

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA
KAYNAĞINDA KAYNAK PARAMETRELERİNİN DİKİŞ
KALİTESİNE ETKİLERİ

Halil Gökhan ŞANSEVEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmal Usulleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Tolga MERT

Ağustos, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA
KAYNAĞINDA KAYNAK PARAMETRELERİNİN DİKİŞ KALİTESİNE
ETKİLERİ

Halil Gökhan ŞANSEVEN tarafından hazırlanan tez çalışması 01.08.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Tolga MERT

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Tolga MERT, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Tuba KARAHAN, Üye

İstanbul Gedik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Tolga MERT sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Dikiş Kalitesine Etkileri başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Halil Gökhan ŞANSEVEN

İmza



Anneme ve Babama

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez konumu belirlememde bana en başta ışık tutmuş olan Prof. Dr. Selahattin Yumurtacı hocam ve beraber çalışma şansına sahip olduğum Doç. Dr. Tolga Mert hocam başta olmak üzere; teknik manada yardımlarını esirgememiş olan Şevket Tekin hocama, İlhan Makine firmasından sayın Volkan İlhan ve tüm çalışanlarına, Özsel Freze firması sahibi sayın Vesyel Özceylan ve çalışanlarına, sayın Murat Acar'a, Akademi NDT ailesine, Konveyör firmasından sayın Fatih Yenigün, sayın Yunus Özer ve sayın Gürcan Özdemir,e sonsuz teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

Son olarak eğitim hayatım ve diğer tüm konularda her daim bana destek olmuş olan anneme ve babama sonsuz teşekkürler.

Halil Gökhan ŞANSEVEN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
TABLO LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
1 Giriş.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	2
1.3 Hipotez.....	3
2 Alüminyum.....	4
2.1 Genel Bilgiler.....	4
2.1.1 Alüminyum Serileri ve Isıl İşlemleri.....	8
2.1.2 5xxx Serisi Alüminyum.....	10
2.2 Alüminyumun Kaynak Kabiliyeti.....	11
3 Sürtünme Karıştırma Kaynağı.....	13
3.1 Genel Bilgiler.....	13
3.1.1 Kaynak Donanımı.....	14
3.2 Bağlantı Geometrisi.....	21
3.3 Kaynak Değişkenleri.....	21
3.4 Kaynak Bölgeleri.....	24
3.5 SKK Avantajları ve Dezavantajları.....	24

3.6	SKK Kullanım Yerleri.....	26
3.7	Daha Önce Yapılmış Çalışmalara Atıf.....	26
4	Deneysel Çalışma.....	28
4.1	Giriş.....	28
4.1.1	Malzeme.....	28
4.1.2	Takım	28
4.1.3	Tezgah ve Kaynak Tablası.....	28
4.1.4	Deney Parametreleri.....	30
4.1.5	Test Numunelerinin Çıkartılması	31
4.1.6	Çekme Testi	34
4.1.7	Eğme Testi	35
4.1.8	Mikro Sertlik Testi	37
5	Bulgular	38
5.1	Test Sonuçları.....	38
5.1.1	Kaynak Sonrası Görsel İlk Muayene	38
5.1.2	Çekme Testi Sonuçları.....	40
5.1.3	Eğme Testi Sonuçları	41
5.1.4	Mikro yapı İncelemesi	42
5.1.5	Mikro Sertlik Testi Sonuçları	46
5.1.6	Makro Yapı İncelemesi.....	49
6	Sonuç ve Öneriler	50
6.1	Sonuçlar	50
6.2	Öneriler	51
A	Çekme Testi Grafikleri.....	52
	Kaynakça.....	66
	Tezden Üretilmiş Yayınlar	69

SİMGE LİSTESİ

Al	Alüminyum
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit, Alümina
Al ₂ O ₃ .nH ₂ O	Boksit
Ar	Argon
Cu	Bakır
HCl	Hidroklorik Asit
HNO ₃	Nitrik Asit
HF	Hidroflorik Asit
Li	Lityum
Mg	Magnezyum
Mn	Mangan
Si	Silisyum
Zn	Çinko

KISALTMA LİSTESİ

DYKB	Dinamik yeniden kristalleşen bölge
ITAB	Isı tesiri altındaki bölge
MIG	Metal inert gas
SKK	Sürtünme karıştırma kaynağı
SYT	Saat yönü tersi
TIG	Tungsten inert gas
TMEB	Termo mekanik etkilenen bölge

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Alüminyum alaşımlandırma tablosu.....	9
Şekil 2.2	Mg elementinin alüminyum üzerindeki etkisi.....	11
Şekil 3.1	Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK).....	14
Şekil 3.2	Sürtünme karıştırma kaynağı donanımı şeması.....	14
Şekil 3.3	Freze tezgâhından modifiye edilmiş basit tip SKK makinesi (solda) ve büyük ebatlı ve kalınlıktaki parçaların SKK yöntemi ile kaynağına izin veren yeni tip SKK makinesi (sağda).....	15
Şekil 3.4	SKK takım örneği.....	16
Şekil 3.5	SKK uç geometri örnekleri.....	17
Şekil 3.6	Farklı geometrideki SKK takım omuz ve karışım odaları.....	19
Şekil 3.7	Esnek altlık.....	20
Şekil 3.8	Kamalı altlık.....	20
Şekil 3.9	Özel altlık.....	20
Şekil 3.10	Bağlantı geometri tipleri.....	21
Şekil 3.11	SKK yönteminde oluşan kaynak bölgeleri.....	24
Şekil 4.1	Takım (konik) teknik resmi.....	29
Şekil 4.2	Freze tezgâhı ve kaynak tablası.....	30
Şekil 4.3	Test numunelerinin çıkartıldığı bölgeler.....	32
Şekil 4.4	Freze ile işleme sonrası numunelerin durumu.....	33
Şekil 4.5	Çekme testi numunesi teknik resmi.....	34
Şekil 4.6	Besmak 600 kN servo hidrolik çekme testi cihazı.....	35
Şekil 4.7	Eğme testi numunesi teknik resmi.....	36
Şekil 4.8	Eğme test cihazı.....	36
Şekil 4.9	Mikro sertlik ölçüm cihazı.....	37

Şekil 5.1	Farklı parametreler ile kaynak edilmiş levhalar	38
Şekil 5.2	Çekme testi numunelerinin test sonrası yüzey ve kesit görünüşleri	40
Şekil 5.3	Kep eğme yapılmış test numuneleri	42
Şekil 5.4	Kök eğme yapılmış test numuneleri	42
Şekil 5.5	1-9 nolu numune giriş-çıkış tarafı (ITAB-TMEB-DYKB)	43
Şekil 5.6	Bazı numunelerin ölçülmüş mikro sertlik değerleri	46
Şekil 5.7	Kaynak edilmiş olan her bir levhanın makro yapı görüntüleri	49
Şekil A.1	Çekme eğrisi 11 nolu numune	52
Şekil A.2	Çekme eğrisi 12 nolu numune	53
Şekil A.3	Çekme eğrisi 13 nolu numune	53
Şekil A.4	Çekme eğrisi 21 nolu numune	54
Şekil A.5	Çekme eğrisi 22 nolu numune	54
Şekil A.6	Çekme eğrisi 23 nolu numune	55
Şekil A.7	Çekme eğrisi 31 nolu numune	55
Şekil A.8	Çekme eğrisi 32 nolu numune	56
Şekil A.9	Çekme eğrisi 33 nolu numune	56
Şekil A.10	Çekme eğrisi 41 nolu numune	57
Şekil A.11	Çekme eğrisi 42 nolu numune	57
Şekil A.12	Çekme eğrisi 43 nolu numune	58
Şekil A.13	Çekme eğrisi 51 nolu numune	58
Şekil A.14	Çekme eğrisi 52 nolu numune	59
Şekil A.15	Çekme eğrisi 53 nolu numune	59
Şekil A.16	Çekme eğrisi 61 nolu numune	60
Şekil A.17	Çekme eğrisi 62 nolu numune	60
Şekil A.18	Çekme eğrisi 63 nolu numune	61
Şekil A.19	Çekme eğrisi 71 nolu numune	61

Şekil A.20 Çekme eğrisi 72 nolu numune.....	62
Şekil A.21 Çekme eğrisi 73 nolu numune.....	62
Şekil A.22 Çekme eğrisi 81 nolu numune.....	63
Şekil A.23 Çekme eğrisi 82 nolu numune.....	63
Şekil A.24 Çekme eğrisi 83 nolu numune.....	64
Şekil A.25 Çekme eğrisi 91 nolu numune.....	64
Şekil A.26 Çekme eğrisi 92 nolu numune.....	65
Şekil A.27 Çekme eğrisi 93 nolu numune.....	65



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Alüminyum Alaşım Serileri	8
Tablo 2.2 H temper kodlaması	9
Tablo 2.3 Yaşlandırılabilen alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemler	10
Tablo 4.1 AA 5754 H111'in mekanik özellikleri.....	28
Tablo 4.2 AA 5754 H111'in kimyasal bileşimi.....	28
Tablo 4.3 DIN 2344 sıcak iş takım çeliğinin kimyasal yapısı.....	29
Tablo 4.4 Kaynak parametreleri.....	31
Tablo 5.1 Değişkenleri belirtilen numuneler için çekme dayanımı ve % uzama değerleri.....	41

Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Dikiş Kalitesine Etkileri

Halil Gökhan ŞANSEVEN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Tolga MERT

Alüminyum son dönemlerde endüstride en çok kullanılan metallerden birisidir. Özgül ağırlığının düşük olması, iyi bir korozyon direncine ve görece uygun maliyet ile mukavemete sahip olması nedeniyle ağırlık azaltmanın önemli olduğu sektörler başta olmak üzere pek çok endüstri kolunda kendine yer bulabilmektedir. Alüminyumun kaynağında birçok yöntem kullanılabilmeyle beraber alüminyumun yüksek ısı iletkenliği, ergitme esaslı kaynak yöntemlerinde enerji ihtiyacını arttırmakta ve bu da maliyetin yükselmesine sebep olmaktadır. Ayrıca alüminyumun oksijene olan ilgisi sebebiyle ergimiş bölgenin hava ile teması kaynak dikiş kalitesini olumsuz etkileyeceğinden argon gibi soy bir gaz ile bu temasın engellenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), diğer kaynak yöntemlerine kıyasla görece daha yeni, ihtiyaçları karşılayabilecek bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı, kaynak edilecek parçaların sabit tutulduğu, özel bir takımın yüksek devirlerde döndürülürken

malzeme içine daldırıldığı, sürtünme sayesinde oluşturulan ısı ve mekanik olarak dışarıdan uygulanan baskı kuvvetiyle ergime olmaksızın birleştirmenin sağlandığı bir katı hal kaynak yöntemidir. Bu çalışmada 6 mm kalınlığında 5754 H111 serisi alüminyum sacdan parçalar, DIN 2344 sıcak iş takım çeliğinden imal edilen özel geometrili takım yardımıyla alın altına kaynak edilmiştir. Kaynak parametresi olarak farklı takım devirleri seçilmiş (500, 1000, 1400 dev/dak) ve farklı takım ilerleme hızlarında (112, 210, 270 mm/dak) kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kaynak edilen parçalara çekme ve mikro sertlik testleri yapılarak kaynak dikişinin mekanik dayanımı değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sürtünme karıştırma kaynağı, alüminyum, ilerleme hızı, devir, mekanik test.

Effects of Welding Parameters on Seam Quality in Friction Stir Welding of Aluminum Alloys

Halil Gökhan ŞANSEVEN

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Tolga MERT

Aluminum is one of the most widely used metals in the industry. It can be found in many industries especially in sectors where weight reduction is important because of its low specific gravity, good corrosion resistance and strength with relative low cost. Although many methods can be used in the welding of aluminum, the high thermal conductivity of aluminum increases the energy requirement in fusion based welding methods and this leads to an increase in the cost. In addition, because of the affinity of aluminum to oxygen, contact of the molten area with the air will affect the quality of the weld seam adversely. Therefore, a noble gas like argon has to be used to prevent this contact. As a relatively new welding method, Friction Stir Welding (FSW) has been developed to address these needs. Friction Stir Welding is a solid state welding process. In this process, parts to be welded are fixed and a special tool is penetrated into the parts when it rotates at high revolutions. In this way heat is generated by friction and mechanical force is applied externally at the same time. As a consequence, the parts coalesce with each other without melting. In this study, parts made of 5754 H111 series aluminum sheet of 6 mm thickness were welded

with the help of a tool, which has a special geometry and made of DIN 2344 hot working tool steel. Different tool revolutions were selected as welding parameters (500, 1000, 1400 rpm) and the parts were welded with constant tool feed rate (112, 210, 270 mmpm). Then the welded parts were subjected to tensile and micro hardness tests in order to evaluate the mechanical strength of the weld seam were tested.

Key words: Friction Stir Welding, aluminum, feed rate, revolution, mechanical test.



1.1 Literatür Özeti

Kaynak, birleştirilmek istenen parçaların, ısı veya basınç uygulaması ile bazen de her ikisinin birlikte uygulanmasıyla bir araya getirilmesi olarak tanımlanabilir. Kaynak işlemi için bazı yöntemlerde gaz, toz, tel, örtü gibi yardımcı malzeme kullanılması gerektiği gibi hiçbir yardımcı malzemeye ihtiyaç duyulmayan yöntemler de mevcuttur [1]. Alüminyum düşük yoğunluğu sayesinde hafif olması, işlenebilirliği ve şekil verilebilirliğinin iyi olması, yüksek korozyon direncine sahip olması, geri dönüşümünün kolay ve de verimli olması, doğada en çok bulunan üçüncü element olması gibi birçok olumlu özelliğe sahiptir. Bu sebeplerledir ki alüminyum çelikten sonra endüstride en çok kullanılan metaldir. Alüminyumun endüstrideki kullanım alanları çok geniştir. İnşaat, otomotiv, havacılık, savunma sanayi, ambalaj, elektrik ve elektronik başlıca kullanım alanlarını oluşturmaktadır [2]. Fakat alüminyumu birçok alanda avantajlı konuma getiren yüksek ısıl iletkenlik özelliği kaynak için bir dezavantaj oluşturmaktadır. Endüstride alüminyum kaynağında kullanılan Tungsten Inert Gas (TIG) ve Metal Inert Gas (MIG) gibi ergitme esaslı kaynak yöntemleri ile alüminyum kaynağı, çelik kaynağına göre ortalama üç kat daha fazla enerji kullanımıyla mümkün olmaktadır çünkü bölgesel ergime sağlanması amacıyla yapılan ısı girdisi alüminyumun yüksek ısıl iletkenliği sebebiyle tüm parçaya hızlı bir şekilde yayılmakta ve kaynak edilmek istenilen bölge daha geç ergime sıcaklığına ulaşmaktadır. Bunun yanı sıra yine alüminyumun korozyon direnci için fayda sağlayan oksijene olan ilgisi, kaynak kabiliyeti için bir dezavantaja dönüşmektedir [3]. Bunun sebebi alüminyumun ergime sıcaklığı ile alüminyum oksidin (Al_2O_3) ergime sıcaklığı arasındaki farktır. Alüminyumun ergime sıcaklığı 660 °C iken alüminyum oksidin (Al_2O_3) ergime sıcaklığı 2072 °C tır. Alüminyumun oksijen ile teması kesilmeden ergitme esaslı kaynağının yapılması sağlıklı bir kaynak elde edilmesine engel teşkil etmektedir. Bu sebeple ergitme esaslı

kaynak yöntemleri ile alüminyum kaynağı yapılırken mutlaka kaynak bölgesinin hava ile temasını kesecek koruyucu gaz beslemeli bir yöntem ya da vakum ortamında kaynak şarttır. Vakum ortamında kaynak genel usullere kıyasla fazladan maliyet yaratan bir kaynak yöntemidir. Koruyucu gaz beslemeli gaz altı kaynak yöntemlerinde de kaynak parçası ile herhangi bir reaksiyon oluşturma eğilimi olmayan argon (Ar) gibi soy bir gaz kullanılması zorunludur. Kullanılması zorunlu bu gazlar insan sağlığı açısından zararlı gazlar olup kaynak operatörünün maskesiz kaynak yapması ya da eğer robotik kaynak yapılıyorsa da iyi bir havalandırma olmaksızın görevli personelin kaynak yapılan yer ile aynı havayı soluması mesleki hastalıklara sebep olabilmektedir [4]. Katı hal kaynak yöntemi olan ve 1990 yılında patenti alınmış Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yöntemi birçok avantajı ile iyi bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır [5]. Sürtünme Karıştırma Kaynağı, kaynak edilecek parçaların sabit tutulduğu, özel bir takımın yüksek devirlerde döndürülürken malzeme içine daldırıldığı, sürtünme sayesinde oluşturulan ısı ve mekanik olarak dışarıdan uygulanan baskı kuvvetiyle ergime olmaksızın birleştirmenin sağlandığı bir katı hal kaynak yöntemidir [6]. Bu yöntem, ilave kaynak metaline ihtiyaç duymaması, harici bir ısı kaynağına ihtiyaç duymaması, koruyucu gaz kullanımına ihtiyaç duymaması ve bu nedenlerle de ekstra maliyet yaratmaması sebebiyle hem ekonomik olarak hem de mekanik özellikler açısından ön plana çıkmıştır. Diğer kaynak metotlarına göre yeni olan bu yöntem ile birçok araştırmacı, farklı değişkenler ile çalışmıştır [7]. Bu değişkenler içinde en başta takım devri, takım ilerleme hızı (kaynak hızı), takım dönüş yönü, takım baskı kuvveti, takım açısı, takım geometrisi ve kaynak geometrisi sayılabilmektedir [8].

1.2 Tezin Amacı

Endüstride birçok alanda kullanılan AA 5754 H111 levhalarının, yeni ve ülkemizde pek yaygın olmayan sürtünme karıştırma kaynak (SKK) yöntemi ile birleştirilmesi için uygun parametreleri belirlemeye yardımcı olmak adına bu tez çalışması yapılmıştır. Böylelikle ülkemizde SKK yöntemi kullanımını artırabilmek için uygun kaynak parametreleri seçimi konusunda yol gösterici bir çalışma ortaya konulması hedeflenmiştir.

1.3 Hipotez

Bu çalışma ile AA 5754 H111'in SKK yöntemi ile kaynağında kaynak ilerleme hızının ve takım devir sayısının etkileri ortaya konularak, seçili parametrelere göre en uygun görülen değişkenler ile testler yapılmıştır. Uygun görülen parametreler takım ilerleme hızı için 112 mm/dak, 210 mm/dak ve 270 mm/dak, takım devri için ise 500 dev/dak, 1000 dev/dak, 1400 dev/dak'dır. Bu parametreler ile dokuz farklı çift oluşturularak deneyler yapılmıştır. Yapılan dokuz deneyden üçü esas parametre çiftleridir. Bunlar 500 dev/dak ile 210 mm/dak, 1000 dev/dak ile 112 mm/dak ve 1400 dev/dak ile 270 mm/dak parametreleridir. Diğer altı deneme seçili parametrelerin birbiri ile ilişkilendirilmesinin kolaylaştırılması için test edilmiştir. Bu değerlerin seçimi için referans çalışmalardan edinilen bilgiler ışığında genel olarak 1000 dev/dak takım devri en iyi sonuçların elde edildiği değer olduğu görülmüş ve 1000 dev/dak bu değer altında ve üstünde iki ayrı takım devir değeri daha seçilmiştir. Takım ilerleme hızlarının belirlenmesinde ise tarafımızca yapılan ön denemelerde 0° takım açısıyla yapılan kaynaklarda bile 1000 dev/dak takım devri ile 112 mm/dak takım ilerleme hızı parametre çifti ve 2° takım açısı ile yapılmış denemelerde 1400 dev/dak ile 270 mm/dak takım ilerleme hızı parametre çifti ile mukavemetli bir birleştirme gerçekleştirilebildiğinin görülmesi etkili olmuştur. 500 dev/dak ile 210 mm/dak parametre çiftinin seçiminde ise [41] nolu referanstaki çalışmada elde edilmiş değerler göz önünde bulundurulmuştur. Sonuç olarak yapılan bu çalışmanın merkezine, çekme ve % uzama değerleri için en iyi sonuçların elde edileceği düşünülen parametre çifti olan 1000 dev/dak takım devri ve 112 mm/dak takım ilerleme hızı konularak, referanslar ve deneme çalışmaları ışığında bu değerlerin alt ve üstünde iki farklı parametre çifti daha belirlenerek çalışma yürütülmüştür.

2.1 Genel Bilgiler

Alüminyum mekanik ve kimyasal birçok avantaja sahip olan bir metaldir. Bu avantajlarının yanı sıra alüminyum, doğada en çok bulunan üçüncü element olmasıyla da endüstride çelikten sonra en çok kullanılan metal konumundadır. Alüminyum hali hazırda kullanılan birçok metale göre genç bir metal sayılır. Bunun anlamı diğer birçok metalden daha sonra keşfedilmiş olmasıdır. Alüminyumun varlığı 1808 yılında İngiliz Sir Humphry Davy tarafından tespit edilmesine rağmen mevcut ayırıştırma tekniklerinin yeterince gelişmiş olmaması neticesinde ticari olarak elde edilmesi 1886 yılını bulmuştur. Fransa’da Paul Louis Toussaint Héroult, Amerika Birleşik Devletleri’nde ise Charles Martin Hall birbirlerinden habersiz olarak çalışarak alüminyumu boksit cevherinden ayıştırmışlardır. Bu iki bilim adamı günümüzde Hall-Héroult yöntemi olarak adlandırılan ve halen kullanılan elektroliz yöntemini geliştirmişlerdir. Bu sayede alüminyum ticari bir değer kazanmaya başlamış ve endüstride kullanımı başlamıştır. Gelişen teknoloji ve artan ihtiyaçlar neticesinde yıllar geçtikçe alüminyum üretimi artmıştır. Alüminyumun öneminin fark edildiği ilk büyük olayla ikinci dünya savaşına denk gelmektedir ki bu dönemlerde alüminyum üretimi savaş ortamına rağmen büyük oranda artmıştır. 1900 yılında yıllık üretim 8000 ton, 1913 yılında 65000 ton, 1920 yılında 128000 ton iken 1938 yılında 537000 tona, 1946 senesinde de 681000 tona ulaşmıştır. Yakın geçmişte 2002 yılında 23 milyon tona ulaşan birincil alüminyum üretimi günümüzde 60 milyon tonu geçmiştir. 150 yıllık bile bir ticari geçmişi olmayan alüminyum, insanoğlunun binlerce yıl kullandığı bakır, kurşun, kalay, çinko gibi metallerin yıllık üretim ve kullanımını çoktan geride bırakmıştır. Yıllık çelik üretiminin hala çok gerisinde olmasına karşın elde edilen katma değere bakıldığında 22 milyon ton alüminyumun 150 milyon ton demir çeliğe eşdeğer olduğu görülmektedir (2004 yılı verileri). Alüminyumun doğada birçok bileşiği olmasına

karşın boksit cevheri ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) alüminyum üretiminde kullanılır. Boksit ilk önce alüminaya (Al_2O_3) dönüştürülür. Daha sonra alüminadan alüminyum elde edilir. Kabaca 4 birim boksitten 2 birim alümina, 2 birim alüminadan da 1 birim alüminyum elde edilir [9].

