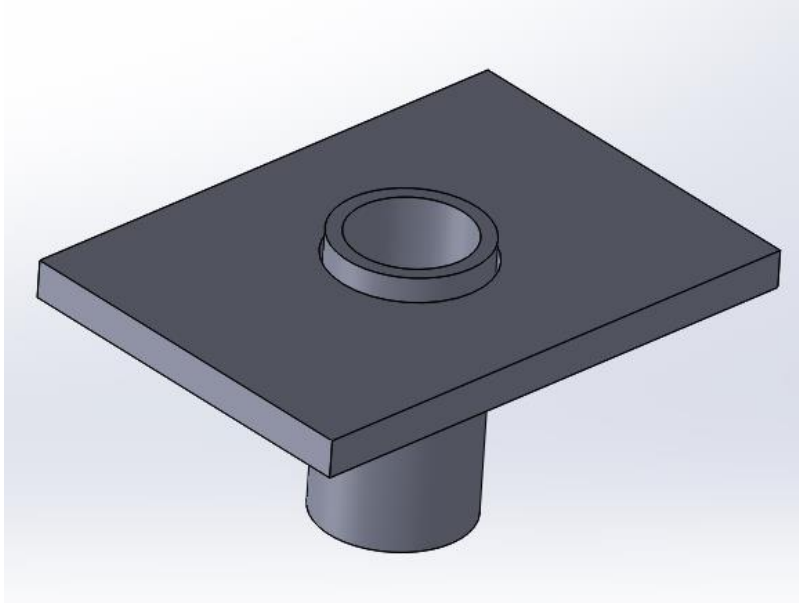
içerisinde bekletilmiştir. Süre sonunda kesilmiş olan parça etil alkol ile durulanmış ve kurutulmuştur. Dağlama sonrası numune incelendiğinde gözle görülür bir açıklık bulunmadığı ve kaynak ağzı açılan bölgeye ergimiş metalin dolduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23: Kaynak ağzı açılarak kaynak yapılmış numunenin kesit görünümü

4.4.5 Borunun Plakadan Çıkma Yüksekliği ve Plaka İle Boru Arası Bırakılan Boşluğun DTYSK Yöntemine Etkisi

Son olarak deneyler sırasında boru ile plaka arasındaki boşluğun kaynak kalitesine etkisi incelenmiştir. DTYSK esnasında takımın sürtünme etkisiyle ergittiği boru malzemesi akarak boru ile plaka arasındaki boşluğu doldurmaktadır. Boru çıkma yüksekliği ergiyen metal hacmini etkilemektedir. Bu ergiyen metal hacmi boru ve plaka arası boşluğu dolduracak miktarda olmalıdır. 3 mm çıkma yüksekliği bulunan numune Şekil 4.24’de gösterilmiştir. Ergiyen metal hacmi eşitlik 4.1 ile hesaplanmıştır. Kaynak ağzı açılmamış halde plaka ile boru arasındaki boşluğun hacmi ise eşitlik 4.2 ile hesaplanmıştır. Boru numunesi ölçüleri ise Şekil 4.25’de verilmiştir.



Şekil 4.24: 3 mm çıkma yüksekliğine sahip numunenin görünümü

$$V_{(erg)} = [\pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot h] \quad (4.1)$$

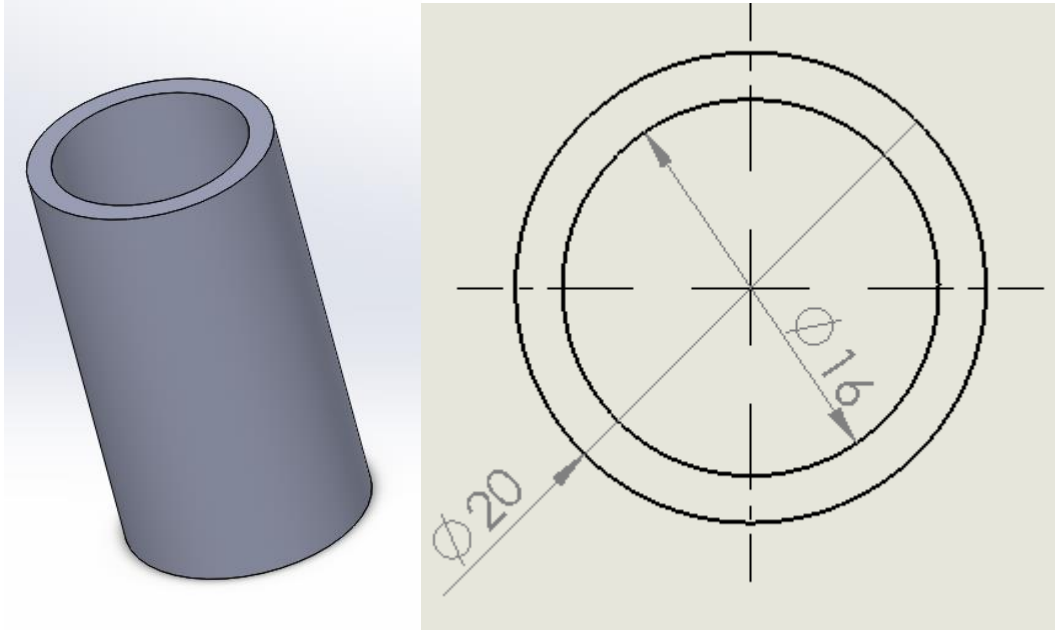
$$V_{(gerekli)} = [\pi \cdot [(D_1)^2 - (D_2)^2] \cdot s] \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.1'deki D borunun dış yarıçapını, d boru iç yarıçapını, h ise çıkma yüksekliğini yani borunun plaka dışında kalan kısmını göstermektedir. Kullandığımız alüminyum borunun ölçüleri Şekil 4.25'de gösterilmiştir. Boru dış çapı 20 mm, iç çapı 16 mm ve çıkma yüksekliği 1 mm, 2 mm ve 3 mm için değerleri Eşitlik 4.1'de yerine koyarsak;

Çıkma yüksekliği 1mm için $V_{erg} = 113 \text{ mm}^3$

Çıkma yüksekliği 2mm için $V_{erg} = 226 \text{ mm}^3$

Çıkma yüksekliği 3mm için $V_{erg} = 339 \text{ mm}^3$ olarak bulunur.



Şekil 4.25: DTYSK yönteminde kullanılan boru numunesi ölçüleri

Eşitlik 4.2'deki D_1 plaka üzerine açılan delik yarıçapını, D_2 boru dış yarıçapını, s ise plaka kalınlığını göstermektedir. Yapılan ön deneyler ve asıl deneyler esnasında boru boyutları dış çap 20 mm, iç çap 16 mm olarak seçilmiştir ve sabit tutulmuştur. Kullanılan plaka ise 5 mm kalınlığında olup üzerine açılan delik çapı için 20, 21, 22 ve 23 mm olarak dört farklı değer seçilmiştir. Burada 20 mm olarak açılan plaka delik çapı eğe yardımıyla biraz genişletilerek ergiyen metalin yaklaşık 0,1-0,2 mm'lik bir boşluktan akması sağlanmıştır. Hesaplarda boşluk 0,1 mm olarak alınmıştır. Plaka ile boru arasındaki boşluk hacmi Eşitlik 4.2 yardımıyla aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

Plaka üzerine açılan delik çapı 20 mm için $V_{\text{gerekli}} = 0,04 \text{ mm}^3$

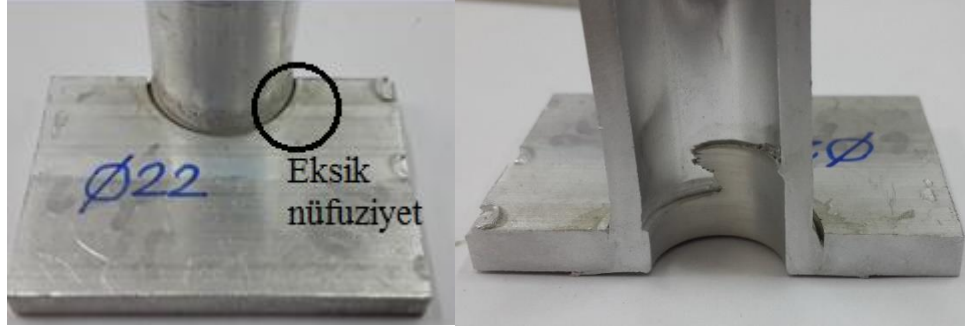
Plaka üzerine açılan delik çapı 21 mm için $V_{\text{gerekli}} = 161 \text{ mm}^3$