Alüminyumun mekanik ve kimyasal avantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- Düşük özgül ağırlık: Alüminyumun oda sıcaklığındaki özgül ağırlığı $2,71\text{g/cm}^3$ 'tür. Bu değer çeliğin neredeyse üçte biri özgül ağırlık demektir ve ağırlık azaltmanın önem kazandığı yerlerde alüminumu ön plana çıkartmaktadır.
- Yüksek akma ve çekme mukavemeti: Kimi alaşımları uygun ısıl işlemler ile birçok çelikten daha yüksek veya yakın mukavemete sahip olabilmektedir.
- Şekil verilebilme kabiliyeti: Ekstrüzyon, döküm, çekme, dövme, haddeleme gibi imalat yöntemleri ile şekil vermek kolaydır.
- Düşük ergime sıcaklığı: Üretimi için düşük enerji sarfiyatı sağlar.
- Geri dönüşümünün kolay olması: Hurda alüminyumlar kolaylıkla geri dönüştürülebilirler. Bu sayede elde edilen alüminyuma ikincil alüminyum denmektedir. Alüminyumun geri dönüşümü öylesine verimlidir ki aynı miktarda birincil alüminyum üretimi için harcanan enerjinin %5 lik kısmıyla ikincil alüminyum üretimi yapılır ve mekanik olarak aralarında hiçbir fark yoktur.
- Isıl iletkenlik: Alüminyumun yüksek ısıl iletkenliği özellikle soğutma amaçlı parçaların imali için uygundur.
- Elektrik iletkenliği: Günümüzde gelişen teknoloji ile elektrik iletim hatlarında kullanılan bakır tellerin yerini bakır kaplı alüminyum teller almaktadır. Bu şekilde kabloların hem ağırlığı hem de maliyeti azaltılmaktadır.
- Alaşım yapma kabiliyeti: Alüminyum birçok element ile alaşım yapabilmektedir. Endüstride kullanılan alüminyum alaşımı sayısı üç yüzün üzerindedir.
- Korozyon direnci: Alüminyum oksijene ilgisi fazla olan bir elementtir. Atmosfer koşullarında yüzeyinde oluşturduğu alüminyum oksit (Al_2O_3)

tabakasıyla havaya, neme, yağmura, denizelliğe karşı doğal olarak korumaya sahiptir.

- Düşük maliyet: Doğada bulunmasının kolay olması, düşük ergime sıcaklığı ve geri dönüşüm verimliliği vb. özellikleri sayesinde alüminyum birçok metale göre daha ucuzdur.

Alüminyumun kullanıldığı sanayileri aşağıdaki gibi özetleyebiliriz;

- Ambalaj: Gıda korumada alternatifi olan malzemelerin yüksek miktarda malzeme ile sağladığı etkiyi alüminyum mikron düzeyindeki kalınlıklarda sağlamaktadır. Kolay şekil verilebilirliği, hava, ışık, gaz, nem, mikroorganizma geçirmemesi, sıcak ve soğuğa dayanıklılığı, morötesi ve kızılötesi ışınları geçirmemesi gibi özellikleri ile ilaç, yiyecek, içecek sanayinde alüminyum tercih sebebi haline getirir. Ayrıca alüminyumun cilalanabilme, boyanabilme, üzerine baskı yapılabilme ve dayanıklı olması gibi özellikleri de ambalaj sektörü için avantaj sağlamaktadır.
- Elektrik-Elektronik: Elektrik iletiminin yüksek olması sayesinde alüminyum yüksek voltajlı elektrik iletim hatlarında çelik özlü alüminyum teller ve bakır kaplamalı alüminyum teller kullanılmaktadır. Bunlar haricinde yer altı kabloları, elektrik boruları, motor bobin sarımı, motor şasesi, yongalar, transistör soğutucuları, veri kayıt diskleri, cihaz kasaları ve dekoratif aydınlatma gövdelerinde kullanılmaktadır.
- Otomotiv: Bu sektörde yakıt tüketimini düşürmek, güvenlik ve tasarım müşteriler için en önemli tercih sebeplerinden olduğundan düşük yoğunluklu, yüksek mukavemetli ve kolay şekil verilebilir alüminyum büyük avantaj sağlamaktadır. Radyatör, hareket sistemleri, motor gövdesi, vites sistemleri, gövdelerde alüminyum kullanılmaktadır. Yük taşımak için kullanılan büyük araçlar için de hem yük kapasitesini artırmak hem de yakıt tüketimini azaltmak için alüminyum kasalar kullanılmaktadır. Geliştirilen yeni alaşımlar ile ileriki yıllarda alüminyum kullanımı bu sektörde daha da artacağı yapılan araştırmalar ile ortaya konmaktadır.
- Havacılık ve Uzay: Otomotiv sektöründe olduğu gibi güvenlik, yakıt tüketimi, sağlamlık gibi ihtiyaçlar havacılık ve uzay sektörü için de alüminyumun ön

plana çıkartmıştır. Hatta genel yapı parçaları ve ağırlık oranı söz konusu olduğunda hava ve uzay taşıtlarında kullanılan alüminyum yapının büyük bölümünü oluşturmaktadır. Sektörde Al-Cu alaşımları olan duralüminyumlar, yavaş yavaş yerini yaklaşık %15 daha hafif olan Al-Li alaşımlarına bırakmaktadır.

- Demir yolu: Alüminyum günümüzde ihtiyaç haline dönüşen hızlı trenlerin gövde ve şaselerinin imali için kullanılmaktadır.
- İnşaat: Hafiflik, dayanım, uzun ömürlülük ve şekil verilebilirliğinin iyi olması sebebiyle çok çeşitli formlarda üretilebilen alüminyum profil ve bağlama elemanları ile yapı konstrüksiyonları, seralar, çatı, kapı ve pencereler gibi birçok yerde kullanılabilir. Alüminyum kompozit paneller de ayrıca bina giydirme ve cephe kaplamada kullanılmaktadır.
- Gemicilik: Deniz araçlarının küçüklerinde neredeyse her yerinde, yük ve yolcu gemilerinde ise tüm üst yapılarında dayanıklılık, hafiflik ve deniz korozyonuna dayanıklılık gibi nedenlerle tercih edilmektedir. Ayrıca kriyojenik (düşük sıcaklıktaki) gazların denizasırtı taşınmasında kullanılan tankların yapında da kullanılmaktadır.
- Spor donanımı: Tenis raketi, golf sopası, basket potası vs. gibi birçok spor dalında kullanılan donanımlar ve antrenman malzemeleri alüminyumdan üretilmektedir.
- İklimlendirme: Yüksek ısı iletkenliği, hafiflik, kolay şekil verilebilme gibi özellikleri sayesinde alüminyum ısı değişimi ve hava yönlendirme araçlarında kullanılmaktadır.
- Soğutucular: Malzemeleri dondurmak ya da soğuk tutmak için sabit veya portatif ürünlerde kompozit alüminyum sandviç yapılar tercih edilmektedir.
- Ev aletleri: Küçük, karmaşık veya basit şekilli parçaların enjeksiyon döküm yöntemi ile kolayca imal edilebilmesi sayesinde günümüzde evlerde kullanılan birçok elektrikli veya manuel küçük ev aletinin üretiminde alüminyum kullanılmaktadır.
- Tekstil: Gelişen teknoloji ile üretilen alüminyum folyolar özellikle çok soğuk iklimlere uygun yeni nesil dağcı veya kayakçı olarak adlandırılan mont, pantolon ayakkabı gibi giyeceklerin iç astarını oluşturmaktadır. [9]

2.1.1 Alüminyum Serileri ve Isıl İşlemleri

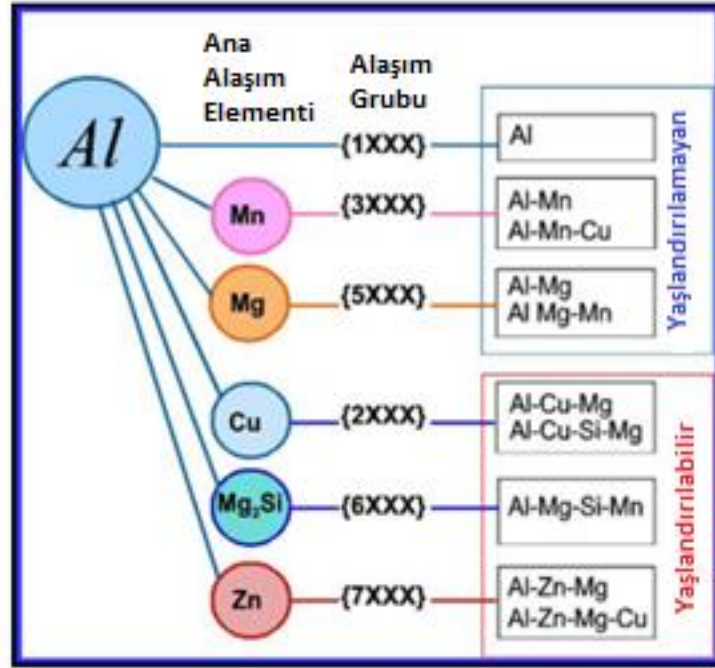
Alüminyum ile en çok alaşım yapan elementler magnezyum (Mg), bakır (Cu), çinko (Zn), silisyum (Si) ve mangandır (Mn). İmal edilme şekillerine göre alüminyum alaşımları dövme ve döküm alaşımı olarak ayrılırlar ve bu alaşımların çoğuna ısıtılma işlemi tabi tutularak mekanik özellikleri iyileştirilebilir. Dövme ürünü alüminyum alaşımlarına uygulanan işlemleri aşağıdaki kısa kodlarla verilmektedir;

- F: Üretimden sonra hiçbir işleme tabi tutulmamış.
- O: Tavlanmış.
- H: Soğuk şekillendirme ile şekil değiştirme sertleşmesi yapılır ve sonrasında mukavemeti bir miktar düşüren ek ısıtılma işlemi uygulanır.
- T: Isıl işleme tabi tutulmuş.
- W: Çözeltiye alma işlemiyle (çökelme sertleşmesi) kendiliğinden yaşlandırılmış [10].

Alüminyum alaşımlarının serilerini Tablo 2.1’de görebiliriz.

Tablo 2.1 Alüminyum Alaşım Serileri [11]

Seri	Ana Alaşım Elementi	Açıklama
1XXX	Saf alüminyum	Elektrik ve kimya endüstrisinde kullanımı yaygındır.
2XXX	Cu	Yüksek mukavemet istenen yerlerde kullanılır.
3XXX	Mn	Boru, sıvı tankı ve mimari uygulamalarda kullanılır.
4XXX	Si	Aşınma direnci ve korozyon dayanımı yüksektir.
5XXX	Mg	Sertlik ve mukavemet Mg oranı ile doğru orantılıdır.
6XXX	Mg-Si	Şekillendirme kabiliyeti yüksek, ekstrüzyona uygun.
7XXX	Zn	En yüksek mukavemete sahip alaşımlardır.
8XXX	Li	Yorulma direnci ve tokluğu iyidir. Maliyeti yüksektir.



Şekil 2.1 Alüminyum alaşımlandırma tablosu [12]

Alüminyum alaşımlarına uygulanabilen ısı işlemleri TX şeklinde kodlanmaktadır. Bu ısı işlemlerin içerikleri Tablo 2.4'teki gibidir.

Tablo 2.2 H temper kodlaması [12]

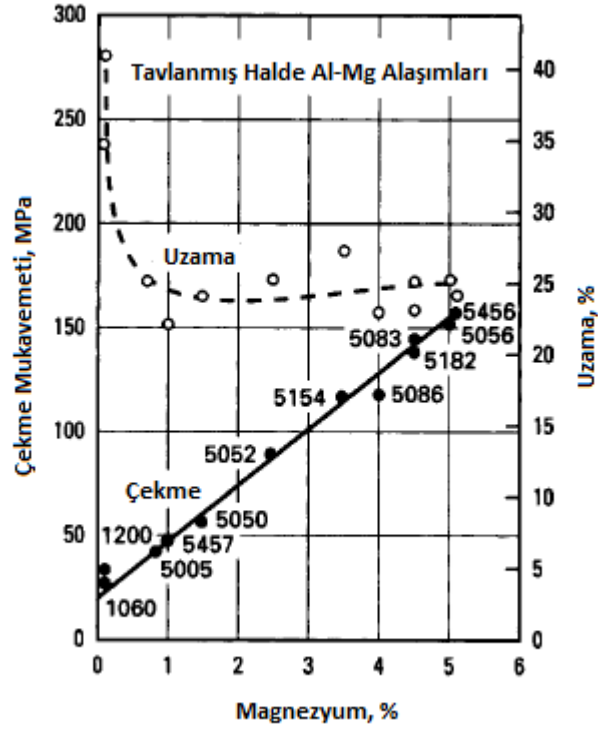
İlk rakam		
H 1	Sadece şekil değiştirme sertleşmesi uygulanmış	
H 2	Şekil değiştirme sertleşmesi ile beraber kısmen tavllanmış	
H 3	Şekil değiştirme sertleşmesi ile beraber normalleştirme tavlama uygulanmış	
H 4	Şekil değiştirme sertleşmesi ile beraber boya fırınında işleme tabi tutulmuş	
İkinci rakam		
HX2	1/4 sertleştirme	NOT
HX4	1/2 sertleştirme	HX(1-3-5-7) kodları ara sertlikleri temsil eder
HX6	3/4 sertleştirme	HX9 ekstra sertleştirilmiş ürünler için kullanılır
HX8	Tam sertleştirme	
Üçüncü rakam		
ör; HX11	O temper ile HX1 temper aralığında hafifçe şekil değiştirme sertleşmesi uygulanmış	
ör; HX112	Mekanik özellikleri limitleri içinde sıcak işlemeye tabi tutulmuş ürün	

Tablo 2.3 Yaşlandırılabilen alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemler [11]

Sembol	Açıklama
T1	Yüksek sıcaklıkta şekil verdikten sonra soğutularak doğal yaşlandırmaya bırakılmış
T2	Yüksek sıcaklıkta şekil verme sonrası soğutulma ardından soğuk şekil verme
T3	Çözeltiye alınmış, soğuk şekil verilmiş sonra doğal yaşlandırmaya bırakılmış
T4	Çözeltiye alınmış ve sonra doğal yaşlandırmaya bırakılmış
T5	Yüksek sıcaklıkta şekil verilip soğumaya bırakılmış ve yapay yaşlandırılmış
T6	Çözeltiye alınmış ve sonra yapay yaşlandırılmış
T7	Çözeltiye alınmış ve sonra aşırı yaşlandırılmış
T8	Çözeltiye alındıktan sonra soğuk şekil verilmiş ve yapay yaşlandırılmış
T9	Çözeltiye alındıktan sonra yapay yaşlandırılmış ve soğuk şekil verilmiş
T10	Yüksek sıcaklıkta şekil verip soğutulduktan sonra soğuk şekil verilmiş ve yapay yaşlandırılmış

2.1.2 5xxx Serisi Alüminyum

5000 serisi alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementi magnezyumdur (Mg). Magnezyumun alüminyum üzerinde mukavemet artırıcı etkisi vardır. Şekil 2.2’de görüldüğü üzere, her ne kadar % uzama kabiliyetini düşürse bile %1 ve üstü Mg miktarı ile % uzama değeri neredeyse sabit kalmakta; bu karşın % Mg miktarı artıkça çekme mukavemeti iyileşmektedir. Isıl işleme tabi tutulamayan 5000 serisi alüminyumların bazı türlerine uygulanan tavlama işlemleri ile çekme mukavemeti özelliklerinin 400 MPa değerinin üzerine çıktığı bilinmektedir. 5000 serisi alüminyum alaşımları işlenebilirlik, soğuk şekil verilebilirlik ve kaynak açısından iyi özellikler sergiler. Ayrıca denizellik etkisine sahip bölgelerde iyi korozyon direnci göstermektedir. Bu sebeple 5000 serisi alüminyum alaşımları, inşaat, dekorasyon, makine gövdesi, gemi, tekne, bot vs. gibi deniz taşıtları, basınçlı kap ve kazanları gibi birçok alanda tercih edilmektedir [13].



Şekil 2.2 Mg elementinin alüminyum üzerindeki etkisi [14].

2.2 Alüminyumun Kaynak Kabiliyeti

Alüminyum oksijene ilgisi fazla olan bir elementtir. Alüminyumun oksijen ile temas etmesiyle yüksek bir hızla Al_2O_3 oluşturmaya meyillidir. Al_2O_3 korozyon şartlarına karşı Al için her ne kadar avantaj sağlıyorsa da kaynak için büyük bir dezavantaj yaratmaktadır. Bunun temel sebebi saf alüminyumun ergime sıcaklığının $660\text{ }^{\circ}\text{C}$, alüminyum alaşımlarının ortalama ergime sıcaklığı $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken Al_2O_3 in ergime sıcaklığının $2072\text{ }^{\circ}\text{C}$ olmasıdır. Bu sebeple Al ve alaşımlarının kaynağından önce kaynak bölgesindeki Al_2O_3 temizlenmeli ve kaynak öyle yapılmalıdır [15].

Yüksek ısı iletim katsayısına sahip alüminyum ve alaşımlarında özellikle ergitme esaslı kaynak yöntemi uygulanacak ise ergime sıcaklığı daha yüksek olan çelik için harcanan enerjiden çok daha fazlasının harcanması gerekir. Isı iletiminin fazla olması geniş bir ITAB bölgesi oluşmasına ve hızlı soğuma neticesinde kaynak bölgesinde gözenek oluşumuna sebebiyet verir [16].

Yüksek ısıl genleşme katsayısına sahip olan alüminyumda kaynak işlemi sonrası çarpılma miktarı ısı girdisi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu çarpılmaların

önlenmesi için gerçekleştirilen tespit işlemi de kaynak sonrası artık gerilmeleri beraberinde getirmektedir [17].

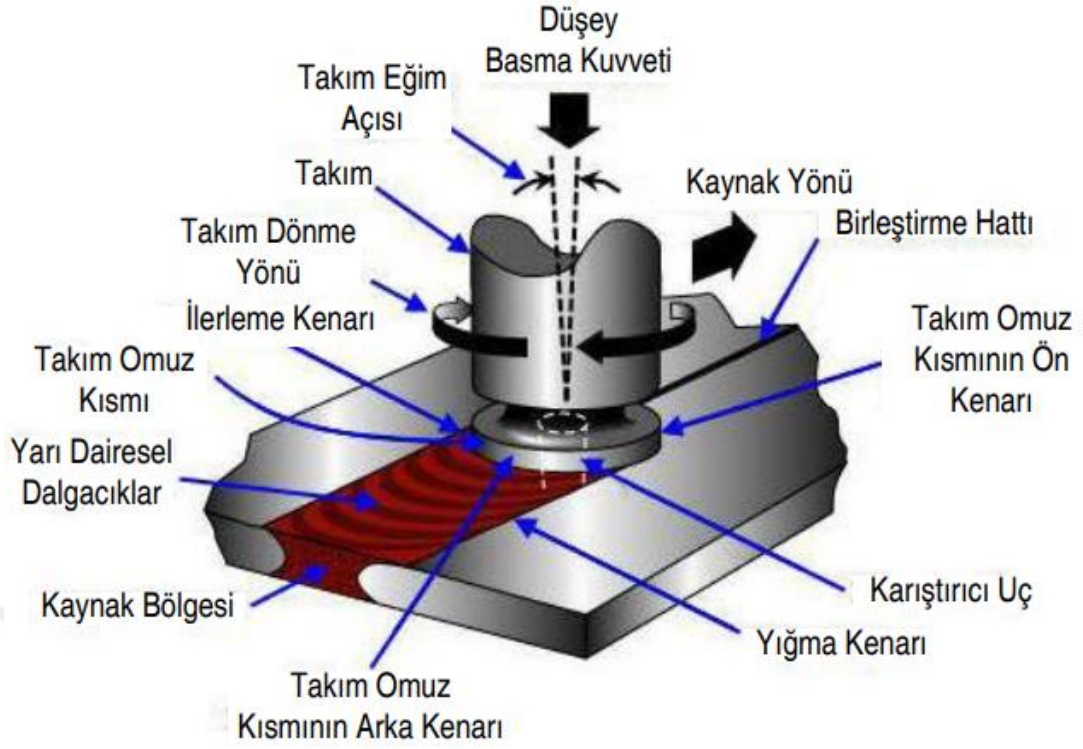
Alüminyumun yüksek elektrik iletkenliği ise elektrik ark kaynağı işlemleri için sorun teşkil etmektedir.