Plaka üzerine açılan delik çapı 22 mm için $V_{\text{gerekli}} = 330 \text{ mm}^3$

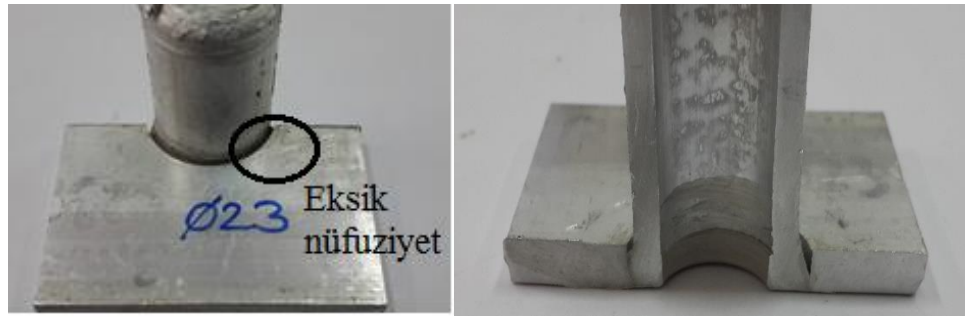
Plaka üzerine açılan delik çapı 23 mm için $V_{\text{gerekli}} = 883 \text{ mm}^3$

Eşitliklerden çıkan sonuçlar teorik sonuçlar olup pratikte ergiyen metal hacminin tamamı plaka ile boru arasındaki boşluğa dolmamaktadır. Bir kısım ergimiş metal dış kısımdan süpürülmekte, bir kısım ergimiş metal ise borunun iç kısmına akmaktadır. Plaka üzerine açılan delik çapının 22 ve 23 mm olması durumunda çıkma yüksekliği 3 mm dahi seçilse ergiyen metalin plaka ile boru arasındaki boşluğu doldurmadığı

yapılan deneyler ile görülmüştür. Plaka üzerine açılan delik çaplarının 22 mm ve 23 mm olduğu durumlarda yapılan kaynaklarda elde edilen numunelerin kesit görüntüleri Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de verilmiştir.



Şekil 4.26: Plaka üzerine açılan delik çapının 22 mm olduğu kaynaklı numunenin kesit görüntüsü



Şekil 4.27: Plaka üzerine açılan delik çapının 23 mm olduğu kaynaklı numunenin kesit görüntüsü

4.5 Asıl Deneyler

Deneyler esnasında elde edilen tüm sonuçlar değerlendirilerek optimum kaynak parametreleri belirlenmiş ve asıl deneyler esnasında bu belirlenen değerler kullanılmıştır. Öncelikle takım baskı yükü değeri 250 kg altında kaldığı durumlarda başarılı kaynak sonuçlarına ulaşamamıştır. Bu nedenle asıl kaynaklar esnasında baskı kuvveti değeri 250 kg değerinin altına düşürülmemiştir.

Takım devir sayısı 1180 min^{-1} seçildiği durumlarda dayanım değeri daha yüksek kaynaklar elde edilmiştir (Bkz. Tablo 4.6). Kaynak süresi ulaşılan sıcaklığa bağlı olarak dönen takımın boru üzerine ilk temasından itibaren yaklaşık 10-15 s olarak belirlenmiştir. 1180 min^{-1} devirde 10 s sonra sıcaklık değeri alüminyumun hamurlaşma sıcaklığı olan yaklaşık $369-431 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ulaşmaktadır. Dolayısıyla asıl deneyler

esnasında kullanılacak devir sayısı 1180 min^{-1} ve kaynak süresi de 10-15 s olarak belirlenmiştir. Sıcaklık değerleri her kaynak işlemi esnasında kontrol edilmiştir.

Boru çıkma yüksekliği parametresi seçilirken de kesme dayanım değerleri karşılaştırılmıştır. 1180 min^{-1} devir sayısında yapılan deneylerde 3 mm çıkma yüksekliğine sahip numunelerin kesme dayanım değerleri daha yüksek çıktığı için asıl deneyler esnasında da 3 mm çıkma yüksekliği olacak şekilde boru numunelerinin uzunlukları 37 mm olarak alınmıştır.

Kaynak kalitesini artırması nedeniyle tüm borulara boru sabitleme deliği açılmıştır.

Deneyler sırasında kaynak ağzı açılan numunelerde kesme dayanımı değerlerinin yüksek çıkmasından dolayı asıl deneyler esnasında numunelere kaynak ağzı açılmıştır. Karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla kaynak ağzı ölçüleri için dört farklı değer seçilmiştir. Numuneler tablo ve şekillerde isimlendirilirken ilk verilen rakam dış çapı, ikinci verilen değer ise iç çapı gösterecek şekilde bir yol izlenmiştir. Örneğin 24-21 olarak adlandırılmış bir numunenin plaka üzerine açılan kaynak deliği ağız ölçüleri dış çap 24 mm'den iç çap 21 mm'ye kadar 45°C 'lik bir açıyla açılacak şekilde hazırlanmıştır. Benzer şekilde asıl deneyler de 25-21, 24-21, 23-21, 22-21 ve 24-20, 23-20, 22-20 ve 21-20 olacak şekilde 21 mm ve 20 mm iç çap için sekiz farklı değer uygulanarak karşılaştırma yapılacaktır.

Plaka üzerine açılan delik çapının 22 mm ve 23 mm olması durumunda boru ile plaka arasındaki boşluğun ergiyen metal tarafından yeteri kadar doldurulamadığı ön deneyler esnasında görülmüştür. Bu sebepten dolayı asıl deneyler esnasında plaka üzerine 20 mm ve 21 mm delik açılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

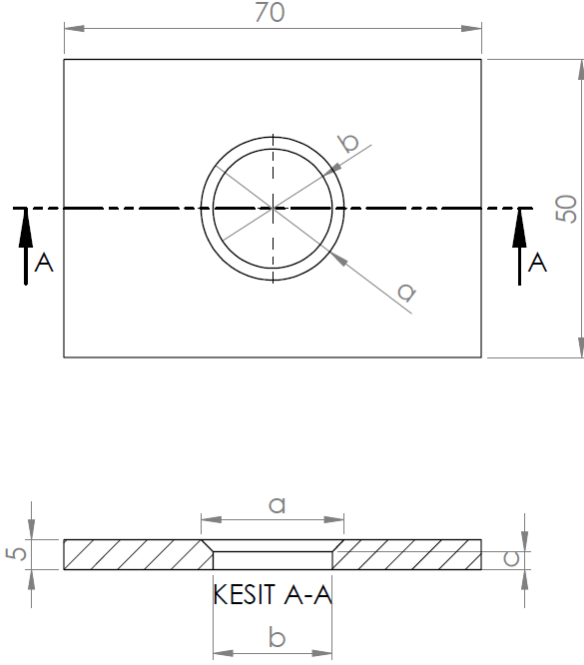
Yapılan bu değerlendirmeler sonucunda belirlenen ve asıl deneyler esnasında kullanılacak olan optimum parametreler Tablo 4.8'de gösterilmiştir.

Tablo 4.8: DTYSK asıl deney parametreleri

Baskı Yüğü (kg)	Devir Sayısı (min ⁻¹)	Sıcaklık (°C)	Çıkma Yüksekliği (mm)	Sabitleme Delikleri	Kaynak Ağızı	Plaka ile boru arası boşluk (mm)
Yaklaşık 250-300	1180	Yaklaşık 450	3	Var	22-21	1
					23-21	
					24-21	
					25-21	
					24-20	0
					23-20	
					22-20	
					21-20	

4.5.1 Numune Hazırlama

Tedarik edilen EN AW-6082-T6 alüminyum plakalar 5x50x70 mm olacak şekilde kestirilmiştir. Daha sonra kesilen plakalar CNC’de Ø20 ve Ø21 mm ölçülerinde tam ortadan delinmiştir. Delik açılan plakalara 45 °C’lik açıyla kaynak ağızları açılmıştır. Kaynak ağızları açılırken kullanılan ölçülerin teknik resmi Şekil 4.28’de verilmiştir. Hazırlanan numune kaynak ağızı ölçüleri ve boşluğu doldurmak için gerekli metal hacmi hesaplanarak Tablo 4.9’da verilmiştir. Deneyler sırasında yapılan kaynaklarda ergiyen metalin boru ile plaka arasındaki boşluğu tam olarak doldurmadığı gözlemlenmiştir. Kaynak ağızı açılmasındaki amaç boru ile plaka arasına dolan ergiyen metal hacmini artırmak ve dayanımı yüksek kaynaklı bağlantılar elde etmektir.