Alüminyumun Mg, Si, Cu ve Mn alaşımlarının katılaşma aralığı geniştir. Bu sebeple bir diğer kaynak problemi olan sıcak çatlama riski ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple kaynak uygulamaları için düşük katılaşma aralıklı Al alaşımları tercih edilmelidir [18].

Hidrojen küçük atom çapı sebebiyle bütün kaynak uygulamalarında sorun teşkil eden bir elementtir. Özellikle ergimiş alüminyum hidrojeni çözebilmekte ve katılaşma ile malzeme içine hapsolan H atomları gözeneklere sebep olmaktadır [19].

3.1 Genel Bilgiler

Katı hal kaynak yöntemi olan ve 1990 yılında patenti alınmış Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yöntemi birçok avantajı ile günümüzde endüstride yaygın olarak kullanılan farklı tip ergitme esaslı kaynak yöntemlerine iyi bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır [20]. Sürtünme Karıştırma Kaynağı, kaynak edilecek parçaların sabit tutulduğu, özel bir takımın yüksek devirlerde döndürülürken malzeme içine daldırıldığı, sürtünme sayesinde oluşturulan ısı ve mekanik olarak dışarıdan uygulanan baskı kuvvetiyle ergime olmaksızın birleştirmenin sağlandığı bir katı hal kaynak yöntemidir [21]. Bu yöntem, ilave kaynak metaline, harici bir ısı kaynağına ve koruyucu gaz kullanımına ihtiyaç duymaması ve bu nedenlerle de ekstra maliyet yaratmaması, diğer yöntemlere kıyasla tek pasoda kalın malzemelerin kaynağına olanak sunması, düşük ısı girdisi ile malzemenin içyapısının bozulmaması gibi sebeplerle hem ekonomik olarak hem de mekanik özellikler açısından ön plana çıkmıştır. Diğer kaynak metotlarına göre yeni olan bu yöntem ile birçok araştırmacı, farklı değişkenler ile çalışmışlardır [22]. Bu değişkenler olarak en başta takım devri, takım ilerleme hızı (kaynak hızı), takım dönüş yönü, takım baskı kuvveti, takım açısı, takım geometrisi ve bağlantı geometrisi sayılabilmektedir [23]. Şekil 3.1’de alın altına tespit edilmiş iki levhanın birleşim çizgisi üzerinde ilerlerken, takımın kaynak edilecek levhaların içinde dönmesiyle oluşan ısı etkisi ile malzemenin yumuşaması ve birbiri ile karışması bu sırada da takım omzunun yarattığı basınç ile kaynağın gerçekleşmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) [24]

3.1.1 Kaynak Donanımı

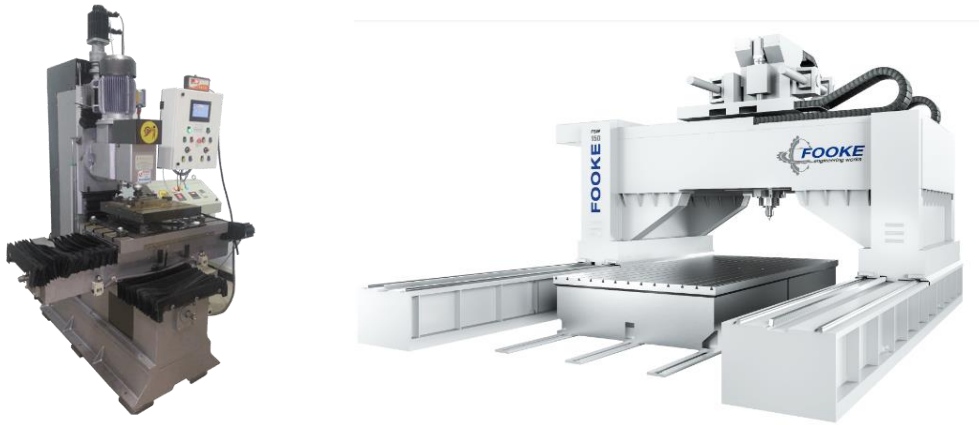
Kaynak makinesi, özel takım, tespit parçası ve altlık SKK yöntemi için gerekli olan donanımı oluşturmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Sürtünme karıştırma kaynağı donanımı şeması [25]

3.1.1.1 Kaynak Makineleri

SKK yöntemi için geliştirilen ilk makineler freze tezgâhlarının modifiye edilmiş halleridir. Bu tezgâhlarda modifiye gereksiniminin sebebi yüksek hassasiyetteki takım ucu batma boyunu ayarlamak için NC veya CNC kontrol ünitesi ve SKK yöntemi için gerekli olan yüksek takım baskı kuvvetini kaldırabilecek yataklamaya ihtiyaç duyulmasıdır. Bu ilk örnekler yöntemin verimliliğini test etmek amacıyla ortaya çıktığı için yalnızca tek eksenle doğrusal kaynak işlemleri mümkündür. SKK yönteminin çalışır olduğu görüldüğünde ise özellikle Avrupa ve Amerika Birleşik Devletlerinde birçok firma ve kuruluş bu yöntem için özel olarak yüksek takım baskı kuvveti sağlayabilecek ve geniş işlem alanına sahip makineler üretmeye başlamışlardır. Bu gelişmiş ilk örnek makineler ile hadde ürünü özel formlu çatı panelleri, alüminyum iskeletli gemilerin ekstrüzyon ürünü olan panellerinin birleştirilmesi gibi işlemler yapılmıştır. Özel SKK makinelerinden verimli sonuçlar alınması yeni makinelerin geliştirilmesine olanak tanımıştır. Böylece büyük radiuslu parçaların kaynak edilebilmesine olanak tanıyan 3 eksen yeni tip SKK makinelerin geliştirilmesi ile süreç çalışmaları devam etmiştir. Nasa, Airbus, Lockheed Martin gibi uzay ve havacılık alanında faaliyet gösteren kurum ve firmalar da SKK yöntemine kayıtsız kalmamış ve kendi bünyelerinde yaptıkları imalatlarda kullanmaya başlamışlardır. [26].

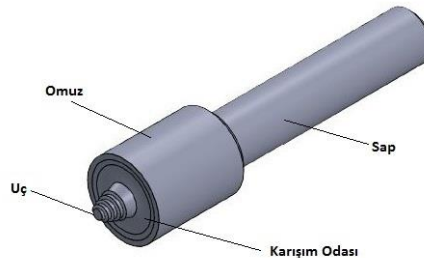


Şekil 3.3 Freze tezgâhından modifiye edilmiş basit tip SKK makinesi (solda) ve büyük ebatlı ve kalınlıktaki parçaların SKK yöntemi ile kaynağına izin veren yeni tip SKK makinesi (sağda)

Gelişen teknoloji ve otomasyonda kat edilen yol neticesinde yaygınlaşan robotikleşme, daha karmaşık ve hassasiyet gerektiren parçaların kaynağı için esnek hareket kabiliyeti ve düşük hata oranları sunulması neticesinde birçok alanda olduğu gibi SKK yöntemi için de kullanılmaya başlanmıştır. Robotik SKK'ı otomotiv ve elektronik sektöründe kendisine yer bulmuştur. Dünyada birçok gelişmiş ülkede SKK yöntemi, robotik kontrol sayesinde seri üretimde kullanılmaktadır.

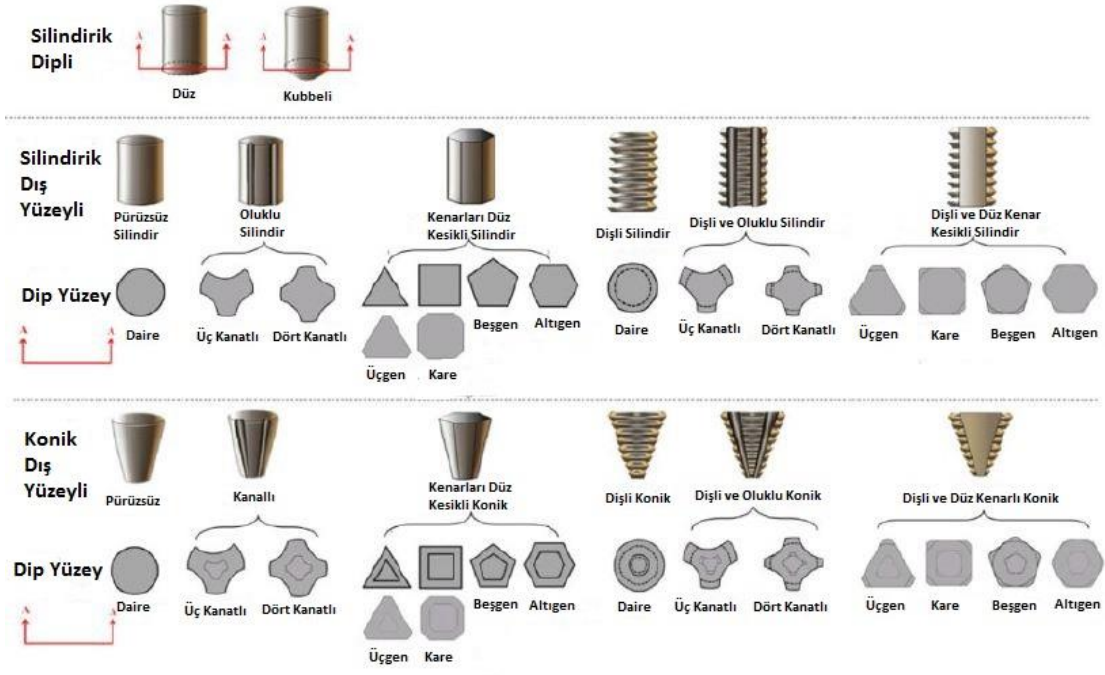
3.1.1.2 SKK Takımları

SKK takımları en genel manada uç (pim), omuz ve sap kısımlarından oluşmaktadır (Şekil 3.4). Uç, kaynak edilecek malzeme içine batacak ve karıştırma işlemini gerçekleştirecek olan kısımdır. Uçun görevi malzemeyi ısıtarak yumuşatmak ve kaynak edilecek parçaların birbiri ile karışmasını sağlamaktır. Omuz, kaynak yüzeylerine dik olan yüzeyde, uç tarafından karıştırılan bölgeye baskı uygulamayı sağlayan kısımdır. Omuzun görevi ucun yumuşattığı malzemenin kaynak bölgesinden uzaklaşmasını engelleyip yine aynı bölgede tutarak kaynak için gerekli olan basıncı sağlamak ve düzgün bir kaynak yüzeyi elde etmeyi sağlamaktır. Sap ise takımı mandrene bağlamaya yarayan kısımdır.



Şekil 3.4 SKK takım örneği

SKK takımlarında omuz ve uç geometrileri Şekil 3.5'te görüldüğü üzere çok çeşitli olabilmektedir. Özellikle uç kısımları malzeme cinsi, kalınlığı ve kaynak geometrisine göre çokça çeşitlendirilebilmektedir.



Şekil 3.5 SKK uç geometri örnekleri [33]

Henüz yeni sayılabilecek SKK yöntemi için standart oluşturulabilmesi için daha birçok test yapılması gerektiği gerçeği de takım türleri açısından birçok alternatifin üretilmesi ve denenmesi için sebep teşkil etmektedir. Bu takımlar aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilmektedir [26, 33].

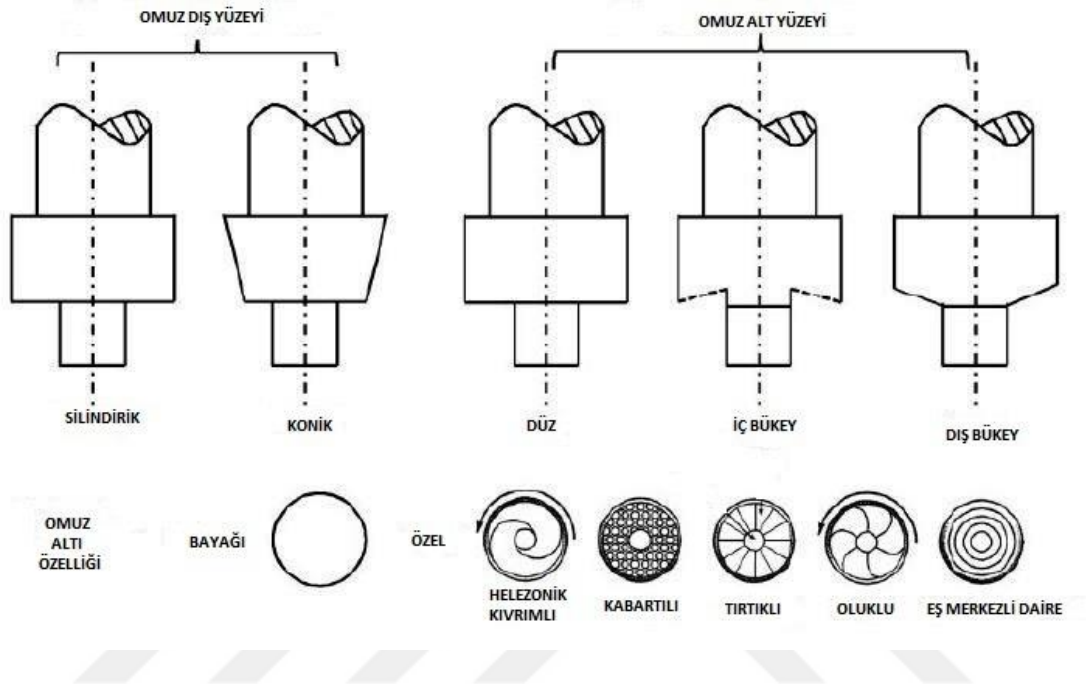
- Silindirik uçlu takımlar: Bu takımlar SKK yöntemi için tasarlanmış ve kullanılmış ilk takım örnekleridir. Takım uçları düz geometrili olabildiği gibi uç üzerine çeşitli formlarda diş veya segman yuvası şeklinde kanallar açılmış olanları da mevcuttur.
- Konik geometrili takımlar: Bu takımlar malzemeye batma konusunda silindirik takımlara göre daha iyidir. Ayrıca silindirik takımlara nazaran malzeme karışım bölgesinde daha az hacim kaplayarak malzemelerin birleşmesini ve karışmasını kolaylaştırmaktadır.
- Temel geometrik şekilli uçlu takımlar: Bu takımlar yumuşatılmış malzemelerin uç üzerinde akmasını kolaylaştıracak bir geometri arayışıyla yapılan çalışmalar sonucunda yapılan araştırmalarla ortaya çıkmış takımlardır. Genel olarak kare, üçgen, beşgen ve altıgen uçlu takımlar örnek gösterilebilir. Bu takımlar içinde en iyi kaynak değerlerini sağlayan profil

üçgen olmuştur. Üçgen profilli takımların geometrileri de kendi içinde Öklid üçgeni, kenarları konveks biçimli, uç üzerinde farklı form ve hatvelerde diş açılmış yahut hiç diş açılmamış takımlar olarak ayrılabilir.

- Alt omuzlu takımlar: Bu takımlar düzgün bir kaynak bölgesi elde edebilmek için gerekli olan altlık kullanımını ortadan kaldırmak üzere tasarlanmış takımlardır. Üst ve alt omuz arasında kalan uç bölgesi görüntü olarak makarayı andırdığı için makara tip takım olarak da geçmektedir. Bu takımların basit versiyonlarında alt ve üst omuz ile uç tamamen rijit geometriye sahiptir. Bu sebeple eğer kaynak edilecek plakalar sabit bir eğimde sabitlenmedi ise kaynak çizgisi üzerinde kalınlık farklılıkları görmek mümkündür. Bunu engellemek adına kendinden tepkili uçlu takımlar geliştirilmiştir. Bu sayede oluşabilecek yükseklik farklılıkları ucun hareket kabiliyetiyle ortadan kaldırılmıştır.
- Uç üzerinde kanal bulunan takımlar: Bu tür takımlar malzemelerin daha iyi karışmasını sağlamak adına üzerine matkabın talaş uzaklaştırma kanalları benzeri kanallara sahip takımlardır. İmalat açısından ince kesitli malzemeleri kaynak etmek için gerekli olan küçük boyutlu uçlara uygulanması daha zor olsa da özellikle 25mm'den kalın kesitli malzemelerin tek pasoda kaynak edilmeleri için avantaj sağlamaktadır.
- Mikser tip takımlar: Bu takımlar malzemenin daha iyi karışmasını sağlamak için tasarlanmış mikserin bıçaklarını andıran ve batma bölgesinde daha düşük hacim kaplayan farklı tiplere sahip takımlardır.
- Eğik uçlu takımlar: Bu takımlarda uç malzeme içinde eksantrik dönüş hareketi yaparak bindirme veya T köşe birleştirme gibi bağlantı geometrilerinde daha iyi sonuçlar vermektedir.

SKK takımlarının omuz şekilleri de kaynak kalitesini etkileyen etmenler arasındadır. Takımların omuzları temel olarak kaynak işlemi için gerekli olan baskı yüzeyini yaratmak olsa da omuzun alt kısmında, kaynak edilecek metal ile omuzun temas ettiği bölgede, açılacak olan bir oyuk yumuşamış ve takımın dönme etkisiyle yukarı

çıkmaya çalışan malzemenin karışmasını kolaylaştıracak etkiye sahiptir. Bu bölge karışım odası olarak adlandırılmaktadır. Omuz tasarımının en karmaşık ve çeşitli olan kısmı bu karışım odalarıdır. Bu karışım odalarının kanallı şekilde tasarlanmış olanları kaynak açısı verilmeksizin dik konumda kaynak yapılmasına müsaade etmektedir. Şekil 3.6’da omuz ve karışım odaları gösterilmiştir.



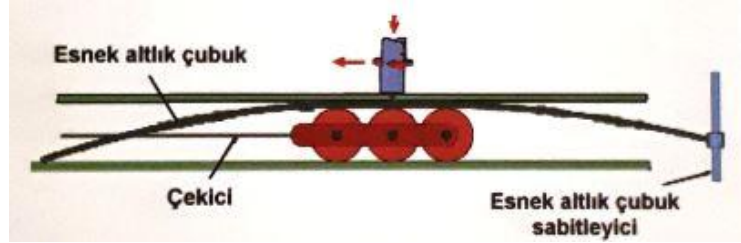
Şekil 3.6 Farklı geometrideki SKK takım omuz ve karışım odaları [33].

3.1.1.3 SKK Tespit Parçaları ve Altlıkları

SKK gibi birçok farklı versiyonu olan kaynak yönteminde yine birbirinden farklı parça tespit aparatı mevcuttur. En basitinden bir cıvata ve t somunlar ile sabitleme yapılabilecek pabuçlar örnek verilebilmektedir. Robotik ve otomasyona çok uygun olan bu teknikte ayrıca birçok farklı hidrolik ve pnömatik tespit parçaları da kullanılmaktadır [26]. Özellikle robotik uygulamalarda kaynak bölgesinden tespit yapılması gereken parçalarda pnömatik kontrollü pabuçlar, çok hızlı bir şekilde otomatik olarak sırayla açılıp kapanarak kaynak parçasını genel itibarıyla iyi bir şekilde tespit etmiş olur.

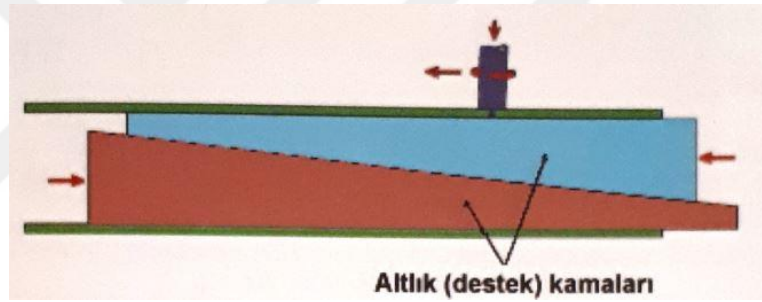
Bu yöntemde kullanılan altlıkları ele alacak olursak da yine ilk önce, en basit manada kullanılan tezgâhın tablası ya da kaynak edilecek iş parçası ile seçili koşullarda kaynak olmayacak bir tabla altlık olarak sayılabilir. Bunun yanı sıra kaynak edilecek parçaların sıkı bir şekilde bağlanması ile ortaya çıkabilecek kalıntı iç gerilmeleri

ortadan kaldırmak adına, takım ile aynı konumda ilerleyerek birebir kaynak bölgesine altlık yapabilen hareketli altlıklar da mevcuttur. Bu tip altlıklar kaynak edilecek malzemenin altında belirli mesafede duran bir yay çeliği şeridini, SKK takımının baskı yaptığı noktaya iten bir tekerlek yardımıyla işlev görürler (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Esnek altlık [26]

Bir diğer altlık çeşidi de kama şekilli altlıktır. Kama altlıklar içi boş profil veya boru şeklindeki parçaların kaynağında destek sağlamaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Kamalı altlık [26]

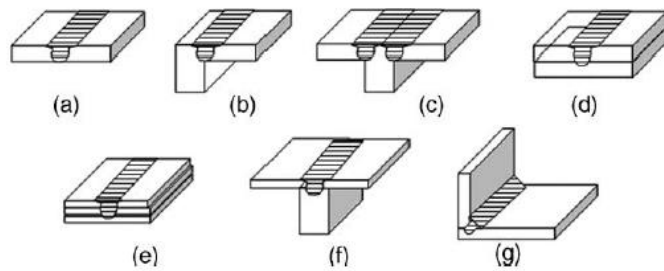
Ayrıca özel şekilli ekstrüzyon ürünü olan panellerin farklı kaynak geometrileri için özel olarak tasarlanmış altlık ya da destek diyebileceğimiz parçalar da üretilmektedir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Özel altlık [26]

3.2 Bağlantı Geometrisi

Alüminyumun kaynağında daha yaygın kullanılan ergitme esaslı kaynak yöntemlerinde olanaklı olan farklı bağlantı geometrileri SKK yöntemi için de uygun olmaktadır. Özetle bağlantı geometrisi SKK yöntemi için dezavantaj oluşturabilecek durumda değildir. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi SKK yöntemi birçok farklı bağlantı geometrisine elverişlidir. Burada; (a) Küt alın, (b) Köşe, (c) T birleştirme, (d) Bindirme, (e) Çoklu bindirme, (f) T bindirme, (g) İç köşe birleştirme.



Şekil 3.10 Bağlantı geometri tipleri [27]

3.3 Kaynak Değişkenleri

SKK yönteminde kaynak değişkenleri olarak en başta kaynak edilecek malzeme, takım devri, kaynak hızı (takım ilerleme hızı), takım kaynak açısı, takım uç geometrisi, takım dönüş yönü, takım omuz geometrisi, takım malzemesi, kullanılan altlık, kaynak edilecek parçaların tespit şekli, kaynak öncesi ön tavlama yapılıp yapılmaması, bağlantı geometrisi, kaynağın uygulanma biçimi gibi sıralanabilmektedir. Bu değişkenlerin etkilerini aşağıdaki sıralamak mümkündür [27].

- Kaynak edilecek malzeme: SKK yöntemi kaynak edilecek malzeme açısından zenginlik sunabilen bir yöntemdir. Bu yöntem en başta alüminyum için uygun bir kaynak yöntemi arayışı ile ortaya çıkmasına rağmen yapılan çalışmalar ile zamanla çelik, bronz, bakır, nikel, çinko, titanyum, kurşun, bu metallerin alaşımları, metal matrisli kompozitler ile mühendislik plastikleri olarak adlandırılan birçok malzemenin kendi içlerinde ve bazılarının da birbirleriyle kaynak edilmesine olanak tanıyarak araştırmacıların ilgisini çekmiştir.

- Takım devri: Kaynak işlemleri için gerekli olan ısıyı sağlayacak ana etmen bu değişkendir. Takım devri genellikle deneme yanılma yoluyla bulunsa da günümüzde yapılan çalışmalarda daha önce yapılmış çalışmalar göz önünde bulundurularak kaynak edilecek malzemeye göre belirli aralıklarda seçilerek yapılmaktadır. Bir diğer takım devir seçim faktörü ise kaynak makinesinin izin verdiği değerler olmaktadır.
- Kaynak hızı: Bu değişken ortama girecek olan ısıyı takım devri ile bağıntılı olarak ayarlamaktadır. Yüksek kaynak hızlarında verimli kaynak elde edilmesi imalat hızı açısından önem arz etmektedir. SKK yöntemi ile de kaynak hızı denemeleri, takım devir sayısı ile beraber en çok çalışmaya konu olmuş değişkendir.
- Takım kaynak açısı: Takım ilerleme yönünde omuz başı kalkık olacak şekilde döndürülerek sürtünmenin azaltılması ve takım çıkış tarafında yumuşamış malzemeye gerekli baskıyı uygulayabilmek adına verilmesi gereken eğimdir. Bu sayede kaynak ilerleme ekseninde oluşacak eksenel yükler de azaltılmaktadır. Genel olarak 0° ile 3° arasında bir takım açısı ile uygun kaynak yapılabilir.
- Uç geometrisi: Uç kaynak edilecek malzemenin içine batarak meydana getirdiği sürtünme ısısı ile malzemeyi plastik forma dönüştürdüğü gibi malzemelerin birbiri ile iyi bir biçimde karışmasını sağlar. İyi bir karıştırma kaynağın mekanik özelliklerini iyileştirdiği gibi kaynağın en az pas ile yapılmasını sağlayarak imalat hızını iyileştirir.
- Takım Dönüş yönü: Saat yönü veya saat yönü tersi olarak seçilebilmektedir. Bu değişkenin seçimi uç üzerindeki dişe göre değişmektedir. Eğer sağ dişli bir uçlu takım kullanılıyor ise takım dönüş yönü saat yönü tersi seçilmelidir. Tam tersi durumda sol diş uçlu bir takım kullanılıyor ise bu sefer takım dönüş yönü saat yönü seçilmelidir ki ucun dönme hareketi ile yumuşayan malzeme dışarı taşma yaparak talaş oluşumuna ve kaynağın içinde de gözenek oluşumuna sebep olmasın.
- Takım omuz geometrisi: Takım omuz çapı ilk önce belirlenmesi gereken değişkendir. Takım omuz çapı büyüdükçe kaynak bölgesine yapılan baskı alanı büyüyecektir. Ayrıca omuz çapı ile beraber karışım odası da

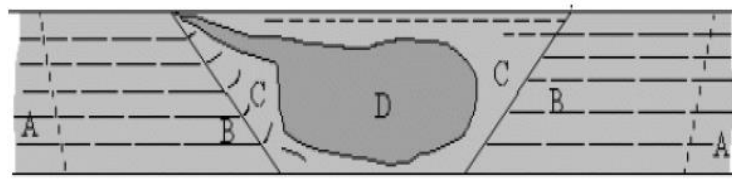
büyüyeceğinden kalın kesitli malzemelerin SKK yöntemi ile kaynağında daha büyük çapta omuzlu takım kullanılması gerekmektedir. Takım omuz geometrisiyle ilgili diğer değişken de karışım odasının şeklidir. Bu şekiller genel olarak sarmal, konkav ve konveks olarak sıralanabilmektedir. Şekil 3.6'da görüldüğü üzere birçok farklı tipte karışım odası şekli mevcuttur ve yenilerinin tasarımına ve denenmesine de açıktır.

- Takım malzemesi: Takım malzemesi SKK yöntemi için çok önemli bir değişkendir. Takım malzemesi seçilirken birçok özelliğe dikkat edilmektedir. Bu özellikler yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek sıcaklıkta boyutsal stabilite, yüksek aşınma direnci, kaynak malzemesi ile takım malzemesinin birbiri ile kaynak olmaya uygun olmaması, kırılma tokluğu, uç ve omuz malzemesi farklı olan takımlarda ısıl genleşme katsayıları arasındaki benzerlik, işlenebilirlik, uniform yapıda mikro yapıya sahip olması ve bulunabilme kolaylığı olarak sıralanabilmektedir. Alüminyum alaşımları için en uygun takımlar WC-Co ve CrCMo alaşımları sıcak iş takım çelikleridir ve birçok deneyde kullanılmışlardır.
- Kullanılan altlık: Kaynak edilecek parçanın cinsine göre, kaynak işlemi sırasında iş parçası ile etkileşime girmeyecek bir malzemeden seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca kaynak edilecek malzemenin ısıl kapasitesi yüksek ise kaynak sonrası oluşabilecek iç gerilmeleri önlemek adına hareketli altlık ya da alt destek omuzlu takım ile altlık yapılabilir.
- Tespit şekli: Parçanın tespit şekli de yine kaynak sonrası oluşabilecek iç gerilmelere sebebiyet verebileceğinden malzemeye uygun olarak seçilmelidir. Ayrıca otomasyon veya robotik kaynak uygulamalarına göre de uygun tespit parçası ve şekli seçilebilmektedir.
- Ön tavlama: Kaynak edilecek iş parçası üzerinde imalatından ortaya çıkmış ya da kaynağa hazırlık aşamasında oluşabilecek iç gerilmelerin azaltılması veya giderilmesi için SKK öncesi ön tavlama yapılabilir. Alüminyum alaşımları için genel olarak ön tavlama gerekmemektedir.
- Bağlantı geometrisi: Şekil 3.10'da görüldüğü üzere istenilen geometri seçilerek kaynak işlemi yapılabilir.

- Kaynağın uygulanma biçimi: SKK yönteminde kaynak tek pasoda, çift pasoda ayrı ayrı, tek pasoda altlı üstlü aynı anda, çift takım ile aynı yönde dönüş, çift takım ile farklı yönde dönüş ile kaynak, uç ve omuzun farklı hızlarda dönmesi, pim ve omuzun farklı yönlerde dönmesi gibi farklı uygulamalar söz konusu olmaktadır.
- Kaynak işleminin yapıldığı sıcaklık aralığı: SKK'da kaynak işlem sıcaklığı takım devri, ilerleme hızı ve takım baskı kuvveti bileşenlerinin etkisiyle oluşturulur. Her malzeme ve alaşımları için farklı optimum kaynak işlem sıcaklıkları söz konusudur. Örneğin Mg alaşımı alüminyumlar, yani genel manada 5000 serisi alüminyumlarda yüksek sıcaklık gözeneklenme problemi yarattığı için işlem sıcaklığının çok yüksek tutulmaması gerekmektedir.

3.4 Kaynak Bölgeleri

SKK yönteminde oluşan kaynak bölgelerini Şekil 3.11'deki gibi gösterebiliriz. Burada D bölgesi dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DYKB) olarak adlandırılır. Bu bölge takım uç yolu üzerindedir ve karışımın en fazla olduğu bölgedir. C bölgesi termomekanik olarak etkilenen bölge (TMEB) olarak adlandırılır. Bu bölge karışma bölgesinin az da olsa etkilendiği bölgedir. B bölgesi, ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) olarak adlandırılır. Burada mekanik olarak bir değişim olmamasına karşın ısı etki ile malzemede değişim olmaktadır. A bölgesi, ana malzemeyi göstermektedir.



Şekil 3.11 SKK yönteminde oluşan kaynak bölgeleri [27]

3.5 SKK Avantajları ve Dezavantajları

SKK yönteminin avantajlarını aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir [24,28-32];

- Katı hal kaynak yöntemi olduğu için yüksek ısı girdisi olmadan kaynak işlemi gerçekleştirilir. Böylece iş parçasının içyapısı bozulmaz.

- Dışarıdan ısı girdisi, tel, örtü, koruyucu gaz gerekmediği için ekonomik bir yöntemdir.
- Işın ve zararlı gaz ve duman salımı olmaz.
- Kaynak dikişi kaynak işlemi sonrasında temizleme gerektirmeyecek kadar düzgün çıkarak işçiliği azaltır.
- Yüksek kaynak hızlarına müsaade etmektedir, hatta alüminyum için lazer kaynağının alternatifi olarak gösterilebilir; ayrıca lazer kaynağına göre %2,5 maliyet ile kaynak işlemi yapılabilir.
- 300µm ile 150mm kalınlık arasındaki parçalar tek paso ile kaynak edilebilir.
- Otomasyon ve robotiğe çok uygundur.
- Birçok farklı malzemenin kendi içinde ve bazı benzer olmayan malzemelerin kaynağına uygundur.
- Kaynak dikişi bazı uygulamalarda ana malzemedan daha iyi mekanik özellik göstermektedir.
- Ergitme esaslı kaynak yöntemlerine göre kaynak işlemi sonrası çarpılma yok denecek kadar azdır.
- Kaynak işlemi için kaynak ağzı açma gibi işlemler gerekmemektedir. Kaynak yüzeyinden oksit tabasını gidermek için yüzeysel olarak zımpara yapmak yeterlidir.
- El becerisi gerektirmediği için operatör yetiştirmek çok daha kolaydır. Ayrıca insan faktörü en aza indirildiği için her parçada aynı standardı yakalamak kolaydır.

SKK yönteminin dezavantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- Yeni bir yöntem olduğu için kaynak standartları ve yardımcı cetvelleri henüz yok denecek kadar azdır.
- Malzemelerin kalınlığına göre farklı uç boyu gerektiği için farklı takımlar imal edilmesi gerekmektedir. Bu problem uç boyu ayarlanabilen takımlar ile yapılsa bile rijitlik bakımından hatalar doğurabilir ve maliyeti fazladır.
- Özellikle ince malzemelerin kaynağında küçük uç boylu takımların hassas işlenmesi için CNC tezgâhlar gerekmektedir. Seri imalat harici CNC imalat da endüstriyel anlamda maliyet yaratmaktadır.

- Alışılmış ve yaygın olan ergitme esaslı kaynak yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar genel olarak daha fazla olduğu için kısa vadede SKK yönteminin yaygınlaşması kolay görülmemektedir.
- Kaynak işlemi sırasında iş parçasına uygulanan kuvvetlerin büyük olmasından dolayı malzeme içinde artık gerilmeler oluşma ihtimali yüksektir.
- Yüksek baskı kuvveti ve hassasiyet gerektiren bir uygulama olduğu için makineleri maliyetlidir.
- Taşınabilir SKK makineleri sınırlı iş hacmine sahiptir ve genelde sadece tek iş için özelleştirilmiş mekanik yapıya sahiptirler.
- Tek pasolu işlemlerde % 100 nüfuziyet gerçekleşmez, bunu için alttan ve üstten kaynak gerekmektedir.

3.6 SKK Kullanım Yerleri

SKK yöntemi havacılık, gemi inşaatı, demiryolu taşımacılığı, inşaat gibi birçok endüstride kullanılmaktadır. SKK yöntemi ile ekstrüzyon ürünü panellerin imal edilmesi özellikle alüminyum yapı sistemlerinin kaynağı için iyi bir alternatiftir. Bu yöntem ile çatı panelleri, gemi iskeleti, uçak iskeleti ve dış panelleri, tren vagonlarının iskelet ve dış panelleri gibi birçok uygulama mevcut bulunmaktadır [26,34-37].

3.7 Daha Önce Yapılmış Çalışmalara Atıf

AA 5754 H111 levhaların kendi arasında kaynağı için yapılan çalışmalar şunlardır;

- 5 mm kalınlıktaki AA 5754 H111 alüminyum plaka çifti kendi içinde tek ve çift pasolu olarak kaynak edilmiştir. Kaynak işlemi DIN 2367 sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş, taban çapı 4 mm, konik, boyu 4,5 mm ve üzerinde standart dışı üç adet kanal bulunan pimli takım ile gerçekleştirilmiştir. Talaşlı imalattan sonra takımın sertliği ısıl işlem ile sertliği 45-48 HRC ye yükseltilmiştir. Kaynak işlemi universal freze tezgâhında, 20 mm kalınlıkta çelik lama altlık kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Takım açısı 2,5° olarak belirlenmiştir. Uç malzeme içine tam olarak batırıldıktan sonra bir dakika boyunca ısıtma yapılmıştır. Kaynak işlemi 1250 dev/dak takım devri ile 160

mm/dak kaynak (takım ilerleme) hızı ile yapılmıştır. Deney sonrası hazırlanan mikro yapı incele numuneleri 1200 grid zımparaya kadar zımparalandıktan sonra %50 HNO₃ + %50 saf su karışımı ile dağlanmıştır. Tek taraftan kaynaklı parça için alınan mikro sertlik değerleri DYKB, TMEB ve ITAB da 60 HV seviyelerinde iken ana malzeme sertliği 70 HV seviyelerindedir. Çift taraftan kaynaklı parça için DYKB sertliği 70 HV, TMEB sertliği 70-75 HV, ITAB ve ana malzeme sertlikleri ise 70 HV değerlerinde çıkmıştır. Yapılan çekme testlerinin sonuçları kaynaklı numune için 251 N/mm² iken, tek taraftan kaynaklı parçanın en iyi çekme değeri 124 N/mm² de kalmış iken, çift taraftan kaynaklı parçanın en iyi çekme değeri 211 N/mm² olarak ölçülmüştür. Eğme test sonuçları incelediğinde kaynaklı numunenin P_{max} değeri 807 N iken, tek taraflı kaynakta 244 N, çift taraftan kaynaklı numunede 300 N olarak ölçüldüğü görülmüştür.

- 6 mm kalınlığındaki AA5754 H111 levhalar alın alına 400, 450, 500, 550 ve 600 dev/dak takım devri ve 210, 220, 230, 240 ve 250 mm/dak kaynak hızları ile kaynak edilmiş ve 500 dev/dak, 230 mm/dak hız ile kaynak edilen malzemenin mukavemetinde ana malzeme değerlerine yaklaşılmıştır [41].

SKK için yapılmış bazı çalışmalar;

- Konik takım ile AA5251 serisi 5 mm kalınlığındaki levhalar 1000 dev/dak takım devri ve 200 mm/dak kaynak hızında kaynak edilmiştir. Uç boyu malzeme kalınlığı ile aynı seçilmiş ve mikro yapı incelemesi Keller çözeltisi ile yapılmıştır [38].
- Konik vidalı pimli takım ile 6mm kalınlığındaki AA 1050 ile AA 5083 levhalarının birleştirildiği çalışmada, sabit 1400 dev/dak takım devri ile 200, 250, 300, 350 ve 400 mm/dak olmak üzere beş farklı kaynak hızı ile deneyler yapılmıştır [39].
- 0,8 mm kalınlıktaki AA5754 H111 malzeme ile yapılmış çalışmada 0°, 1° ve 2° takım açısı ile kaynaklar yapılmış ve mikro yapı incelemeleri Keller çözeltisi kullanılarak yapılmıştır [40].

4.1 Giriş

Bu çalışmada kaynak edilecek parçalar levhadan kesilerek temin edilmiş, kaynak işlemleri yapılmış, daha sonra frezede işlenerek test numuneleri çıkartılmış, testler ilgili cihazlar ile yapılmış ve elde edilen sonuçlar çıkartılarak tablo ve grafiklerle verilmiştir.

4.1.1 Malzeme

5754 H111 alüminyum alaşımı levhalar kendi içinde alın alına sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile kaynak edilmiştir. 6 mm kalınlığındaki levhadan testere ile 250*75 mm ölçülerinde kesilen parçalar, bu çalışma için özel olarak tasarlanıp imal edilmiş kaynak tablasına bağlanmış ve freze tezgâhında kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.1 ve 4.2’de AA5754 H111 malzemenin mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimi verilmektedir.

Tablo 4.1 AA 5754 H111’in mekanik özellikleri

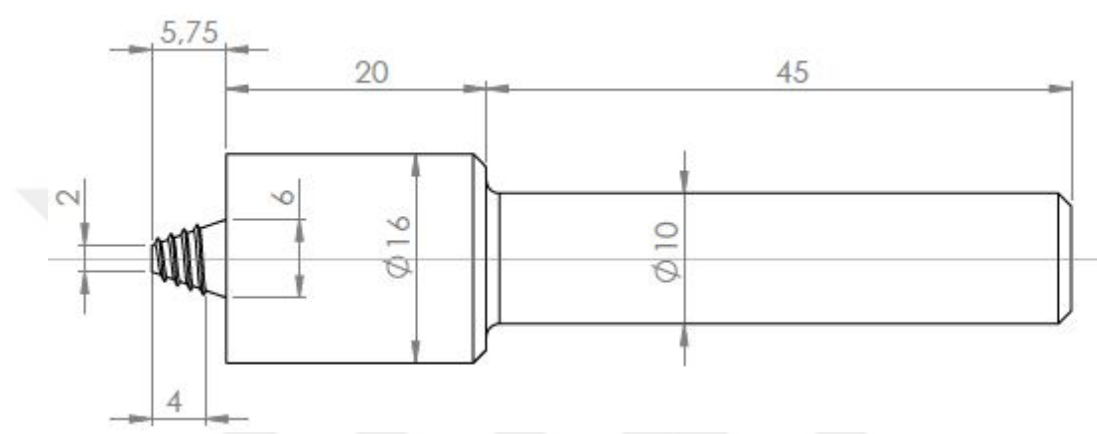
AA 5754 H111			
Akma Mukavemeti	Çekme Mukavemeti	Uzama	Sertlik
(MPa)	(MPa)	min - max	(Brinell)
min - max	min - max		min – max
80-100	190-215	24	50-55

Tablo 4.2 AA 5754 H111’in kimyasal bileşimi

AA 5754 Kimyasal Bileşim									
Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer	Al
0,4	0,4	0,1	0,5	2,6-3,6	0,2	0,3	0,15	0,15	Kalan

4.1.2 Takım

Bu çalışma için DIN 2344 sıcak iş takım çeliğinden özel olarak takım imal edilmiştir (Tablo 4.3). Bu takım konik pimli takımdır. Takım omuz çapı $\varnothing 16$ mm ve uç boyu 5,75 mm olacak şekilde imal edilmiştir. Takımın ucu üzerine diş yüksekliği 0,6 mm ve hatvesi 1 mm olan sağ diş çekilmiştir. Takım CNC torna tezgâhında imal edildikten sonra ısıtılma işlemine tabi tutulmuş ve sertliği 50 HRC ye yükseltilmiştir. Takımın teknik resmi Şekil 4.1’de verilmiştir.