Şekil 4.28: DTYSK yönteminde kullanılan kaynak ağzı açılmış plakanın teknik resmi

Tablo 4.9: DTYSK yönteminde kullanılan kaynak ağzı ölçüleri

a (mm)	b (mm)	c (mm)	Gerekli Metal Hacmi (mm ³)
22	20	4	47
23	20	3,5	89
24	20	3	151
25	20	2,5	233
22	21	4,5	169
23	21	4	195
24	21	3,5	240
25	21	3	305

4.5.2 Hazırlanan Numunelerin DTYSK Yöntemiyle Kaynaklanması

Numuneler istenilen ölçülerde hazırlandıktan sonra kaynak işlemleri her bir parametre için beş adet olmak üzere DTYSK yöntemiyle yapılmıştır. Kaynaklanan beşer numunenin üçü ile kesme dayanımları karşılaştırılmış, kalan iki numune ile de mikro ve makro yapıların incelenmesi yapılmıştır. Tüm kaynaklar esnasında uygulanan baskı kuvvetleri kaydedilmiştir. Elimizdeki mevcut sistem ile baskı

kuvvetinin her kaynakta tam olarak aynı olması sağlanamamıştır. Ancak oluşan farklar kaynak esnasında tolere edilebilecek seviyede kalmıştır. Çünkü her kaynak esnasında aynı zamanda sıcaklık ölçümleri de yapılmış ve her kaynak işleminde yaklaşık 440°C'ye ulaşılmıştır. Şekil 4.29'da kaynak ağzı açılarak kaynaklanmış numuneler görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.29: Kaynak ağzı açılarak kaynaklanmış numunelerin, (a) Üst görünüşü, (b) Alt görünüşü

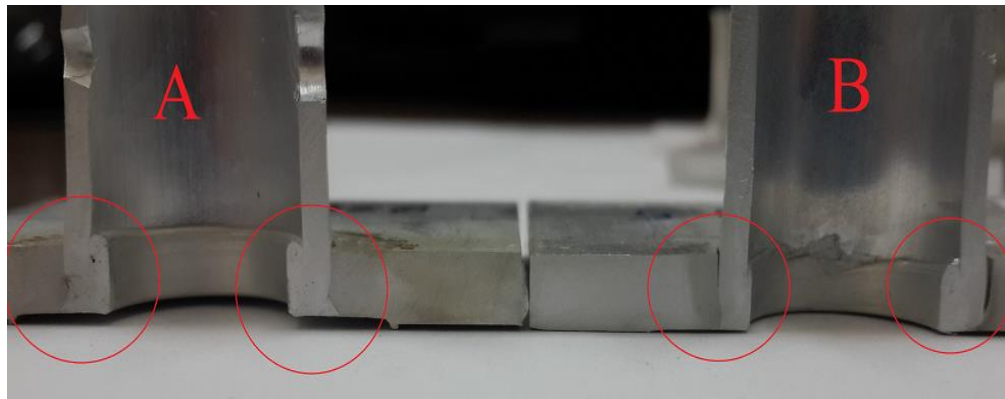
4.5.3 Kesme Deneyi Sonuçları

Kesme dayanımları sonuçları Tablo 4.10'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde plaka ile boru arasındaki boşluğun azalması durumunda yapılan kaynakların kesme dayanımı değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. En yüksek kesme dayanımı değeri 61 MPa olarak dış çap 22 mm ve iç çap 20 mm ölçülerinde olan numunelerin kaynaklarından elde edilmiştir.

Tablo 4.10: Asıl deneylerin sonuçları

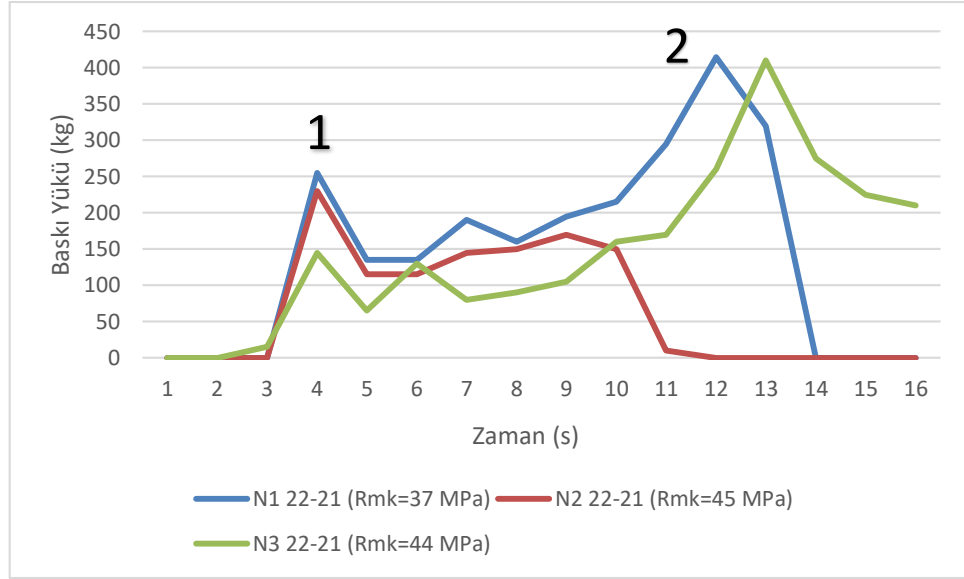
Numune Adı	Kesme Dayanımı (R _{mk})(MPa)	Kesme Dayanımı (ortalama) (R _{mk})(MPa)	Baskı yükü (ort) (kg)	Devir Sayısı (min ⁻¹)	Çıkma Yüksekliği (mm)	Sıcaklık °C (ortalama)
N1 22-21	37	42	320	1180	3	440
N2 22-21	45		270			
N3 22-21	44		300			
N1 23-21	53	49	300			
N2 23-21	46		320			
N3 23-21	49		360			
N1 24-21	51	55	265			
N2 24-21	57		300			
N3 24-21	58		280			
N1 25-21	36	33	305			
N2 25-21	32		325			
N3 25-21	32		305			
N1 22-20	63	61	320			
N2 22-20	58		300			
N3 22-20	61		290			
N1 23-20	59	59	320			
N2 23-20	53		320			
N3 23-20	64		310			
N1 24-20	56	54	310			
N2 24-20	48		305			
N3 24-20	59		315			
N1 25-20	55	55	300			
N2 25-20	56		320			
N3 25-20	56		330			

Kaynak ağzı açılmış numunelerin kesme dayanımı değerleri kaynak ağzı açılmayan numunelere göre ortalama 10 MPa daha yüksek çıkmıştır. Buradan kaynak ağzı açmak suretiyle plaka ile boru arasına daha fazla miktarda dolan ergiyen metal hacminin daha yüksek dayanımlı bir bağlantı sağladığı sonucuna ulaşılabilir. Ön deneyler esnasında yapılan incelemelerde ergiyen metalin plaka ile boru arasındaki boşluğa tam olarak dolmadığı gözlemlenmiştir. Aradaki boşluğun dolmasına engel olan durumlardan biri kaynak esnasında borunun üst yüzeyine uygulanan baskı kuvvetinin borunun alt yüzeyinin temas ettiği numune tutturma aparatı tarafından bir tepki kuvveti oluşturmasına neden olmasıdır. Bu tepki kuvveti boru et kalınlığının az olması sebebiyle boruyu şişirmekte ve bunun sonucunda plaka ile boru arasındaki boşluk kapanarak ergiyen metalin bu kanaldan akması engellenmektedir. Boru alt yüzeyindeki tepki kuvvetini azaltmak amacıyla boru sabitleme deliği açılıp borunun alt yüzeyinin tutturma aparatı ile olan teması azaltılmış ve aynı zamanda borunun takımla birlikte dönmesi engellenmiştir. Bir diğer durum ise ergiyen metal hacminin bir kısmının içeri akması, bir kısmının da kaynak esnasında dışarı süpürülmesi nedeni ile azalmasıdır. Bu sorunu çözmek amacıyla ergiyen metal hacminin daha büyük bir kısmının boru ile plaka arasına dolmasını sağlamak için plaka üzerine kaynak ağzı açılmıştır. Boru sabitleme delikleri ve kaynak ağzı açıldıktan sonra dağlanmış numunelerde yapılan gözlemlerde plaka ile boru arasındaki boşluğun daha fazla dolduğu görülmektedir (Şekil 4.30).



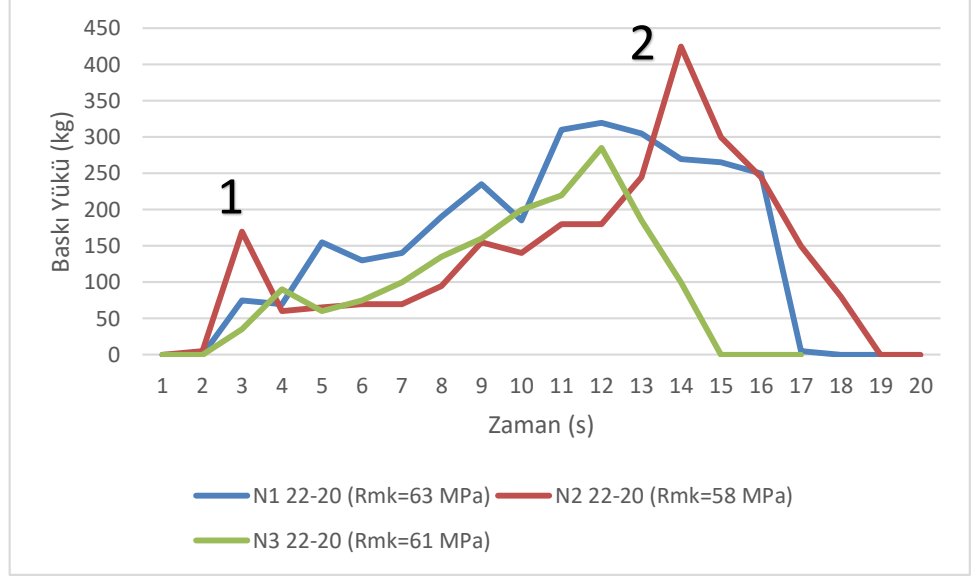
Şekil 4.30: Sabitleme deliği ve kaynak ağzı açılan (A) ve sabitleme deliği ve kaynak ağzı açılmayan (B) numunelerdeki plaka-boru arası açıklık farkı

Deneysel esnasında uygulanan baskı yükü-zaman grafikleri Şekil 4.31’de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde kuvvetin ilk artış bölgesi (1 numaralı bölge) takım omzunun boruya teması ve ikinci ani artış bölgesi (2 numaralı bölge) ise takım omzunun plaka üzerine teması olarak söylenebilir.



Şekil 4.31: N22-21 numaralı numunenin baskı kuvvetinin kaynak esnasındaki değişimi

Her ne kadar numuneler aynı boyutlarda hazırlanarak deneyler yapılmış olsa da aynı grup içerisinde baskı yükü-zaman eğrilerinde sapmalar gözlemlenmektedir. Bu durumun kaynak işleminin manuel kontrol edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.32’de görüleceği gibi N2 22-21 numaralı numunenin kaynağında daha az bir baskı yükü uygulanmasına rağmen mekanik özelliklerinin diğer numunelerle kıyaslandığında pek değişmediği görülmektedir. N22-20 numaralı numune içinde aynı durum söz konusudur (Şekil 4.32). Bunların sonucu olarak kaynak süresince meydana gelen baskı yükü dalgalanmalarının mekanik özellikleri pek değiştirmedikleri sonucuna ulaşılabilir.



Şekil 4.32: N 22-20 numaralı numunenin baskı kuvvetinin kaynak esnasındaki değişimi

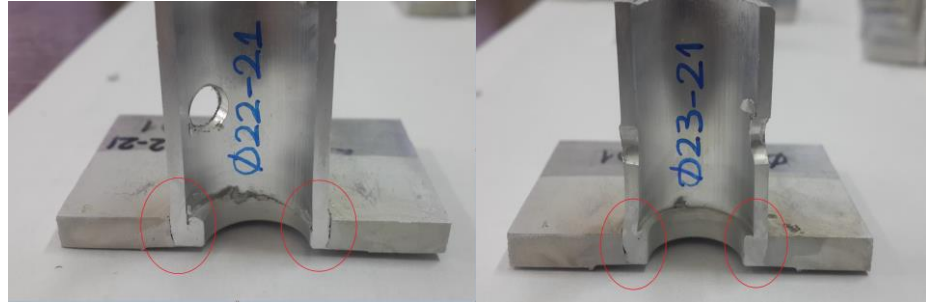
4.5.4 İçyapı Analizleri

4.5.4.1 Makro Dağlama Analizleri

Hazırlanan kaynaklı numuneler kaynak yapılan kısımlarının daha iyi görülebilmesi amacıyla ortadan kesilmiştir. Ortadan kesilen numuneler makro dağlama çözeltilerinde belirlenen süre kadar bekletilmiş ve kaynak bölgelerindeki yapı gözle görülür hale getirilmiştir. Kesme işlemleri için Mecatome adlı cihaz kullanılmıştır. Numuneler kesildikten sonra çapakların temizlenmesi amacıyla sırasıyla 400-600-800-1200 numaralı zımpara kağıtları yardımıyla kaynak yüzeyleri zımparalanmıştır. Zımparalama işleminden sonra %10' luk sodyum hidroksit çözeltisi (10 g NaOH, 100 ml saf su) hazırlanarak numuneler 5 dakika süre ile bu çözelti içerisinde bekletilmiştir. Süre sonunda numuneler etil alkol ve saf su ile durulanmıştır. Bu işlemlerden sonra kaynak birleştirme yerleri gözle görülür hale gelmiştir.

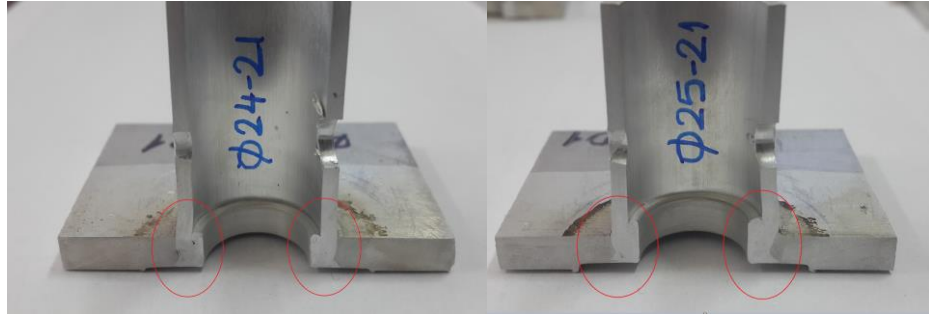
Numuneler incelendiğinde bazı numunelerin birleşme yerlerinde gözle görülür şekilde açıklıklar bulunurken bazı numunelerde ise tam bir birleşmenin sağlandığı görülmektedir. Ayrıca dağlama sonrası kaynak ağzı açılmış bölgeler de gözle görülür hale gelmiştir. Ergiyen metal hacminin bir kısmının da boru içerisine aktığı

gözelemlenmektedir. Şekil 4.33 a-d’de plaka çapının 21 mm olduğu ve dört farklı ölçüde kaynak ağzı açılmış numuneler gösterilmiştir.