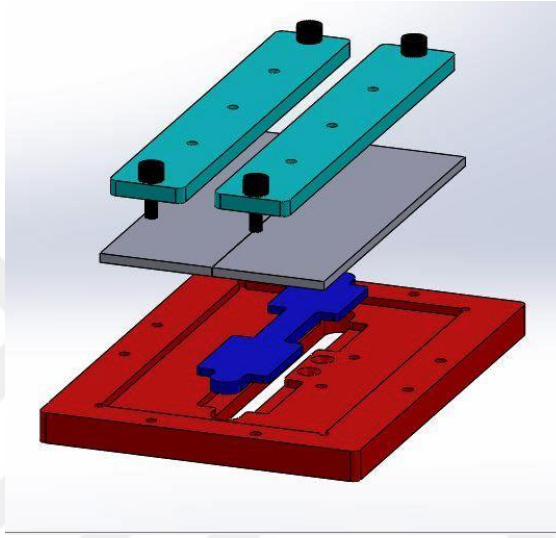
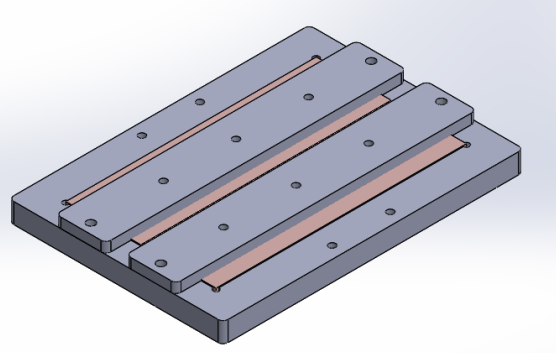
Şekil 4.1 Takım (konik) teknik resmi

Tablo 4.3 DIN 2344 sıcak iş takım çeliğinin kimyasal yapısı

EN / DIN	AISI	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Co
1.2344 X40CrMoV5-1	H13	0,39	1,1	0,4	5,2	1,4	-	0,95	-	-

4.1.3 Tezgah ve Kaynak Tablası

Kaynak işlemleri Şekil 4.2’de görülen tezgâhta, özel olarak tasarlanmış kaynak tablası üzerinde yapılmıştır. Kaynak tablası 250x150 mm ölçülerinde 5 mm derinliğinde bir yuvaya sahiptir. 250x75 mm ölçülerindeki iki adet alüminyum levha yuvaya yerleştirilen parçalar iki adet tespit parçası ile üstten de sabitlendikten sonra kaynak işlemi istikrarlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.2 Freze tezgâhı ve kaynak tablası

4.1.4 Deney Parametreleri

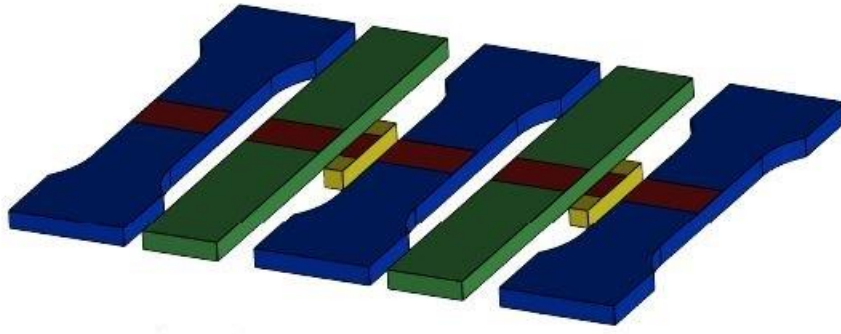
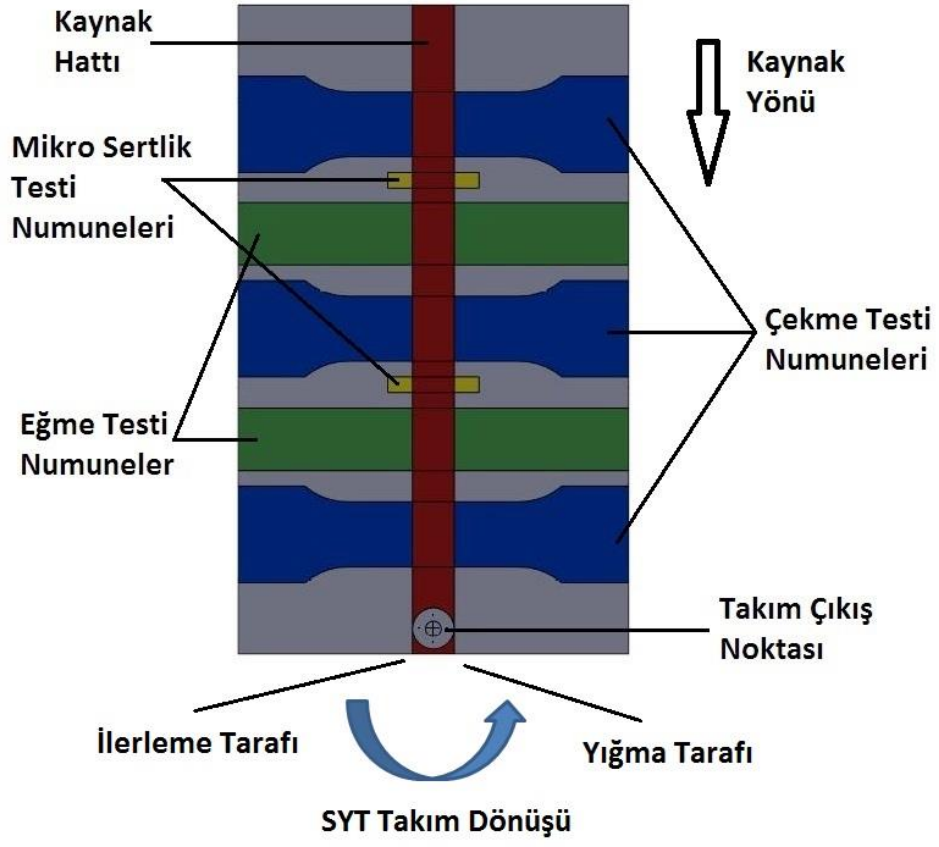
Bu çalışmada takım açısı 2° (takım ilerleme yönünde, malzemeyi daha kolay altına alabilmek için, kalkık olacak şekilde), takım dönüş yönü ise saat yönünün tersine olacak şekilde sabit tutulmuştur. Takım devri 500 dev/dak, 1000 dev/dak ve 1400 dev/dak, takım ilerleme hızları ise 112 mm/dak, 210 mm/dak ve 270 mm/dak olarak seçilmiştir. Kaynak parametreleri Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4 Kaynak parametreleri

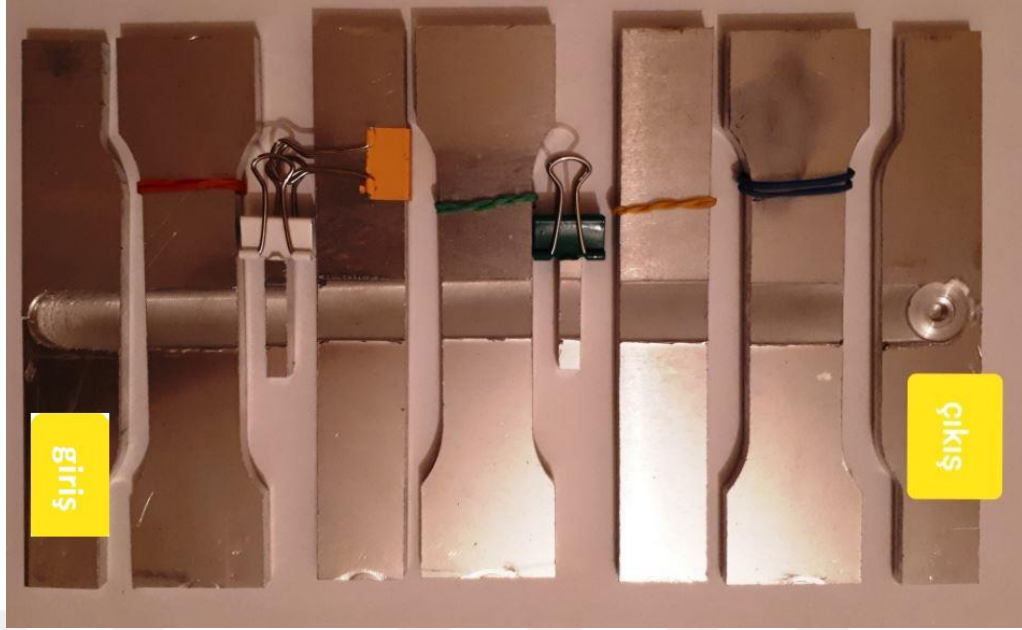
TAKIM TÜRÜ	DEVİR dev/dak	İLERLEME mm/dak	DENEME SIRA NO
KONİK	500	112	1
		210	2
		270	3
	1000	112	4
		210	5
		270	6
	1400	112	7
		210	8
		270	9

4.1.5 Test Numunelerinin Çıkartılması

Kaynak edilmiş olan parçaların her birinden Şekil 4.3'teki gibi çekme, eğme ve mikro sertlik numuneleri çıkartılmıştır. Çekme deney numuneleri BS EN ISO 4136-2012, eğme numuneleri BS EN ISO 5173-2010+A1-2011 standartlarına göre çıkartılmışlardır.



Şekil 4.3 Test numunelerinin çıkartıldığı bölgeler



Şekil 4.4 Freze ile işleme sonrası numunelerin durumu

Şekil de görüldüğü gibi CNC frezede işlenen kaynak edilmiş plakalardan çıkartılmış test numuneleri farklı renkteki bant ve klipsler ile ayrılmışlardır. Bu sayede yapılan testlerin takım giriş bölgesi, orta bölge veya kaynak çıkış bölgesinde farklı sonuçlar verip vermediği gözlemlenmiştir. Yapılan testler sonrası numune numaralandırması aşağıdaki örneklerde görüldüğü şekilde yapılmıştır. Burada ilk rakam her zaman deney sıra numarasını vermektedir.

Çekme testi için:

- 11: 1 nolu deneme yani 500 dev/dak takım devri ve 112 mm/dak kaynak hızı ile kaynak edilen numuneden çıkartılan **kırmızı lastikli (giriş kısmı)** çekme testi numunesi.
- 12: 1 nolu deneme yani 500 dev/dak takım devri ve 112 mm/dak kaynak hızı ile kaynak edilen numuneden çıkartılan **yeşil lastikli (orta kısım)** çekme testi numunesi.
- 13: 1 nolu deneme yani 500 dev/dak takım devri ve 112 mm/dak kaynak hızı ile kaynak edilen numuneden çıkartılan **mavi lastikli (çıkış kısmı)** çekme testi numunesi.

Eğme testi için:

- 11: 1 nolu deneme yani 500 dev/dak takım devri ve 112 mm/dak kaynak hızı ile kaynak edilen numuneden çıkartılan **sarı klipsli (giriş kısmı)** eğme testi numunesi.
- 12: 1 nolu deneme yani 500 dev/dak takım devri ve 112 mm/dak kaynak hızı ile kaynak edilen numuneden çıkartılan **sarı lastikli (çıkış kısmı)** eğme testi numunesi.

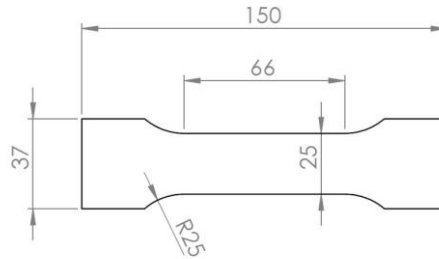
Eğme testlerinde sarı klipsli yani X1 numunelerine kep eğme, sarı lastikli X2 numunelerine de kök eğme testleri uygulanmıştır.

Mikro sertlik testi için:

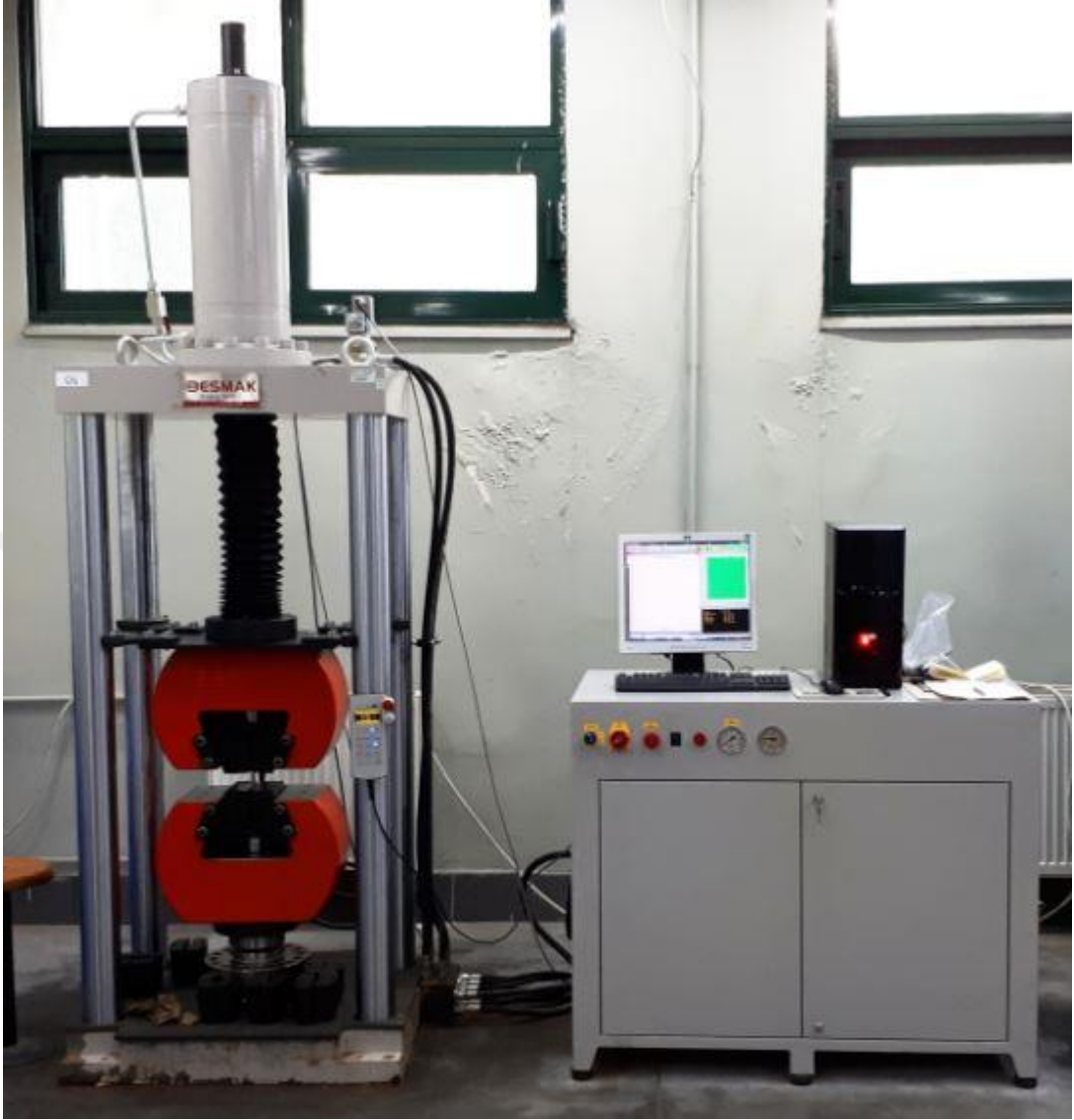
- 11: 1 nolu deneme yani 500 dev/dak takım devri ve 112 mm/dak kaynak hızı ile kaynak edilen numuneden çıkartılan **beyaz klipsli (giriş kısmı)** mikro sertlik testi numunesi.
- 12: 1 nolu deneme yani 500 dev/dak takım devri ve 112 mm/dak kaynak hızı ile kaynak edilen numuneden çıkartılan **yeşil klipsli (çıkış kısmı)** mikro sertlik testi numunesi.

4.1.6 Çekme Testi

Çekme testleri Yıldız Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Mekanik Laboratuvarında oda sıcaklığında yapılmıştır. Çekme test numuneleri BS EN ISO 4136-2012 standartlarına göre çıkarılmış olup teknik resmi Şekil 4.5'te verilmiştir. Test için Şekil 4.6'da görülen Besmak marka 600 kN servo hidrolik çekme test cihazı kullanılmıştır. Şekil 4.3'te belirtildiği gibi her kaynak numunesi için 3 adet çekme testi yapılmıştır. Çekme hızı 10mm/dak olarak seçilmiştir.



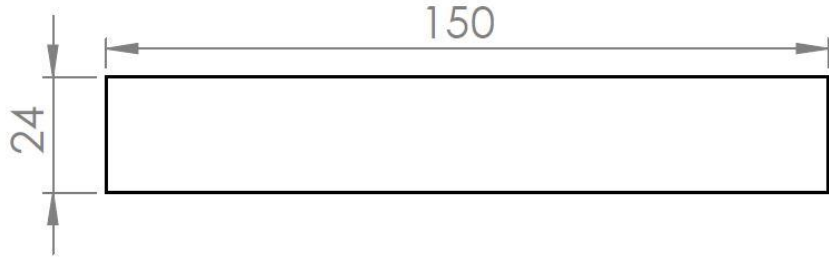
Şekil 4.5 Çekme testi numunesi teknik resmi



Şekil 4.6 Besmak 600 kN servo hidrolik çekme testi cihazı

4.1.7 Eğme Testi

Eğme testleri Yıldız Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında oda sıcaklığında yapılmıştır. Her kaynak numunesi için 2 adet eğme testi numunesi çıkartılıp bu numunelere kep ve kök eğme uygulanmıştır. BS EN ISO 5173-2010+A1-2011 e göre alın kaynağı için enine eğme test numunesi ölçülerinde işlenmiştir (Şekil 4.7). Şekil 4.8’de eğme test cihazı görülmektedir.



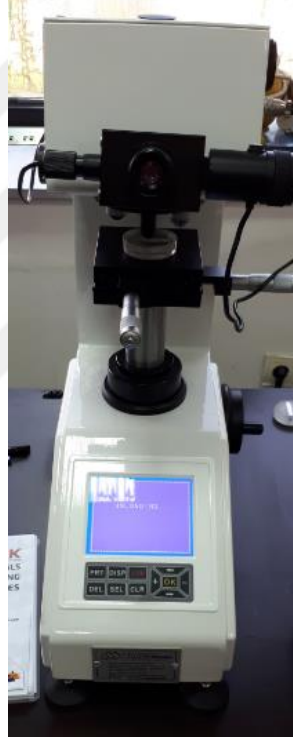
Şekil 4.7 Eğme testi numunesi teknik resmi



Şekil 4.8 Eğme test cihazı

4.1.8 Mikro Sertlik Testi

Soğuk monteye alma işleminden sonra mikro sertlik test numuneleri sırasıyla 60, 120, 180, 220, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2000 ve 2500 gritlik zımparalarla zımparalanmış ve alümina pasta ve parlatma çuhası kullanılarak parlatma işlemi yapılmıştır. Daha sonra 1ml 38-40% HF, 1,5 ml 37% HCl, 10 ml 70% HNO₃ ve 100 ml saf su içeriğine sahip Keller kimyasal bileşeniyle dağlanmış ve mikroskop altında incelenmiştir. Mikro sertlik testleri oda sıcaklığında yapılmıştır. Belirtildiği gibi her kaynak numunesi için 2 adet mikro sertlik testi numunesi çıkartılıp bu numuneye 0,2 kg yük, 10 sn ile uygulanmış ve ölçümler alınmıştır. Şekil 4.9'da mikro sertlik cihazı görülmektedir.



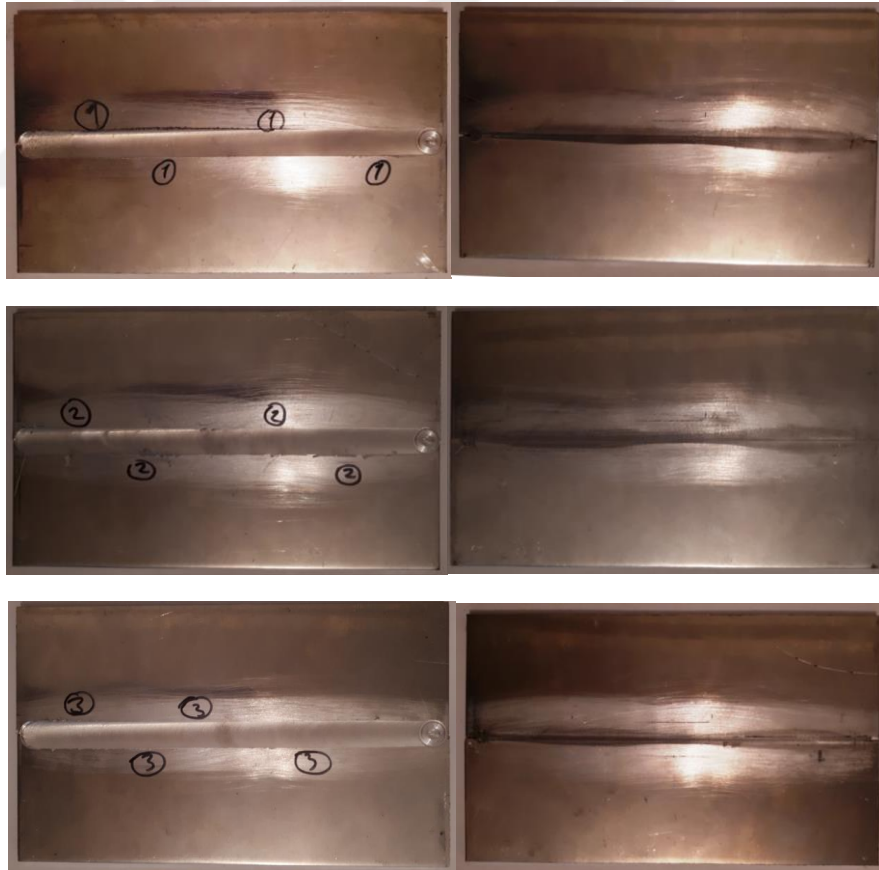
Şekil 4.9 Mikro sertlik ölçüm cihazı

5.1 Test Sonuçları

Kaynak edilen parçalar için yapılmış olan test ve muayenelerin sonuçları aşağıda sırası ile verilmiştir.

5.1.1 Kaynak Sonrası Görsel İlk Muayene

Kaynak edilmiş olan numuneleri incelediğimizde kaynak dikişinin yarıksız ve düzgün, çapak oluşumunun yok denilebilecek kadar az ve plakada çarpılmaların çok az olduğu görülmüştür (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 Farklı parametreler ile kaynak edilmiş levhalar - 1



Şekil 5.1 Farklı parametreler ile kaynak edilmiş levhalar - 2



Şekil 5.1 Farklı parametreler ile kaynak edilmiş levhalar - 3

5.1.2 Çekme Testi Sonuçları

AA 5754 H111 alüminyum levha çiftinin aln alına sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilen kaynak numunelerine ait çekme test numuneleri ile yapılan testler sonucunda elde edilen çekme değerleri ve %uzama değerleri Tablo 5.1'deki gibidir. Çekme test numunelerinin görselleri ve kopma kesitleri Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2 Çekme testi numunelerinin test sonrası yüzey ve kesit görünüşleri

Tablo 5.1 Değişkenleri belirtilen numuneler için çekme dayanımı ve % uzama değerleri.

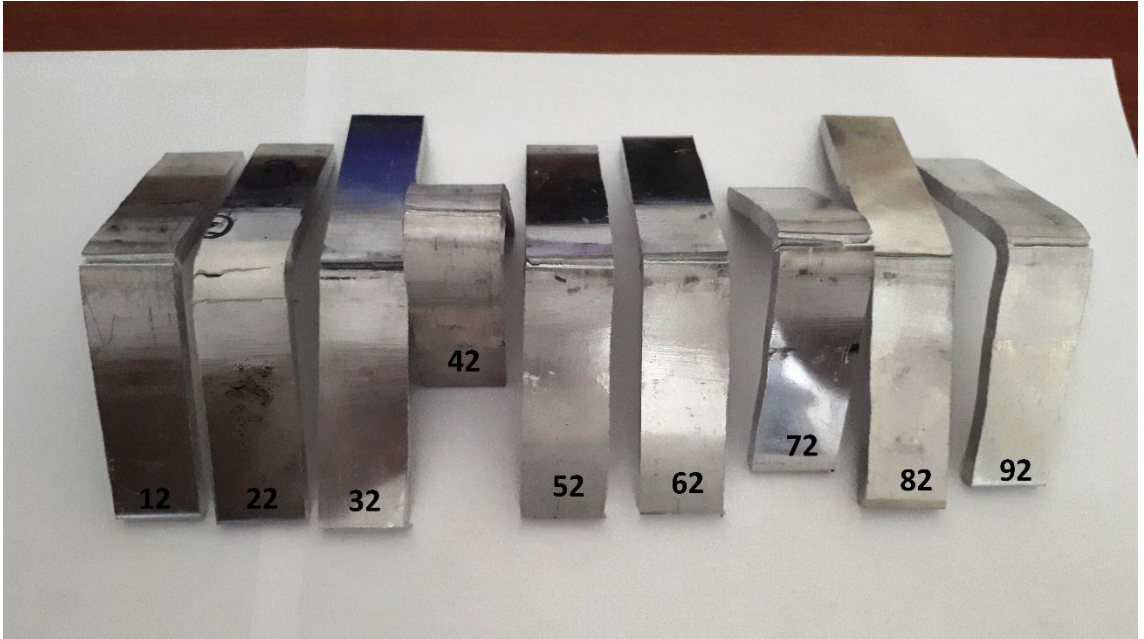
NUMUNE NO	ÇEKME MPa	%ε	ORT. ÇEKME DAYANIMI MPa
11	72,89	3,5	161,6
12	192,78	5,2	
13	219,11	10,8	
21	115,87	3,7	140,2
22	117,06	3,6	
23	187,53	6,8	
31	115,35	4,1	109,3
32	81,31	2,8	
33	131,11	4,9	
41	183,01	7,6	212,4
42	220,67	12,4	
43	233,51	15,2	
51	151,16	6,4	179,5
52	173,98	5,8	
53	213,42	12,5	
61	113,17	5,0	169,5
62	159,41	3,4	
63	235,98	11,2	
71	111,89	4,1	175,8
72	191,34	5,8	
73	224,17	6,3	
81	180,51	5,8	182,3
82	141,16	3,4	
83	225,1	10,9	
91	155,97	4,5	170,5
92	131,32	3,4	
93	224,29	10,8	

5.1.3 Eğme Testi Sonuçları

Numuneler üzerinde yapılan kep ve kök eğme testleri sonucu eğme numunelerinin kep ve kök görünüşleri Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'teki gibidir.



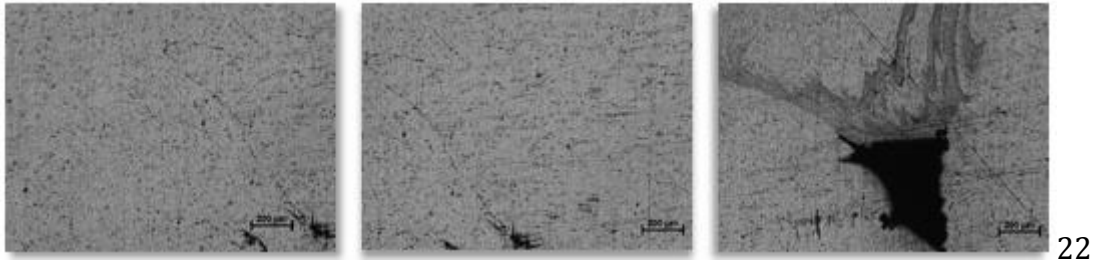
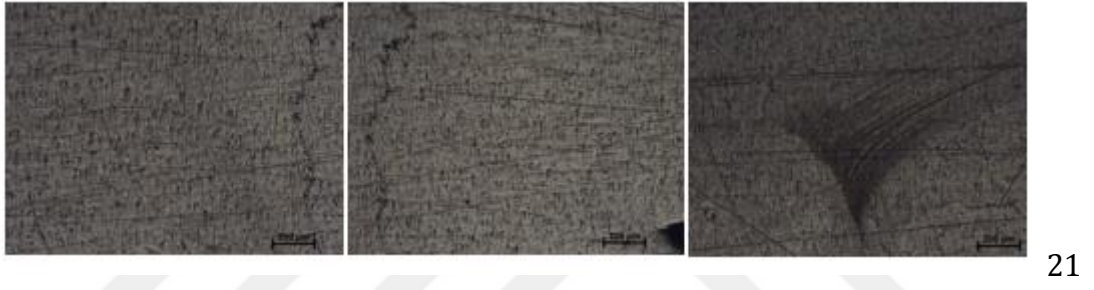
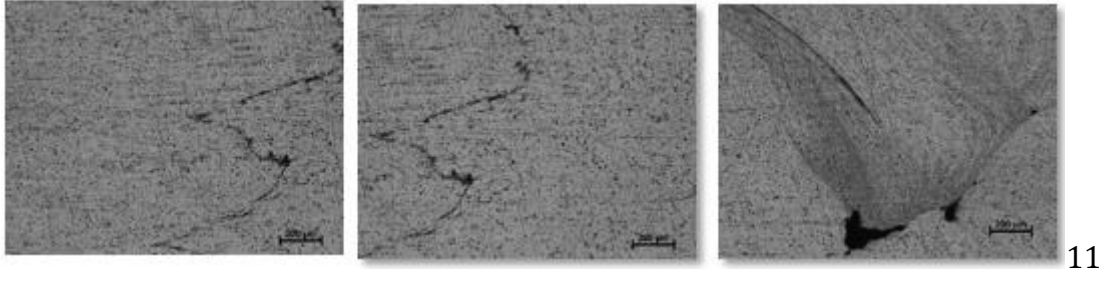
Şekil 5.3 Kep eğme yapılmış test numuneleri



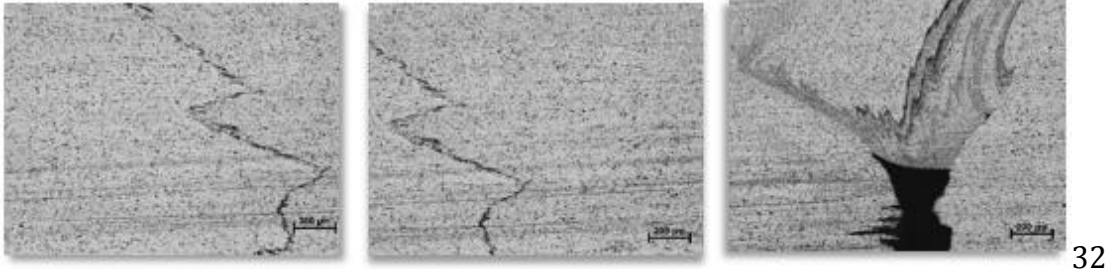
Şekil 5.4 Kök eğme yapılmış test numuneleri

5.1.4 Mikro Yapı İncelemesi

Mikro yapı incelemeleri için her levhadan girişe ve çıkışa yakın olmak suretiyle birer numune alınarak mikroskop altında x50 büyütmede incelenmiş ve alınan görüntüler Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



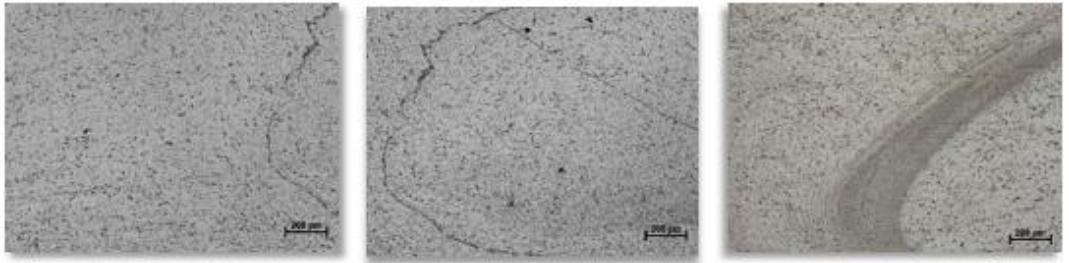
Şekil 5.5 1-9 nolu numune giriş-çıkış tarafı (ITAB-TMEB-DYKB) - 1



32



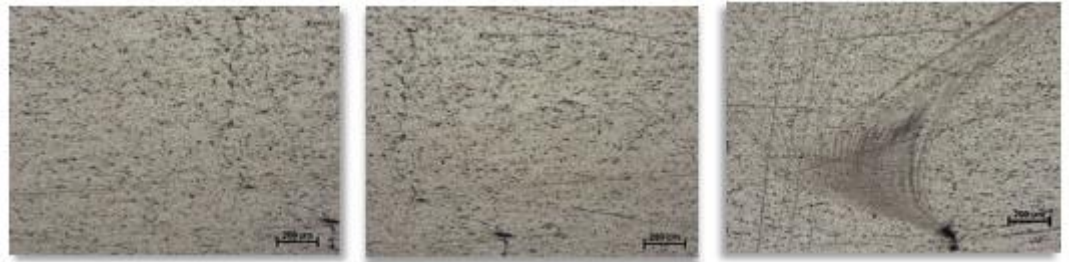
41



42

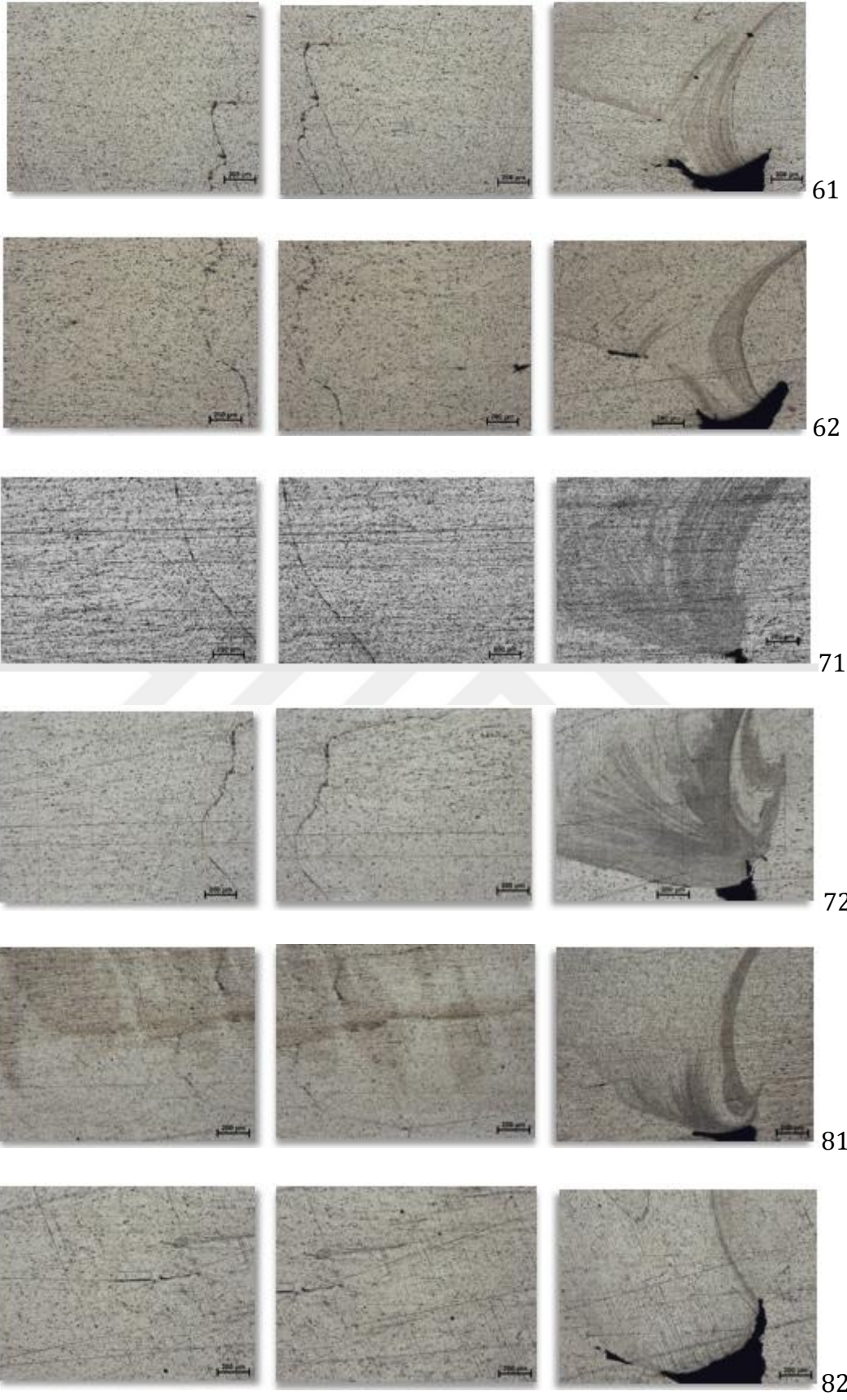


51

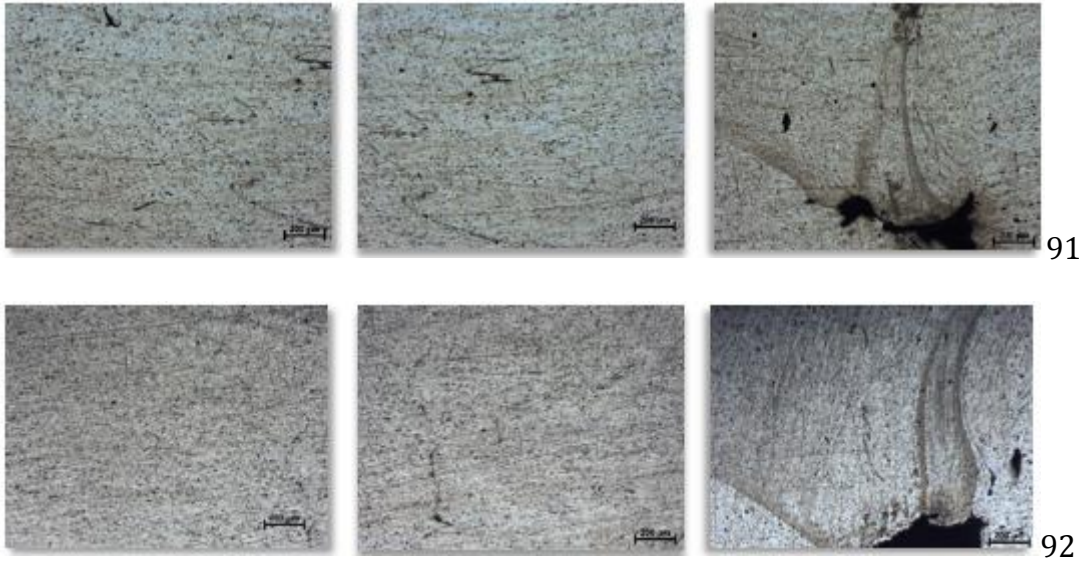


52

Şekil 5.5 1-9 nolu numune giriş-çıkış tarafı (ITAB-TMEB-DYKB) - 2



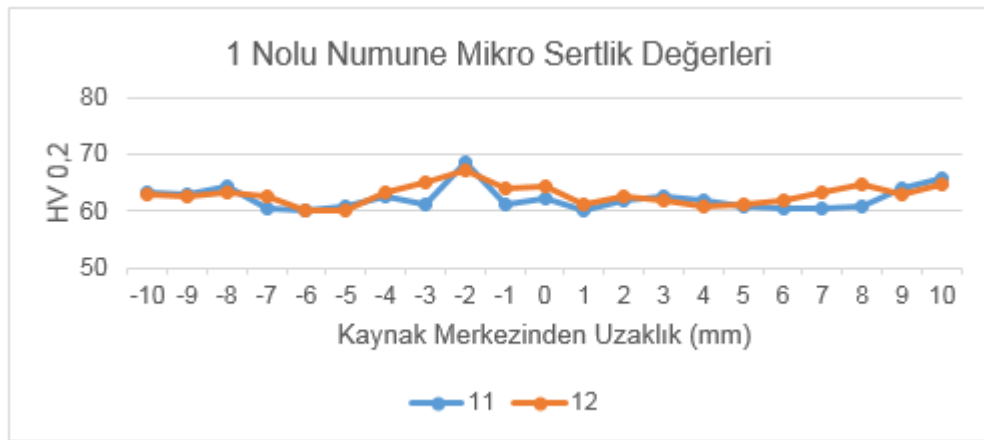
Şekil 5.5 1-9 nolu numune giriş-çıkış tarafı (ITAB-TMEB-DYKB) - 3



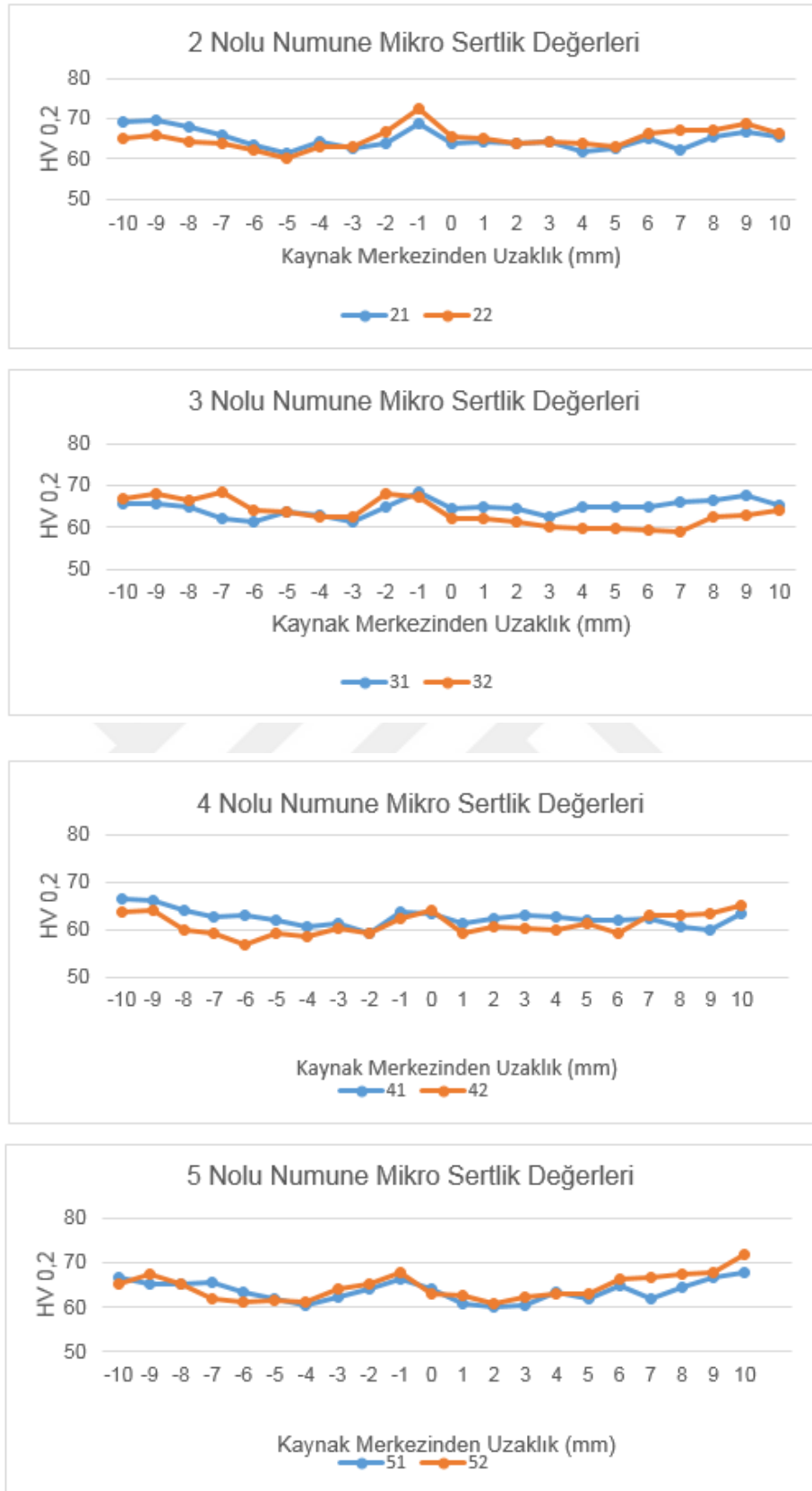
Şekil 5.5 1-9 nolu numune giriş-çıkış tarafı (ITAB-TMEB-DYKB) - 4