(a)

(b)



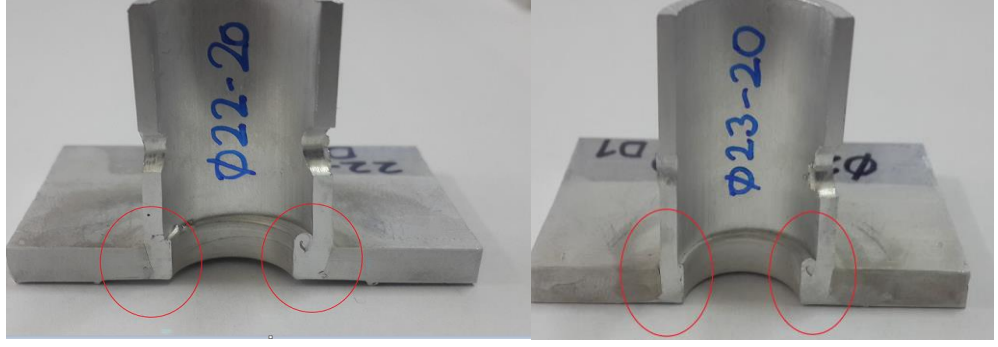
(c)

(d)

Şekil 4.33: 21 mm çaplı plakada kaynak ağzının makro dağlanmış durumları

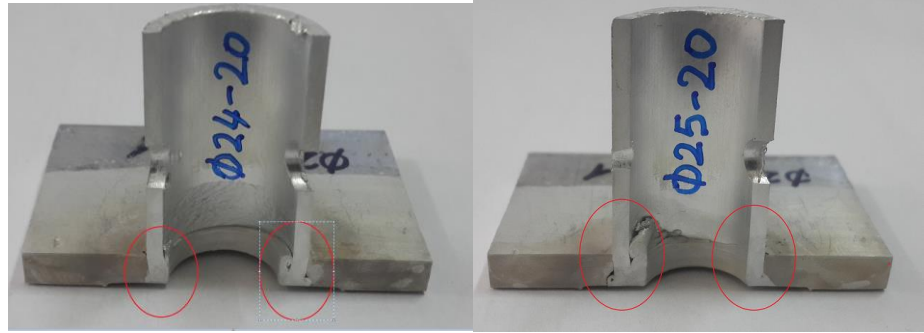
Numuneler tek tek incelendiğinde Ø22-21 ve Ø23-21 numaralı numunelerde gözle görülür açıklıklar bulunmakta, Ø24-21 ve Ø25-21 numaralı numunelerde ise kaynak hatası görülmemektedir.

Şekil 4.34 a-d’ de ise plaka çapının 20 mm olduğu ve dört farklı ölçüde kaynak ağzı açılarak kaynaklanmış numuneler gösterilmiştir. Açılan kaynak ağzı çapının büyük olduğu durumlarda gözle görülür açıklıklar bulunurken kaynak ağzı çapının küçük olduğu durumlarda kaynak hatası görülmemektedir.



(a)

(b)



(c)

(d)

Şekil 4.34: 20 mm çaplı plakada kaynak ağzının makro dağlanmış durumları

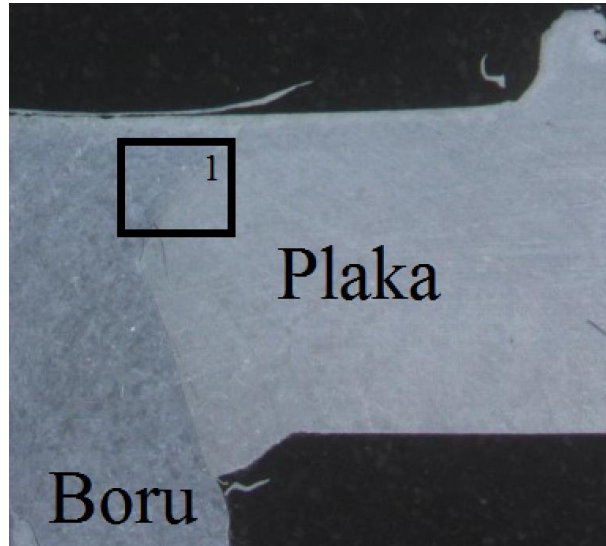
4.5.4.2 Mikro Dağlama Analizleri

Makro dağlama gözlemlerinden sonra mikro dağlama gözlemlerine geçilmiştir. Öncelikle kaynaklı numunelerin kaynaklı birleştirme bölgelerinden bakalit içerisine alınabilecek kadar küçük parçalar kesilmiştir. Kesme işlemlerinden sonra numuneler bakalite alınmıştır. Bakalite alma işlemleri Presi marka bakalit cihazında yapılmıştır. Numuneler bakalite alındıktan sonra zımparalama işlemlerine geçilmiştir. Zımparalama işlemlerinde sırasıyla 200, 400, 800, 1000, 1200, 2000 numaralı zımpara kağıtları kullanılmıştır. Zımparalama işlemlerinden sonra ayna parlaklığında bir yüzey elde etmek ve içyapının güzel görünebilmesi amacıyla parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatma işlemi sırasında parlatma keçesi üzerine 3 µm büyüklüğünde alümina tozları ve yağlayıcı ilavesi yapılmıştır. Parlatma işleminden sonra uygun dağlayıcı çözeltiler hazırlanarak dağlama işlemi yapılmıştır. Dağlama işleminde iki tip çözelti hazırlanmıştır. Öncelikle Keller çözeltisi hazırlanmış ve numuneler Keller çözeltisi içerisinde sırasıyla 20 s, 40 s, 2 min ve 5 min gibi sürelerde bekletilerek içyapı

gözlemlenmeye çalışılmıştır. Keller çözeltisi 2ml hidroflorik asit (HF), 3ml hidroklorik asit (HCl), 5 ml nitrik asit (HNO₃) ve 190 ml saf su ile hazırlanmıştır. Keller çözeltisinden elde edilen içyapı görüntülerinde tane sınırları ortaya çıkmamıştır.

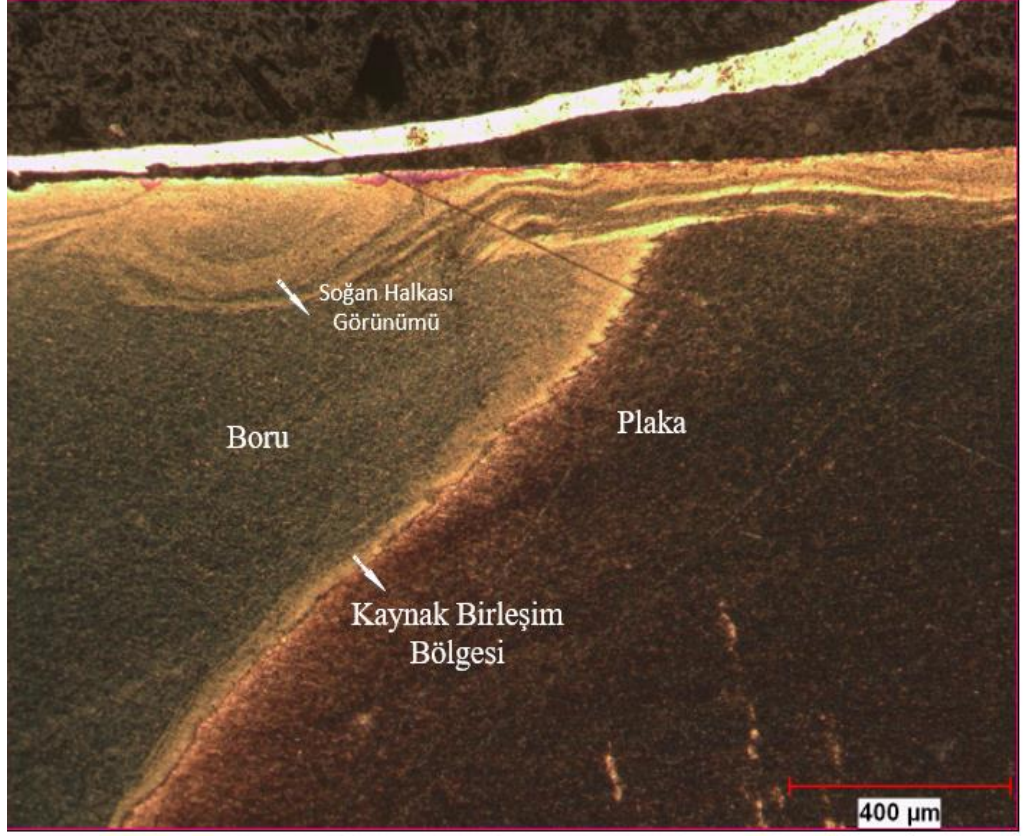
İkinci dağlayıcı olarak Weck çözeltisi hazırlanmıştır. Numuneler çözelti içerisinde 20 s bekletilmiş ve hemen ardından etil alkol ile durularak kurutulmuştur. Weck çözeltisi ile elde edilen içyapı görüntülerinde tane sınırları ortaya çıkmış ve tane büyüklükleri ile ilgili yorum yapılabilmektedir. Weck çözeltisi 4 g potasyum permanganat (KMnO₄), 1 g sodyum hidroksit (NaOH) ve 100 ml saf su ile hazırlanmıştır.