5.1.5 Mikro Sertlik Testi Sonuçları

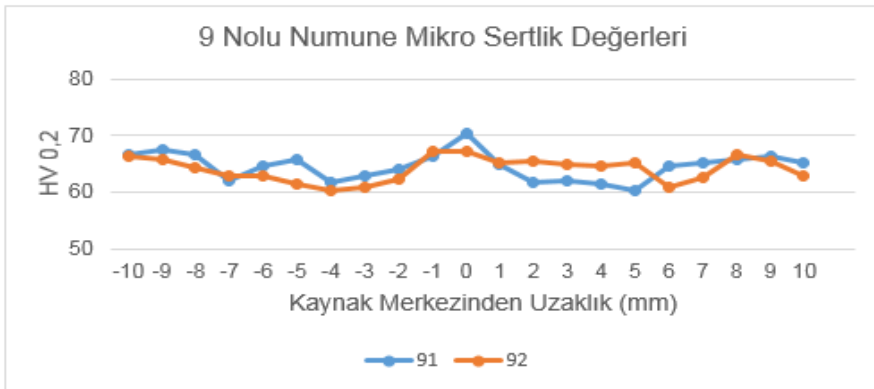
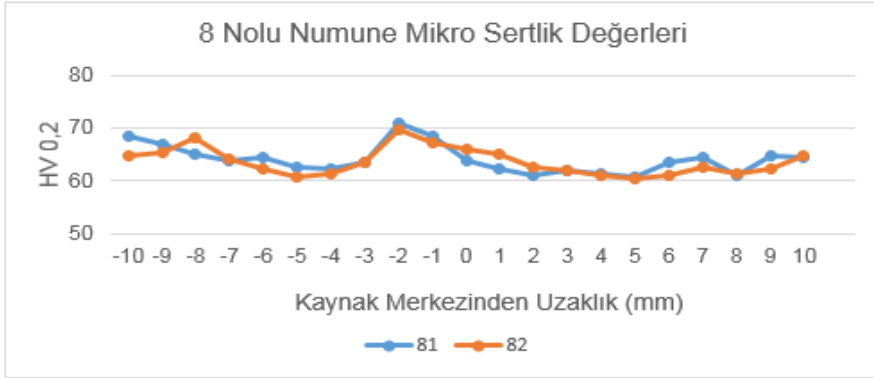
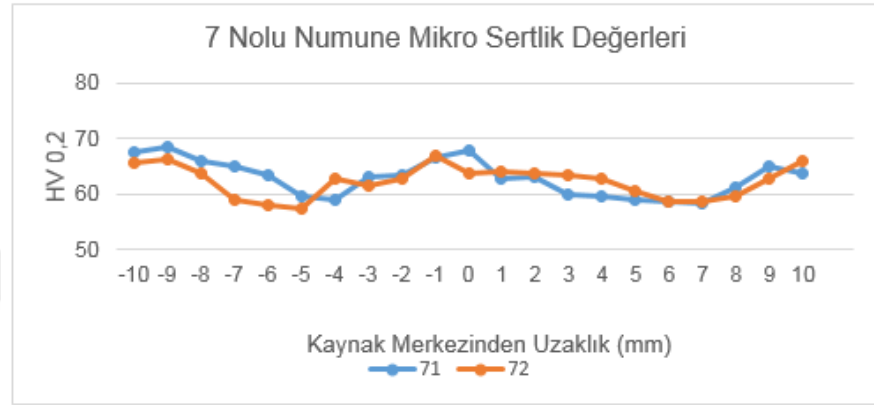
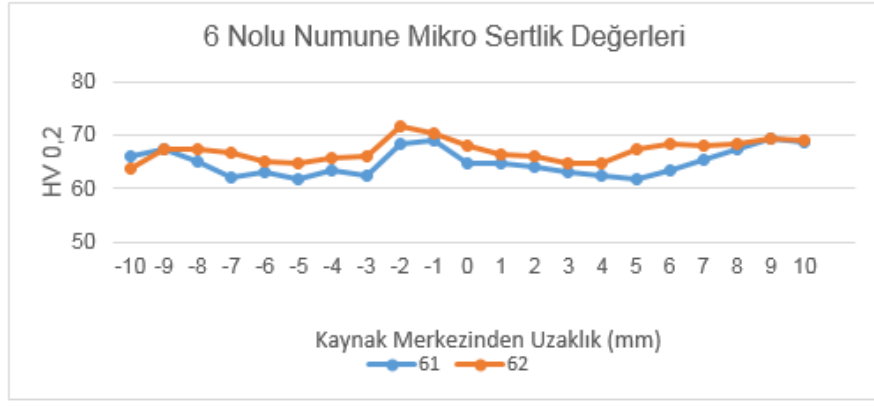
Genel olarak DYKB -1 mm ile -2 mm aralığı içinde kaldığı gözlemlenmiştir. TMEB nin ise uç genişliği bir miktar aşarak kaynak merkezinden 3,2'şer mm her iki yana etki ettiği gözlemlenmiştir. ITAB'ın ise takım omuz genişliği olan 16 mm'lik bölgeden yalnızca toplamda 0,4 mm yani kaynak merkezine göre her iki yana 8,2'şer mm'de etkili olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler ana malzeme sertliğinin ortalama 65 HV civarında, DYKB sertlik değerlerinin ise 70 HV'ye yakın ve bazı numunelerde üzerinde olduğu görülmektedir. Giriş ve çıkış bölgelerinden alınan mikro sertlik numuneleri genel olarak benzer grafikler verse de özellikler 1, 3, 7 ve 9 numaralı numunelerde bölgesel uyuşmazlıklar göze çarpmaktadır.



Şekil 5.6 Bazı numunelerin ölçülmüş mikro sertlik değerleri - 1



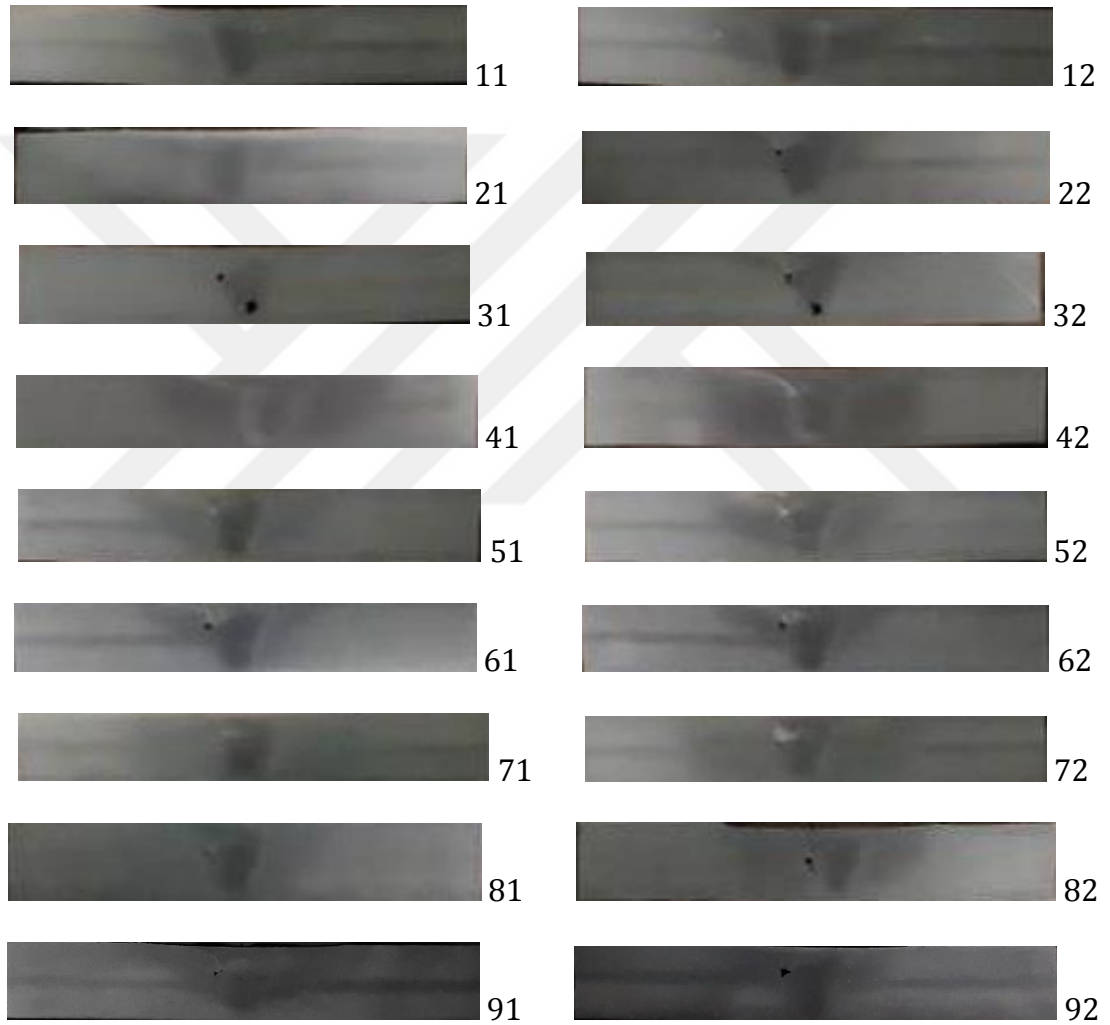
Şekil 5.6 Bazı numunelerin ölçülmüş mikro sertlik değerleri – 2



Şekil 5.6 Bazı numunelerin ölçülmüş mikro sertlik değerleri – 3

5.1.6 Makro Yapı İncelemesi

Makro inceleme sonuçları Şekil 5.7'deki gibidir. DYKB, TMEB ve ITAB seçilebilmektedir. ITAB incelendiğinde omuz genişliğini neredeyse hiç aşmadığı görülmüştür. 2, 3, 6, 8 ve 9 numaralı numunelerde göz ile görülebilir büyüklükte gözenekler görülmüştür. Bazı numunelerde ise ITAB ile TMEB ayrımlarında ve bu ayrım çizgisinin bitiminde gözenekler görülmüştür. Özellikle bu ayrım çizgisinin bitimi olan levha tabanında çentik etkisi yaratabilecek büyüklükte çatlaklar kimi numunelerde görülmüştür.



Şekil 5.7 Kaynak edilmiş olan her bir levhanın makro yapı görüntüleri

6

Sonuç ve Öneriler

6.1 Sonuçlar

Seçilmiş olan tüm kaynak parametreleri ile kaynaklar başarı ile gerçekleştirilebilmiştir.

Yapılan testler sonucunda kaynak edilmiş olan numunelerden elde edilen ortalama çekme değerlerinde, ana malzeme ortalama değerlerini yakalayan bir adet parametre çifti bulunmuştur. 4 numaralı numune, 1000 dev/dak ve 112 mm/dak takım ilerleme hızı.

Genel itibari ile de ortalama çekme değeri olan 200 MPa'ı yakalayan veya üstüne çıkabilen sekiz farklı parametre çifti bulunmuştur.

Tüm test numuneleri kaynak bölgesinden, gevrek kırılma şeklinde kopmuştur.

Eğme deneylerinde özellikle kep eğme testlerinde başarı daha fazla iken kök eğme testlerinde düşük nüfuziyet sebebiyle ayrılmalar gözlemlenmiştir. Yine de bir adet numunede hem kök hem de kep eğme testinde başarılı sonuç elde edilmiştir. 4 numaralı numune kep ve kök eğme testinde başarılı sonuç vermiştir.

Mikro yapı incelemesinde DYKB, TMEB ve ITAB gözlemlenebilmiştir.

Mikro sertlik test sonuçları daha önceki çalışmalarda elde edilen veriler ile örtüşmektedir [38-41].

Neredeyse seçili tüm parametreler ile kaynak edilen levhalardan çıkartılan en az bir adet test numunesi başarılı sonuç vermiştir. Başarılı sonuçlar çıkış bölgesine yakın bölgeden çıkartılmış numunelerde elde edilmiştir. Bunun sebebi homojen karışım yakalamak için gerekli olan süre ve mesafenin levha sonuna doğru elde edilebilmesi olabilir.

Tüm numunelerde çarpılma çok düşük seviyede kalmıştır.

Çekme, eğme ve mikro sertlik testlerine bakıldığında en iyi sonuçlar 1000d/d takım devri ve 112 mm/d kaynak hızı parametreleri ile 4 nolu numuneden elde edilmiştir.

Yine 4 nolu numune ile en iyi % uzama değeri %15,2'lik değer ile elde edilmiştir.

Çekme numunelerinden 13, 42, 43, 63, 73, 83 ve 93 nolu numuneler ana malzemenin maksimum çekme mukavemetinden daha iyi sonuç vermiştir.

Tüm parametreler ile kaynak edilmiş olan levhalardan çıkartılan çekme test numuneleri girişten çıkışa doğru yükselen değerlerde çekme dayanımı göstermiştir.

Kep eğme testlerinden numunelerin 2/3 ü başarı ile geçmesine rağmen kök eğme testinde sadece bir adet numune başarılı sonuç vermiştir. 4 nolu numune hem kep hem de kök eğme testlerinden başarı ile geçmiştir. Bu numune kök eğme testinde 4,58 kN kuvvete kadar dayanmıştır.

Kök eğme testlerinin düşük başarı ile gerçekleşmesinin ana sebebi yetersiz nüfuziyet olarak görülmüştür.

Kaynak kesitleri incelendiğinde 4 nolu numune hariç diğer tüm numunelerde içyapıda boşluklar görülmüştür. Bu içyapı boşlukları DYKB uç noktasında ve TMEB ile ITAB birleşim noktalarında görülmüştür.

Boşlukların genel sebebi yüksek ısı girdisi ve yetersiz karışma olarak değerlendirilmiştir. [42].

6.2 Öneriler

Kaynak edilecek levhadan numune çıkartmak için daha fazla yararlanmak için takım giriş ve çıkış bölgeleri ek levhalar üzerinden yapılabilir. Böylece giriş ve çıkış bölgelerinde fire verilmesi önlenir.

Kaynak öncesi yüzey temizleme işlemi her levha çifti için kaynağın hemen öncesinde yapılmalıdır.

Takım baskı kuvvetinin hesaplanmasını sağlayacak düzener ile ek parametre yaratılabilir ya da kontrollü sabit parametre yaratılmış olur.

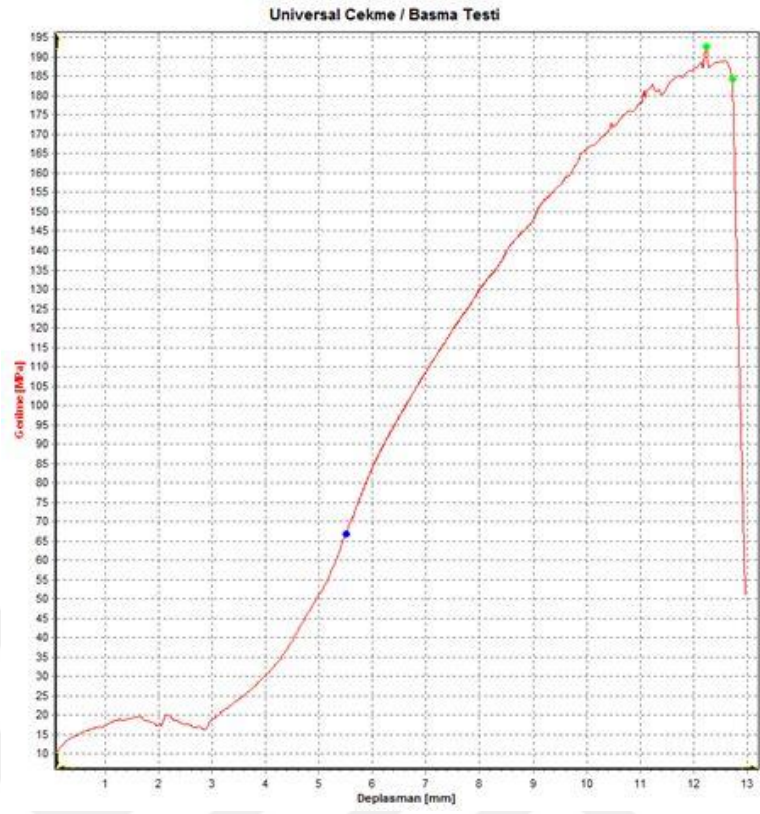
Kaynak işlemleri belirli zaman aralıklarıyla yapılırsa altlık ve takımın yeterine soğuması sağlanarak ısı girdisi kontrolü sağlanabilir.