Bakalite alınmış bir numunenin boru ve plaka bölgeleri ile içyapının incelendiği bölge Şekil 4.35’de gösterilmiştir. 1 numara ile gösterilen bölgenin değişik büyütme oranlarındaki içyapı görüntüleri Şekil 4.36, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38’de verilmiştir.

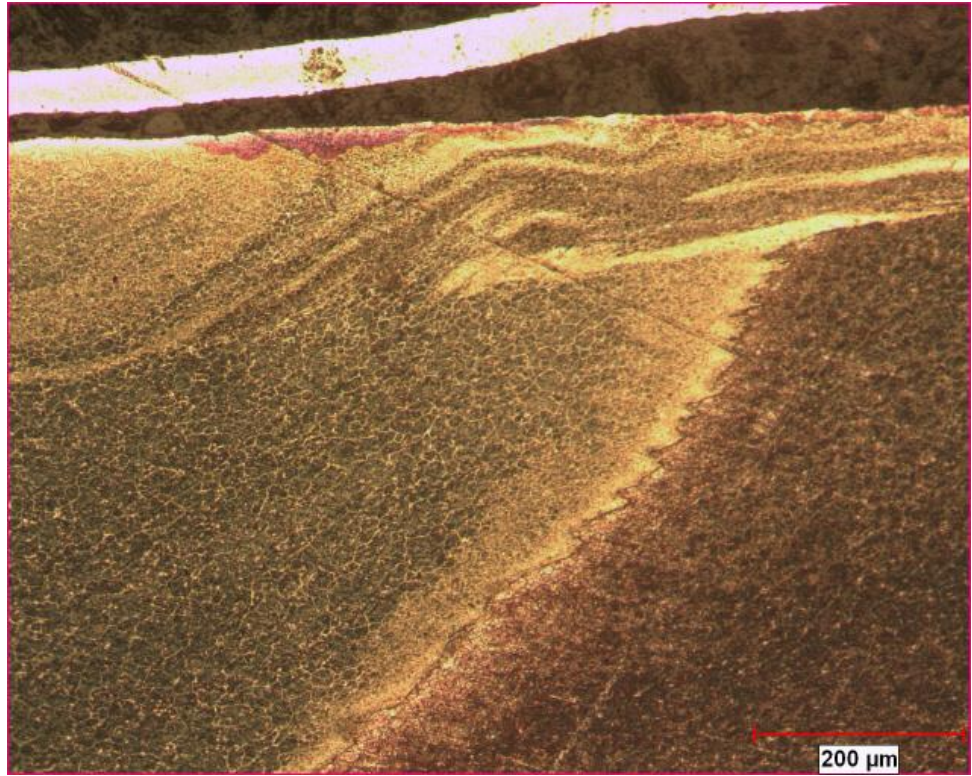


Şekil 4.35: Değişik büyütme oranlarında içyapı görüntüleri alınan kaynak bölgesi

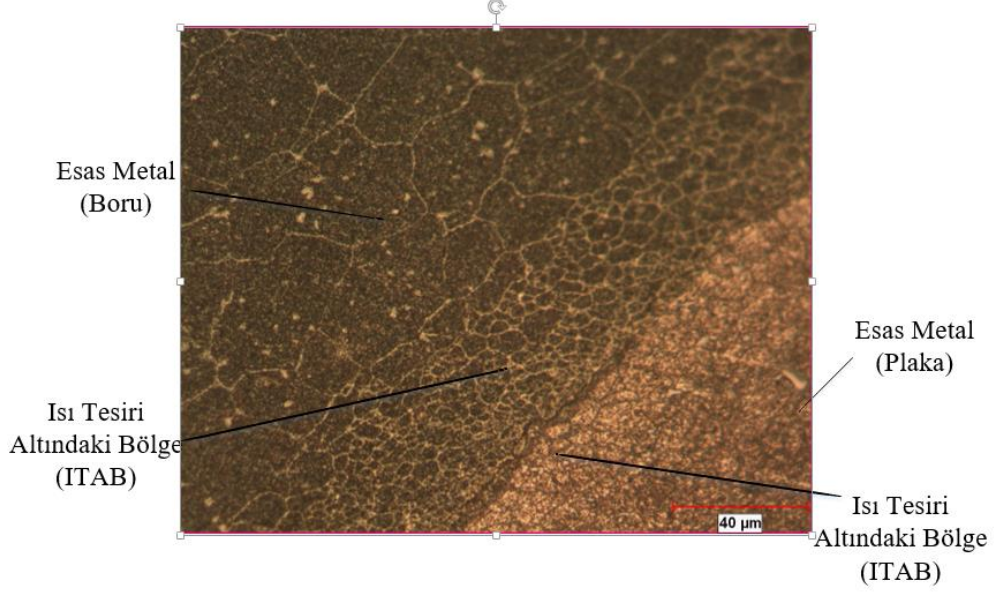
Şekil 4.35’de görüldüğü gibi plaka ile boru birleşim bölgesinde bir açıklık yani kaynak hatası görülmektedir. Ergiyen metal hacminin boru ile plaka arasındaki boşluğu doldurduğu sonucuna ulaşılabilmektedir. Ayrıca kaynak işleminin başladığı üst kısımdaki soğan halkası görünümü olan bölge Şekil 4.36’da net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.36: Kaynak ağzı açılmış numunenin 1 numara ile gösterilen bölgesinin 50x büyütme oranındaki içyapı görüntüsü (bkz. Şekil 4.35)

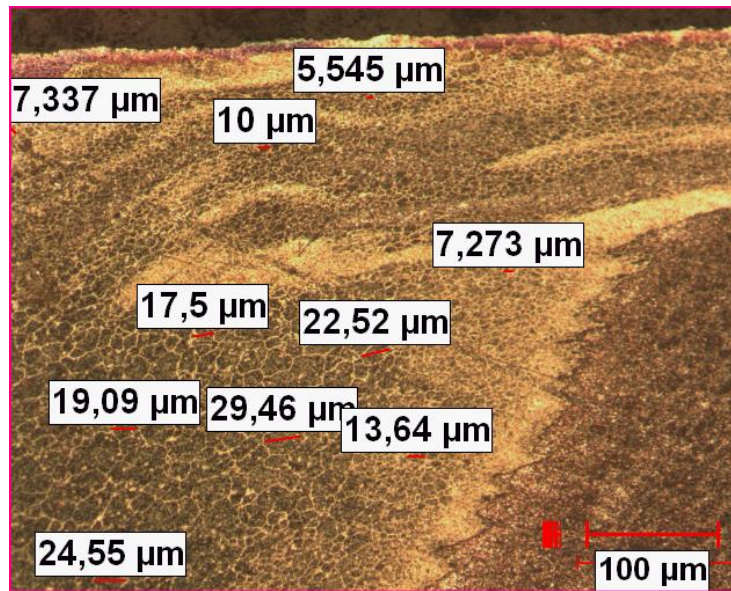


Şekil 4.37: 1 numaralı bölgenin 100x büyütme oranındaki içyapı görüntüsü (bkz. Şekil 4.35)



Şekil 4.38: 1 numaralı bölgenin 500x büyütme oranındaki içyapı görüntüsü (bkz. Şekil 4.35)