A

Çekme Testi Grafikleri



Şekil A.1 Çekme eğrisi 11 nolu numune



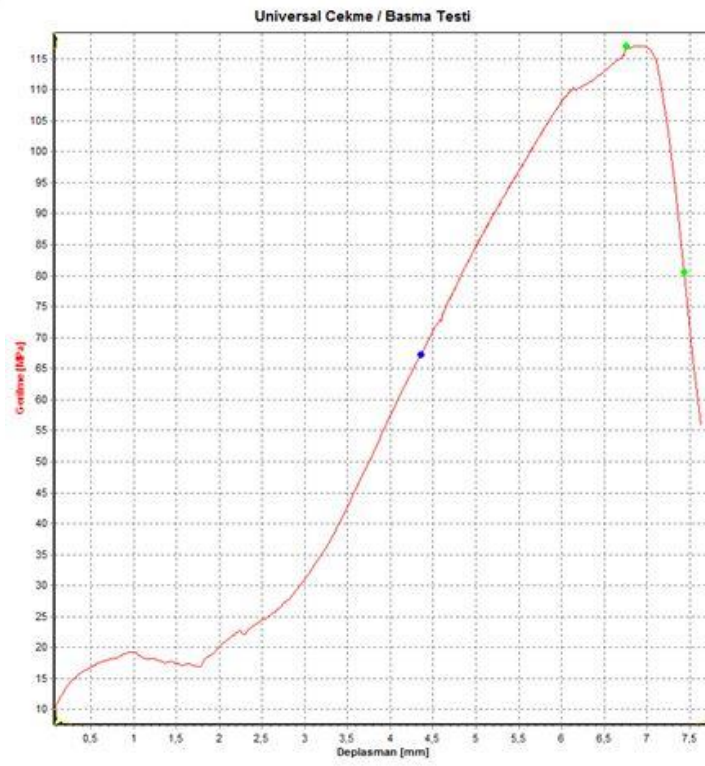
Şekil A.2 Çekme eğrisi 12 nolu numune



Şekil A.3 Çekme eğrisi 13 nolu numune



Şekil A.4 Çekme eğrisi 21 nolu numune



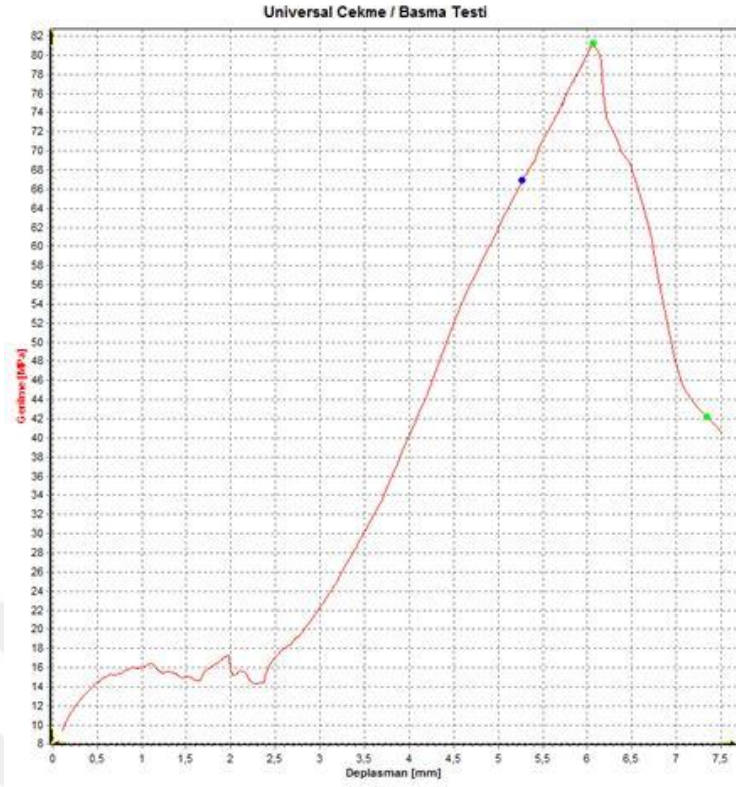
Şekil A.5 Çekme eğrisi 22 nolu numune



Şekil A.6 Çekme eğrisi 23 nolu numune



Şekil A.7 Çekme eğrisi 31 nolu numune



Şekil A.8 Çekme eğrisi 32 nolu numune



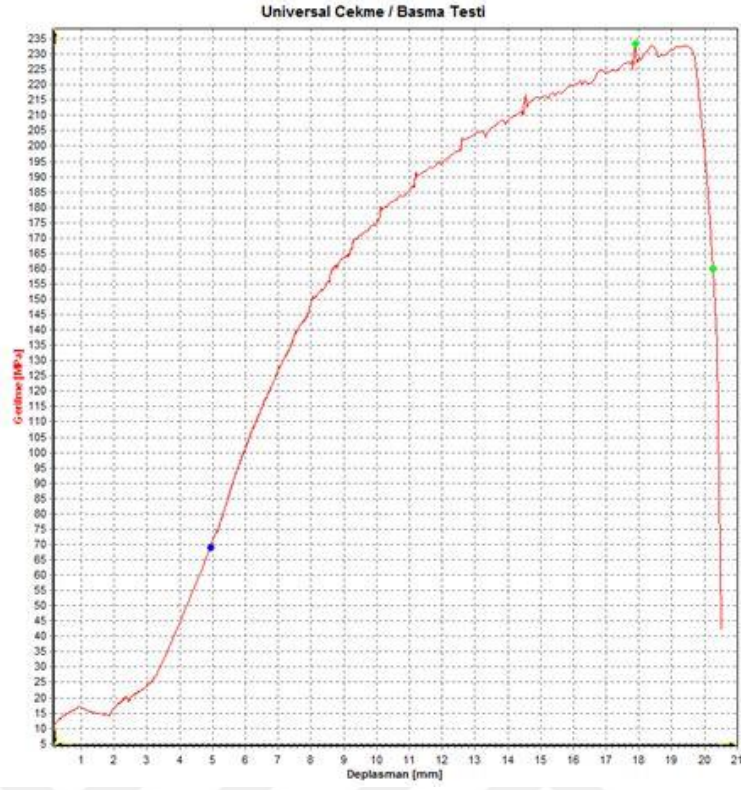
Şekil A.9 Çekme eğrisi 33 nolu numune



Şekil A.10 Çekme eğrisi 41 nolu numune



Şekil A.11 Çekme eğrisi 42 nolu numune



Şekil A.12 Çekme eğrisi 43 nolu numune



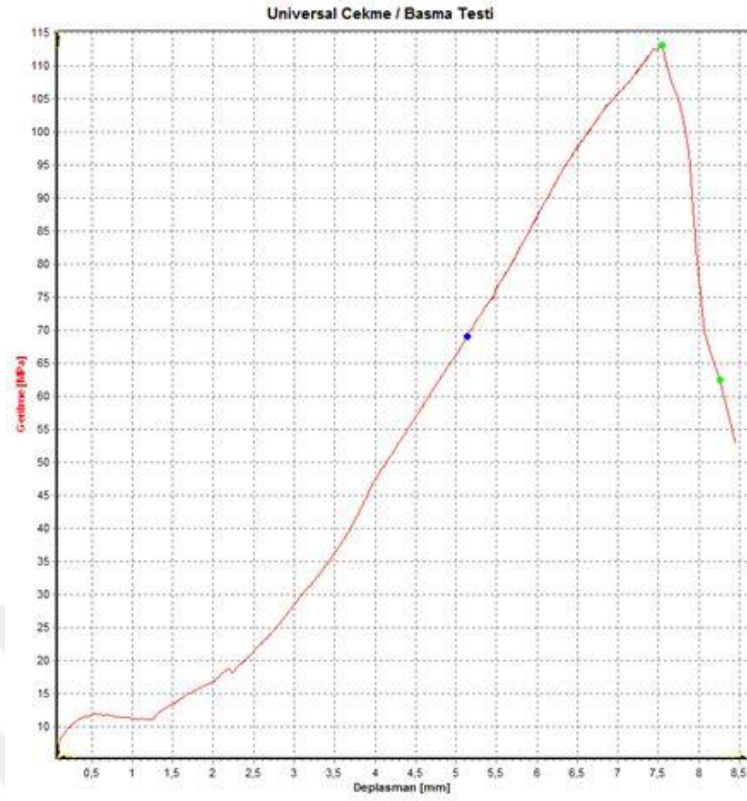
Şekil A.13 Çekme eğrisi 51 nolu numune



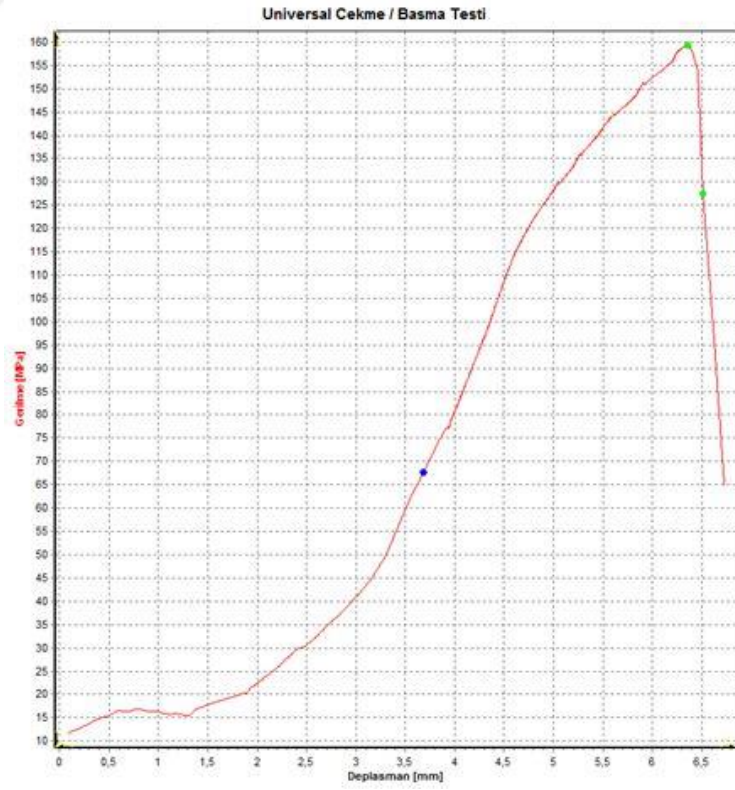
Şekil A.14 Çekme eğrisi 52 nolu numune



Şekil A.15 Çekme eğrisi 53 nolu numune



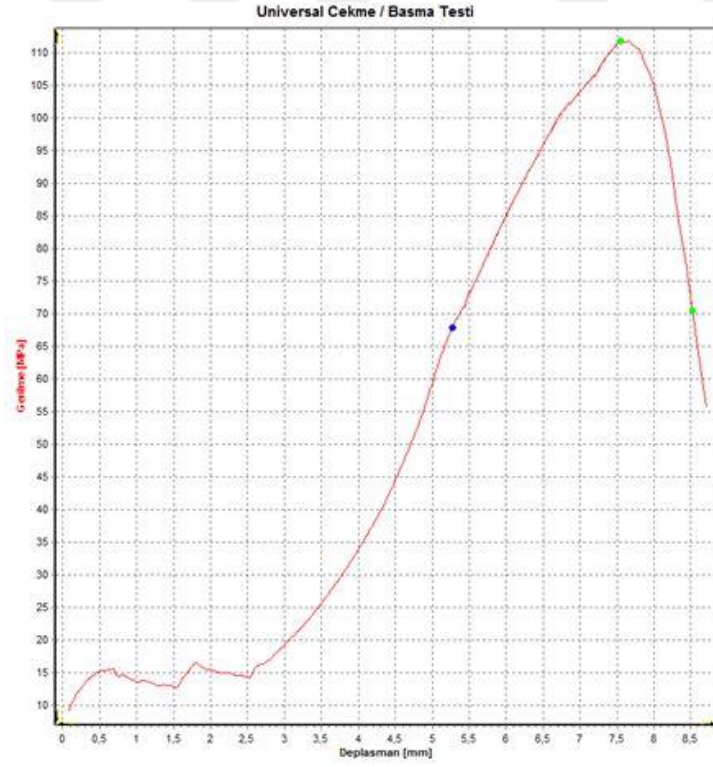
Şekil A.16 Çekme eğrisi 61 nolu numune



Şekil A.17 Çekme eğrisi 62 nolu numune



Şekil A.18 Çekme eğrisi 63 nolu numune



Şekil A.19 Çekme eğrisi 71 nolu numune



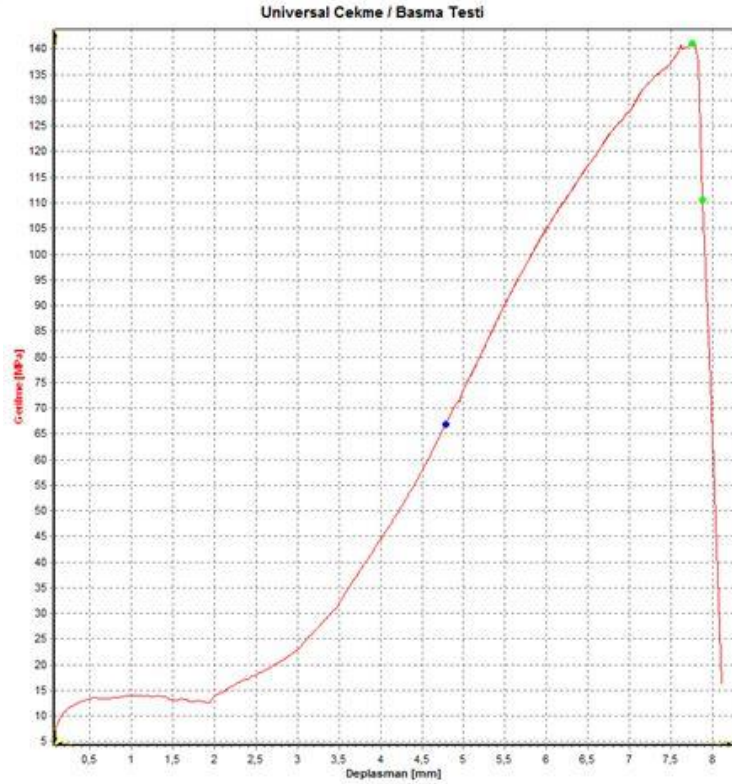
Şekil A.20 Çekme eğrisi 72 nolu numune



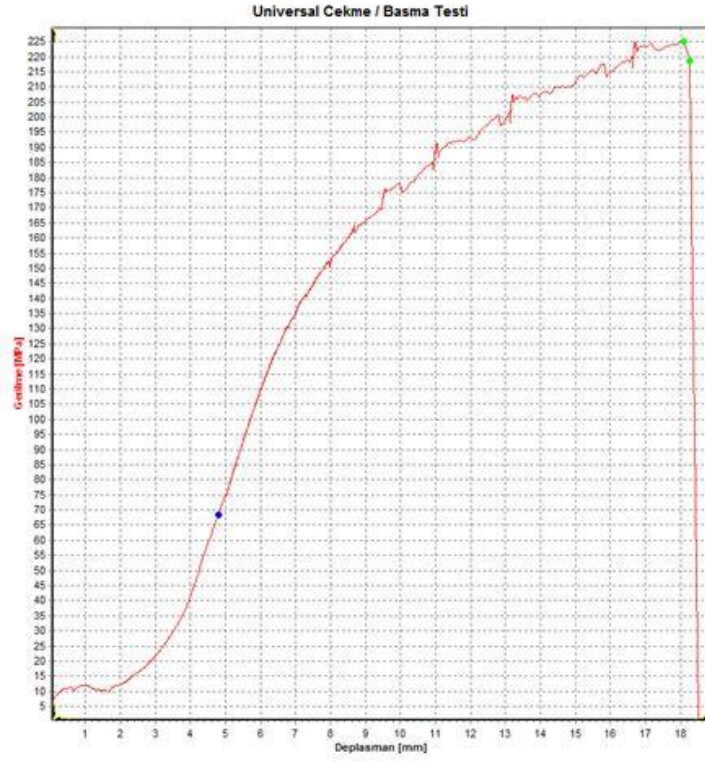
Şekil A.21 Çekme eğrisi 73 nolu numune



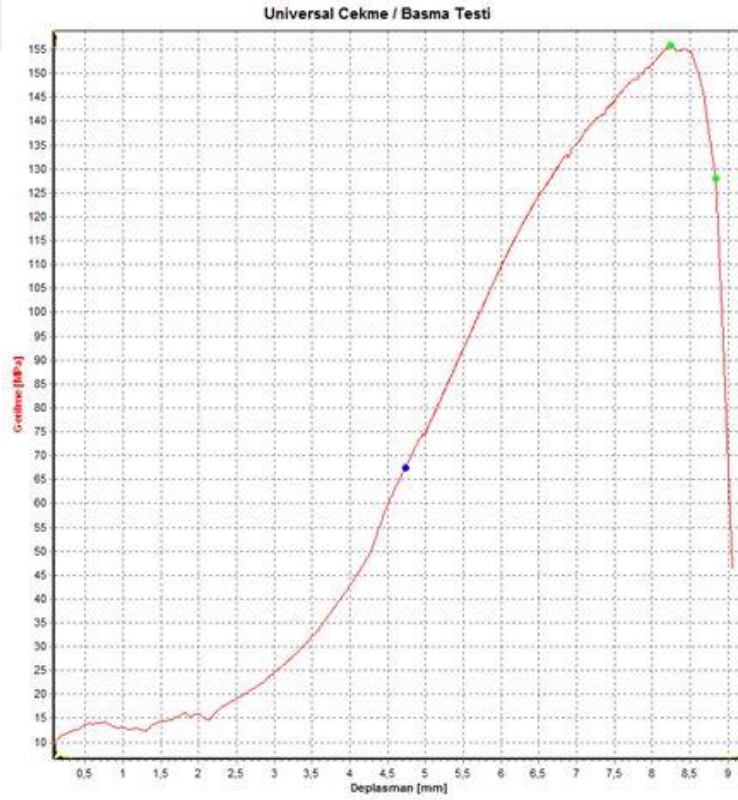
Şekil A.22 Çekme eğrisi 81 nolu numune



Şekil A.23 Çekme eğrisi 82 nolu numune



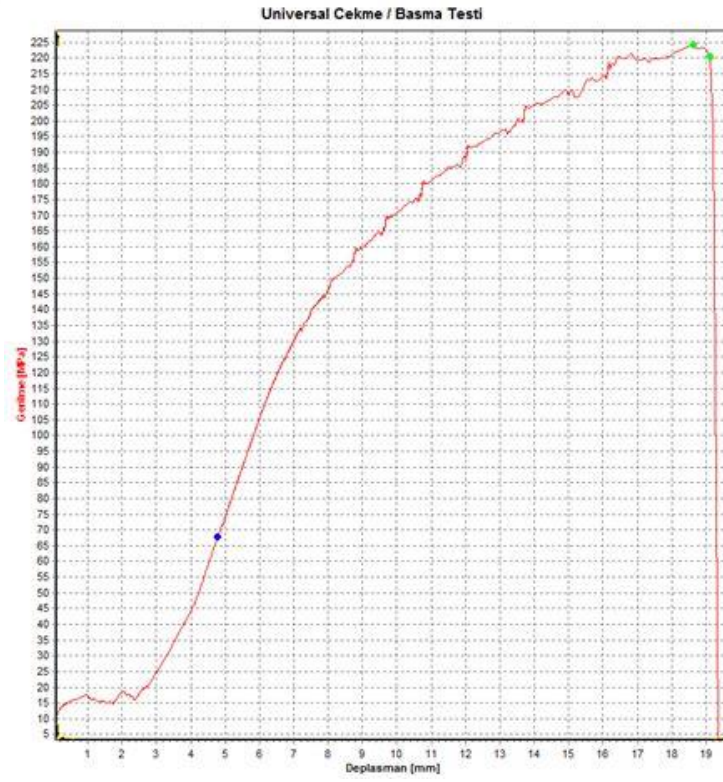
Şekil A.24 Çekme eğrisi 83 nolu numune



Şekil A.25 Çekme eğrisi 91 nolu numune



Şekil A.26 Çekme eğrisi 92 nolu numune



Şekil A.27 Çekme eğrisi 93 nolu numune

- [1] N. Gültekin, Kaynak Tekniği, Bölüm 1: Genel Esaslar, s.1, 1991.
- [2] M. Gülbudak, Farklı Alüminyum Levha Çiftinin Sürtünme Karıştırma Kaynak Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2013.
- [3] A. Özdiğer, Alüminyum Alaşımlarının Gaz Altı Kaynağında Koruyucu Gaz Karışımlarının Nüfuziyet ile Diğer Kaynak Dikişi Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Bölümü, İstanbul, Türkiye, 2006.
- [4] R.S. Mishra ve M.W. Mahoney, Friction Stir Welding and Processing, ASM International, 2007. DOI:10.1361/fswp2007p001
- [5] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Temple-Smith ve C.J. Dawes, Improvements relating to friction welding, E.P. Office, 1993.
- [6] D. Lohwasser ve Z. Chen, Friction Stir Welding From Basic to Applications, Woodhead Publishing Limited, 2010.
- [7] G. Çam ve S. Mıstıkoğlu, Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-alloys, Journal of Materials Engineering and Performance, 2014.
DOI: 10.1007/s11665-014-0968-x
- [8] S.R. Ren, Z.Y. Ma ve L.Q. Chen, Effect of welding parameters on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al-Mg-Si alloy, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [9] D. Günay, "Alüminyum Sektörü Hakkında Bir Değerlendirme" Türkiye Kalkınma Bakanlığı A.Ş. Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Müdürlüğü, 2006.
- [10] J.C. Benedyk, "International Temper Designation Systems for Wrought Aluminum Alloys" Part I: Strain Hardenable (H Temper) Aluminum Alloys, Light Metal Age, 2009.
- [11] A. Akdoğan Eker, Al ve Al Alaşımlarının Otomotiv Endüstrisindeki Kullanımı [http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme2/Aluminyum ve Alüminyum Alasimlari.pdf](http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme2/Aluminyum%20ve%20Aluminyum%20Alasimlari.pdf), 2008, erişim tarihi 16.8.2019
- [12] European Aluminium Association, The Aluminium Automotive Manual <https://www.european-aluminium.eu/media/1533/aam-materials-3-designation-system.pdf>, 2002, erişim tarihi 16.8.2019
- [13] TMMOB Malzeme Mühendisleri Odası, 137 Nolu Dergi, Alüminyum Raporu, s.9-13, 2004.
- [14] J.R. Davis, Alloying: Understanding the Basics, Aluminum and Aluminum Alloys, p351-416, 2001. DOI:10.1361/autb2001p351
- [15] G.R. Bradley ve M.N. James, "Geometry and microstructure of metal inert gas and friction stir welded aluminium alloy 5383-H321", 2000.

- [16] G. am, "Sürtünme Karıştırma Kaynağındaki Gelişmeler", IV. Ulusal Kaynak Kongresi, s.47, 2003.
- [17] M.K. Külekçi, 'Mechanical Properties of Friction Stir-Welded Joints of AlCu4SiMg Aluminium Alloy', Kovove Materialy, 41, 2, pp. 97-105, 2003.
- [18] C. Odabaş, "Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynağı" Askaynak, http://www.askaynak.com.tr/contents/34/20110704120912_aluminyumun-kaynagi.pdf, 2007.
- [19] R. Johnso ve S. Kallee, "Friction Stri Welding", Materials World Volume 7, No:12, s.751-753, 1999.
- [20] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Temple-Smith ve C.J. Dawes, Improvements relating to friction welding, E.P. Office, 1993.
- [21] D. Lohwasser ve Z. Chen, Friction Stir Welding From Basic to Applications, Woodhead Publishing Limited, 2010.
- [22] G. am ve S. Mıstıkoğlu, Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-alloys, Journal of Materials Engineering and Performance, 2014.
DOI: 10.1007/s11665-014-0968-x
- [23] S.R. Ren, Z.Y. Ma ve L.Q. Chen, Effect of welding parameters on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al-Mg-Si alloy, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [24] S.S. Yılmaz, B.S. Ünlü, M. Uzkut ve D. Ertürk, Alüminyum Alaşımlarında Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve Uygulamaları, Mühendis ve Makina, cilt 57, sayı 676, s. 56-63, 2016.
- [25] L. Hongjun, G. Jian ve L. Qinchuan, Fatigue of Friction Stir Welded Aluminum Alloy Joints: A Review, 2018.
DOI: 10.3390/app8122626
- [26] E. Kaluç ve E. Taban, Sürtünen Eleman ile Kaynak (FSW) Yöntemi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası 460 Numaralı Yayın, s. 27-57, 2007.
- [27] R.S. Mishra ve M.W. Mahoney, Friction Stir Welding and Processing, ASM International, 2007.
DOI:10.1361/fswp2007p001
- [28] B. Çevik, "Sürtünme Karıştırma Kaynak Parametrelerinin Kalıntı Gerilmelere ve Birleştirmenin Mekanik Özelliklere Etkisi", Gazi Üniversitesi Doktora Tezi, s.22-23, 2014.
- [29] H.T. Serindağ, "Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Sürtünme Karıştırma Kaynağının Modellenmesi", Dokuz Eylül Üniversitesi, Doktora Tezi, s.48-50 2014.
- [30] M. Özsoy ve E. Kaluç, "Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynağının Esasları", Mühendis ve Makine Cilt 43, Sayı 513, 2001.

- [31] G. am, "Friction Stir Welded Structural Materials: Beyond Al-Alloys", International Material Reviews, 2011.
DOI 10.1179/095066010X12777205875750
- [32] R.R. Abuaisha, "Corrosion Behaviour of Friction Stir Welded AA5xxx aluminium Alloys", Manchester Üniveritesi, Doktora Tezi, s.60,61, 2012.
- [33] Y.N. Zhang, X. Cao, S. Larose ve P. Wanjara, "Review of Tools for Friction Stir Welding and Processing", Canadian Metalurgical Quarterly, 2012.
DOI 10.1179/1879139512Y.0000000015
- [34] S. Dalkılıç, "Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve Havacılık ve Uzay Endüstrisindeki Kullanım Alanları", Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, Cilt 5, Sayı 4, s.25-33, 2012.
- [35] ř. Mert ve S. Mert, "Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Yönteminde Kullanılan Makine ve Ekipmanların İncelenmesi", İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, Cilt 2, Sayı 3, s.121-129, 2013.
- [36] E. Güleç ve M.İ. Uysal, Sürtünme Karıştırma Kaynağı Araştırma Projesi, Dokuz Eylül Üniveritesi Makine Mühendisliğı Bölümü, 2006.
- [37] ESAB Friction Stir Welding – the ESAB Way.
- [38] A. Haşalı, U. aydař, E. nal ve F. Karaca, "AA5251 Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilebilirliğıne Uç Geometrisinin Etkisi", Makine Teknolojileri Elektronik dergisi, 2007.
- [39] F. Sarsılmaz ve N. zdemir, "SKK Yöntemi ile Birleştirilen Alüminyum Alaşımlarında İşlem Parametrelerinin Mikro Yapı ve Mekanik zellikler zerindeki Etkisi", Selçuk Üniveritesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu Teknik-Online Dergisi, Cilt 7, Sayı 2, 2008.
- [40] W.V. Haver, B. de Meester, A. Geurten ve J. Defrancq, Innovative Joining Critical Aluminium Structures Whit the Friction Ster Welding Techique Casstir, s.77-91, 2010.
- [41] L.A.C. de Filippis, L.M. Serio, D. Palumbo, R. de Finis ve U. Galietti, "Optimization and Characterization of the Friction Stir Welded Sheetsos AA5754-H111: Monitoring of the Quality of Joints whit Thermographic Techniques", Department of Mechanics Mathematics and Management (DMMM), Politecnico di Bari, Italy, 2017.K. N. Rao, "A novel class imbalance learning method using subset filtering," 2012.
- [42] M. Bilgin, ř. Karabulut ve A. zdemir, "Alüminyum Magnezyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Kaynak Edilebilirliğinin Değerlendirilmesi", Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji, 2017.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgisi: hgsanseven@gmail.com

Konferans Bildirileri

- 1 H. G. Şanseven. T. Mert , “Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Kaynak Dikiş Kalitesine Etkileri”, 4. Uluslararası Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Kongresi, p.313-321, 23-24 Nisan 2019, İstanbul, Türkiye
<http://www.muhendislikmimarliktasarimkongresi.org/konre-kitaplari>