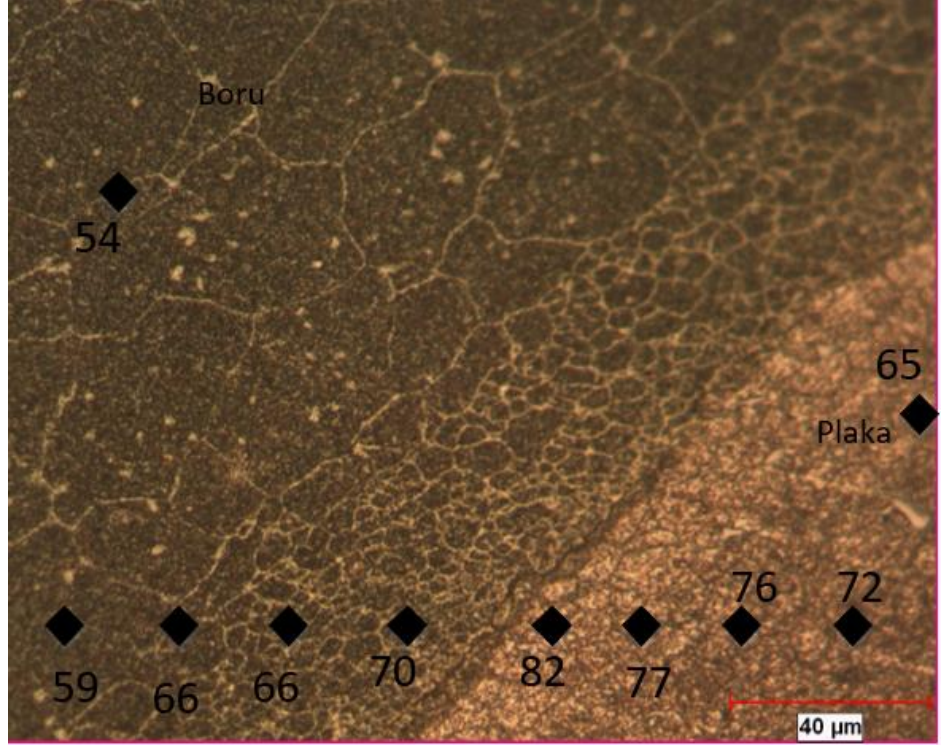
Şekil 4.39'da 200x misli büyütmede tane büyüklükleri verilmiştir. Isı tesiri altındaki bölgede bulunan tanelerin yeniden kristalleşmesi sonucu tane incelmeye uğrayarak esas metalin tane boyutlarından daha küçük boyutlarda olduğu görülmüştür. Ayrıca soğan halkası görünümüne sahip bölgedeki taneler de yeniden kristalleşme sonucu tane incelmeye uğramışlardır. Soğan halkası görünüme sahip bölgede tane büyüklükleri 10 µm altında iken, ITAB bölgesindeki tane büyüklükleri 20 µm altındaki değerlerdedir.



Şekil 4.39: 1 numaralı bölgenin 200x büyütmede tane büyüklükleri (bkz. Şekil 4.35)

4.5.5 Mikro Sertlik Ölçümleri

Mikro sertlik değerleri 20µm aralıklarla ölçülmüş olup değerler Şekil 4.40'da verilmiştir. Plaka mikro sertlik değeri yaklaşık 65 HV0,01, boru mikro sertlik değeri ise yaklaşık 54 HV0,01 çıkmaktadır. Sertlik değerlerinin ince taneli bölgelerde daha yüksek çıktığı görülmektedir (Şekil 4.40).



Şekil 4.40: Mikro sertlik ölçümleri (HV0,01)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 5 mm kalınlığında EN AW-6082 T6 alüminyum alaşımı plaka numuneleri ile Ø20 mm EN AW-6063 T5 alüminyum alaşımı boru numuneleri DTYSK yöntemi ile birleştirilmiştir. Çalışma sırasında öncelikle ön deneyler yapılarak optimum takım baskı kuvveti, devir sayısı ve sıcaklık parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen bu parametreler sabit tutularak borunun plakadan çıkma yüksekliğinin, boru üzerine açılan sabitleme deliklerinin etkisi ve plaka üzerine açılan kaynak ağzının kaynak kalitesine etkilerinin incelenmesi için asıl deneyler yapılmıştır. Optimum kaynak parametreleri mikro gözlemler, makro gözlemler, mikro sertlik değerleri ve kesme dayanımı değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir.

DTYSK yapılacak numuneler belli ölçülerde kesilerek kaynakları başarılı bir şekilde yapılmıştır. Deneyler ön deneyler ve asıl deneyler olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

Ön deneyler esnasında baskı yükünü sabit tutabilmek amacıyla bir deney düzeneği tasarlanmış ve imal edilmiştir. Fakat kullanılan düzenekte yük istenilen şekilde kontrol edilememekte ve takım omzu plaka üzerine kontrolsüz şekilde dalma yapmaktadır. Asıl deneyler esnasında yük el ile manuel olarak kontrol edilmiş ve daha sağlıklı sonuçlar elde edilmiştir.

DTYSK esnasında devir sayısının 950 min^{-1} olduğu ve uygulanan baskı yükünün 200 kg değerinin altında tutulduğu durumlarda sağlıklı kaynaklar yapılamadığı sonucuna ulaşılmıştır. Deneyler esnasında baskı yükü değişik değerlerde alınarak kaynaklar yapılmış ve birbiri arasında çok büyük kesme dayanımı değeri farkları oluşmamıştır.

Takım devir sayısı 950 min^{-1} , 1180 min^{-1} , 1500 min^{-1} olarak seçilerek kaynaklar yapıldığında en yüksek kesme dayanım değerleri 1180 min^{-1} devir sayısında elde edilmiştir. Devir sayısının 1180 min^{-1} olduğu durumda ve 3 mm çıkma yüksekliğine sahip numunelerde ortalama 49 MPa ile en yüksek kesme dayanım değerlerine ulaşılmıştır. Bu dayanım değeri diğer devir sayılarında yapılan numunelerin dayanım değerlerinin yaklaşık %10 ile %20 üstünde bir sonuçtur (Bkz. Tablo 4.6).

Kaynak esnasında sıcaklık değerinin alüminyumun hamurlaşma sıcaklığına ulaştığı durumlarda sağlıklı kaynaklar yapılabilmektedir. Bu sıcaklık değeri yaklaşık olarak 400 °C olarak ölçülmüştür.

Boru üzerine açılan sabitleme deliklerinin borunun takım tutturma tertibatına olan temasını azalttığı ve borunun deformasyona uğramadığı görülmüştür.

Boru ile plaka arasına dolan ergiyen metal hacminin artırılması amacıyla plakalar üzerine kaynak ağzı açılmıştır. Kaynak ağzı açılarak yapılan kaynaklı bağlantıların kesme dayanımı değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Diğer parametreler aynı kalmak şartıyla sadece kaynak ağzı açılan ve açılmayan numunelerde kesme dayanımı değerleri karşılaştırıldığında kaynak ağzı açılan numunelerin kesme dayanım değerlerinin yaklaşık %10 ile %20 arası yüksek çıktığı sonucuna ulaşılmıştır (Bkz. Tablo 4.7)

En iyi kaynak dayanım değeri kaynak ağzı açılarak yapılmış ve boru ile plaka arası boşluğun yaklaşık 0,1 mm olduğu N 22-20 numaralı numune sonuçlarının ortalamasından alınmıştır. Plaka ile boru arasındaki boşluğun az olduğu durumda yapılan kaynakların dayanım değerleri, plaka ile boru arası boşluğun 1 mm olduğu durumdaki kesme dayanım değerlerinden %5 ile %10 daha yüksek çıktığı görülmüştür (Bkz. Tablo 4.10).

Mikroyapı analizleri sonucunda kaynak ara yüzüne yakın bölgelerdeki tanelerin yeniden kristalleşme sonucunda incelendiği gözlemlenmektedir. Esas metalin tane büyüklükleri yaklaşık 25 µm olarak ölçülürken tane incelmeye uğrayan bölgelerde taneler 5µm' ye kadar küçülmüştür (Bkz. Şekil 4.39).

Mikro sertlik ölçümleri sonucunda ise borunun mikro sertlik değeri yaklaşık 54 HV0,01 olarak ölçülürken tane incelmeye uğrayan bölgelerde bu değer 70 HV 0,01'e kadar çıkmaktadır. Benzer şekilde plaka malzemesinin mikro sertlik değeri 65 HV0,01 iken tane incelmeye uğrayan bölgelerde bu değer 82 HV0,01'e kadar çıkmaktadır. Tane incelmeye uğrayan bölgelerde sertliğin yaklaşık %20 ile %30 gibi bir değerde arttığı görülmüştür.

DTYSK yönteminin boruların plakalara kaynağının çok büyük maliyet ve zaman aldığı kazan imalatı sektöründe kullanılabilecek bir yöntem olduğu

görülmektedir. Burada alüminyum alaşımları üzerine yapılan deneyler ilerideki çalışmalarda başta çelik malzemeler olmak üzere bakır, magnezyum vb. gibi alaşımlarla da gerçekleştirmek suretiyle araştırmalar genişletilebilir.

DTYSK yönteminde kullanılan freze yerine daha hafif ve mobil bir sistem imal edilip birçok alanda kullanılabilir.

Bu çalışmada hazırlanan numunelerin kesme dayanımı değerleri çalışılmıştır. Bunun yanında yorulma, sürünme vb. gibi tahribatlı muayene yöntemleri kullanmak suretiyle de çalışmalar yapılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Anık, S., Kaynak Tekniği El Kitabı, Gedik Holding Yayını, 150-153, (1991).
- Ateş, H., Kurt, A. ve Türker, M., “Sürtünme Kaynağı”, Kaynak Teknolojisi II. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, Ankara, 125-132, (1999).
- Balaji, G. K., Muthukumaran, S., Senthilkumaran, S. and Pradeep, A., Optimization of friction welding of tube-to-tube plate using an external tool with filler plate. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(7), 1199-1204, (2011).
- Besharati-Givi, M. K. and Asadi, P. Advances in friction-stir welding and processing. Elsevier. (2014).
- Bilgin, M. B., Meran, C., and Canyurt, O. E., “Optimization of strength of friction stir welded joints for AISI 430 ferritic stainless steels by genetic algorithm”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(9-12), 2221-2233, (2015).
- Brandt, J. L. “Properties of Pure Aluminum”, (ed: J. E. Hatch), Aluminum Properties and Physical Metallurgy, 1-25, (1984).
- Colligan, K. J. “The friction stir welding process: an overview”, (eds: D. Lohwasser and Z. Chen), Friction stir welding, Woodhead Publishing, 15-41, (2010).
- Çam, G., “Sürtünme Karıştırma Kaynağındaki Gelişmeler”, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, Kocaeli, Ankara, 47-64, (2003).
- Demirci, K. M., “Dünya Alüminyum Ticaretinde Türkiye’nin Yeri”, Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği, (2012).
- Fauzi, M. A., Uday, M. B., Zuhailawati, H. and Ismail, A. B. “Microstructure and mechanical properties of alumina-6061 aluminum alloy joined by friction welding”, *Materials and Design*, 31(2), 670-676, (2010).

Habashi, Fathi. "Extractive metallurgy of aluminum", (eds: G. E. Totten and D. S. MacKenzie), *Handbook of Aluminum 2*, USA: 1-45, (2003).

Kaufman, J. G. "Aluminum Alloys", (ed: M. Kutz), *Mechanical Engineers' Handbook*, 59-117, (2006).

Kumar, C. V., Muthukumar, S., Pradeep, A. and Kumaran, S. S. "Optimization study of friction welding of steel tube to aluminum tube plate using an external tool process", *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 6(2), 300-306, (2011).

Kumaran, S. S., Muthukumar, S. and Vinodh, S., "Optimization of friction welding of tube to tube plate using an external tool", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 42(3), 449-457, (2010).

Kumaran, S. S., Muthukumar, S. and Vinodh, S., "Optimization of friction welding of tube to tube plate using an external tool by hybrid approach", *Journal of Alloys and Compounds*, 509(6), 2758-2769, (2011^a).

Kumaran, S. S., Muthukumar, S. and Vinodh, S. "Optimization of friction welding of tube-to-tube plate using an external tool by Taguchi method and genetic algorithm", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 57(1-4), 167, (2011^b).

Kumaran, S. S. and Muthukumar, S., "Effect of projection on joint properties of friction welding of tube-to-tube plate using an external tool", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(9-12), 1723-1733, (2014).

Kumaran, S. S., Muthukumar, S. and Chandrasekhar R. C., "Suitability of friction welding of tube to tube plate using an external tool process for different tube diameters—a study", *Experimental Techniques*, 37(6), 8-14, (2013^b).

Kumaran, S. S., Muthukumar, S. and Chandrasekhar R. C., "Effect of Tube Preparations on Joint Strength in Friction Welding of Tube-to-Tube Plate Using an External Tool Process", *Experimental Techniques*, 37(3), 24-32, (2013^a).

Kumaran, S. S., Muthukumar, S., Venkateswarlu, D., Balaji, G. K., and Vinodh, S., "Eco-friendly aspects associated with friction welding of tube-to-tube plate using an external tool process". *International Journal of Sustainable Engineering*, 5(2), 120-127, (2012).

Küçükömeroğlu, T. and Meran, C., “Takım baskı kuvveti kontrollü sürtünme karıştırma kaynağı” 13th International Materials Symposium, Denizli, 1345-1349, (2010).

Mathers, G., “The welding of aluminium and its alloys”, England, Woodhead publishing, (2002).

Meran, C., Korkmaz, E., Atkanat E. ve Degirmenci, S., “EN AW 6063 Alüminyum Alaşımı Boruların Plakalara Dıştan Bir Takım Yardımıyla Sürtünme Kaynağı Yapılabilirliğinin İncelenmesi”, 4. Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep, s145-156, (2016).

Meran, C., Korkmaz, E., Küçükömeroğlu, T., Aksoy, M.A., Kestel, M. ve Akder, İ., “Boruların Plakalara Dışarıdan Bir Takımla Sürtünme Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi”, IX. Ulusal Kaynak Teknolojileri Kongre ve Sergisi, Ankara, s471-480, (2015).

Mishra, S. R., “Introduction”, (eds: R. S. Mishra and M. W. Mahoney), Friction stir welding and processing, 1-6, (2007)

Muthukumaran, S., Kumar, C. V., Kumaran, S. S. and Pradeep, A., “Interfacial microstructure and strength of friction welding of steel tube to aluminium tube plate using an external tool”, In Advanced Materials Research ,Vol 383, 877-881, (2012).

Muthukumaran, S., Kumaran S. S. and Kumar, S., “Friction welding of Cu-tube to Al-tube plate using an external tool”, Transactions of the Indian Institute of Metals, 64(3), 255-260, (2011).

Sathiya, P., Aravindan, S., Haq, A. N. and Paneerselvam, K., “Optimization of friction welding parameters using evolutionary computational techniques”, Journal of Materials Processing Technology, 209(5), 2576-2584, (2009).

Smith, C. B., and Mishra, R. S., “Friction Stir Processing for Enhanced Low Temperature Formability: A Volume in the Friction Stir Welding and Processing Book Series”, Butterworth-Heinemann, (2014).

Sverdlin A., "Introduction to aluminum", (eds: G. E. Totten and D. S. MacKenzie), Handbook of aluminum: Vol. 1: physical metallurgy and processes (Vol. 1), CRC Press, (2003).

Şahin, M. and Akata, H. E., "Joining with friction welding of plastically deformed steel. Journal of Materials Processing Technology", 142(1), 239-246, (2003).

Şahin, A. Z., Yibaş, B. S., Ahmed, M. and Nickel, J., "Analysis of the friction welding process in relation to the welding of copper and steel bars", *Journal of Materials Processing Technology*, 82(1), 127-136, (1998).

Yilbaş, B. S., Şahin, A. Z., Kahraman, N. and Al-Garni, A. Z., "Friction welding of St-Al and Al-Cu materials", *Journal of Materials Processing Technology*, 49(3-4), 431-443. (1995).

Yüksel, M. ve Meran, C., "Malzeme Bilgisi", TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Yayın No: MMO/545/3, (2016).

7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Emre KORKMAZ
Doğum Yeri ve Tarihi : Kahramanmaraş 01.05.1986
Lisans Üniversite : Süleyman Demirel Üniversitesi
Elektronik posta :ekorkmaz@pau.edu.tr
İletişim Adresi :Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği

Konferans listesi :

- Meran, C., Korkmaz, E., Atkanat E. ve Degirmenci, S., “EN AW 6063 Alüminyum Alaşımı Boruların Plakalara Dıştan Bir Takım Yardımıyla Sürtünme Kaynağı Yapılabilirliğinin İncelenmesi”, 4. Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep, s145-156, (2016).
- Meran, C., Korkmaz, E., Küçükömeroğlu, T., Aksoy, M.A., Kestel, M. ve Akder, İ., “Boruların Plakalara Dışarıdan Bir Takımla Sürtünme Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi”, IX. Ulusal Kaynak Teknolojileri Kongre ve Sergisi, Ankara, s471-480, (2015).