T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN 3000 SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARIN YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Murat Tahir YILDIRIM

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2010

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN 3000 SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARIN YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Murat Tahir YILDIRIM

Prof.Dr. Ali BAYRAM
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2010

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN 3000 SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARIN YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez ..../...../201.. tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof.Dr.Ali BAYRAM Prof.Dr.Agah UĞUZ Prof.Dr.Recep EREN
Danışman

ÖZET

Bu çalışmada uzay sanayi ve otomotiv sanayinde yeni bir kaynak metodu olarak karşımıza çıkan "Sürtünme Karıştırma Kaynağı" yönteminin 3000 serisi Alüminyum alaşımlarında yorulma davranışı incelenmiştir. Bu amaçla tek eksenli yorulma test cihazı mevcut sistemler baz alınarak tasarlanmış ve imalatı yapılmıştır. Kaynağın uygulama yönteminde teknolojik eksikliklerden kaynaklanan sapmalar göz önüne alındığında sonuçlar bu kaynak metodunun 3000 serisi alüminyum alaşımlarında başarı ile kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme karıştırma kaynağı, 3000 serisi Alüminyum alaşımları, yorulma, yorulma test cihazı

.

ABSTRACT

In this study, new type of welding technology that starts to using widely in aerospace and automotive industry named “Friction Stir Welding” and the alloys on 3000 series aluminium alloys fatigue behaviours have been studied. For this purpose axial fatigue testing machine has been designed and produced. If we consider the technolocigal difficulties at welding application, the results shows us this welding technique can be used in 3000 series Alumium alloys successfully.

Key Words: Friction stir welding, 3000 series Aluminium alloys, fatigue, fatigue testing machine.

İÇİNDEKİLER **Sayfa**

TEZ ONAY SAYFASI II
ÖZET III
ABSTRACT IV
İÇİNDEKİLER V
ÇİZELGELER DİZİNİ VII
ŞEKİLLER DİZİNİ VIII
SİMGELER DİZİNİ XII
GİRİŞ 1

KAYNAK ÖZETLERİ

1. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI
1.1 GİRİŞ 1
1.2. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞININ UYGULANMASI 2
1.3 KAYNAĞIN METALÜRJİSİ 3
1.4 KAYNAĞA ETKİ EDEN FAKTÖRLER 5
1.4.1 TAKIM GEOMETRİSİ VE MALZEMESİ 6
1.4.2 KAYNAK PARAMETRELERİ 11
1.4.3 MALZEME CİNSİ VE KALINLIĞIN ETKİLERİ 14
1.4 YÖNTEMİN UYGULAMA ALANLARI 16
1.6 YÖNTEMİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI 18
1.6.1 AVANTAJLARI 18
1.6.2 DEZAVANTAJLARI 19

2. ALÜMİNYUM

2.1. ALÜMİNYUM 20
2.1.1. ALÜMİNYUM VE BİLEŞENLERİ 21
2.1.2 ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI 21
2.1.3 ALÜMİNYUM ÜRETİMİ 24
2.1.4 ALÜMİNYUMUN BİRİNCİL ÜRÜNLERİ 25
2.1.4.1 AÜMİNYUM HADDELEME ÜRÜNLERİ 26
2.1.4.2 ALÜMİNYUM EKSTRÜZYON ÜRÜNLERİ 26
2.1.4.3 ALÜMİNYUM İLETKEN TELLER 26
2.1.4.4 ALÜMİNYUM PARÇA DÖKÜM ÜRÜNLERİ 26
2.1.5 ALÜMİNYUMUN KULLANIM ALANLARI 27
2.2 YORULMA 29
2.2.1 YORULMA ANALİZİ 30
2.2.2. YORULMA KIRILMASINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER 31
2.2.2.1 YÜZEY KOŞULLARI 31
2.2.2.2 SICAKLIK DEĞİŞİMİ 31
2.2.2.3 ÇEVRESEL ETKİLER 32
2.2.2.4 FREKANS 32

2.2.2.5 GERİLME KOŞULLARI 33
2.2.3 YORULMA ÇATLAKLARININ ÖZELLİKLERİ 34
2.2.4 YORULMA ÇATLAKLARININ GÖRÜNÜMÜ 36
2.2.5 YORULMA DENEYLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ 39
2.2.6 YORULMA DENEYLERİ 40
2.2.6.1 EKSENEL GERİLMELİ YORULMA DENEYİ 42
2.2.6.2 EĞME GERİLMELİ YORULMA DENEYİ 43
2.2.6.3 BURULMA GERİLMELİ YORULMA DENEYİ 45
2.2.6.4 BİLEŞİK GERİLMELİ YORULMA DENEYİ 45
2.2.7 RÜZGAR TÜRBİNİ VE KANATLARINDAKİ YORULMA 46
2.2.7.1 YORULMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER 47
2.2.7.2 KANAT MALZEMELERİNDEKİ YORULMA ÖZELLİKLERİ 48

MATERYAL VE YÖNTEM

3. DENEYLERİ UYGULANMASI

3.1. TEST CİHAZI TASARIM VE İMALATI 49
3.1.1 CİHAZIN ÇALIŞMA PRENSİBİ 55
3.2 SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞININ UYGULANMASI 58
3.2.1 KAYNAK NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI 58
3.2.2. KAYNAK ÖNCESİ HAZIRLIKLAR 58
3.3 YORULMA DENEYLERİNİN YAPILMASI 62
3.3.1 DENEY PARAMETRELERİNİN SEÇİMİ 62

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1 DENEY SONUÇLARI 66
4.2 MALZEME İÇ YAPISININ İNCELENMESİ 68
4.3 DENEY SONUÇLARININ İNCELENMESİ 72

5. SONUÇ 74

KAYNAKLAR 75
ÖZGEÇMİŞ 79
TEŞEKKÜR 80

ÇİZELGELER DİZİNİ **Sayfa**

Tablo 3.1 Alüminyum elementinin özellikleri 19

Tablo 3.2 Dövülebilen alüminyum alaşım 20

Tablo 3.3 Ana menevişleme işaretleri 21

Tablo 3.4 Döküm alüminyum alaşımları 22

Tablo 2.5 R değeri ile gösterilen yorulma yükü modları 40

Tablo 4.1 Deney sonuçları 66

ŞEKİLLER DİZİNİ **Sayfa**

Şekil 1.1. Sürtünme karıştırma kaynağını şematik gösterimi 1

Şekil 1.2. SKK'nın uygulanışının şematik gösterimi 2

Şekil 1.3. SKK sonucu kaynak bölgesinde oluşan soğan halkaları 3

Şekil 1.4. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan iç yapının şematik görünümü 4

Şekil 1.5. SKK takımının şematik gösterimi 6

Şekil 1.6. Whorl^{TM} tipi SKK takımlarının malzeme kalınlığına göre değişik Biçimleri 8

Şekil 1.7. MX TrifluteTM takımının şematik gösterimi 9

Şekil 1.8. TWI tarafından geliştirilen Flared-TrifluteTM takımları 10

Şekil 1.9. TWI tarafından geliştirilen A-skewTM takımları 10

Şekil 1.10. Takım omzu geometrileri, alttan görünüş 11

Şekil 1.11. Kaynak merkezinden uzaklaştıkça kaynak ilerleme hızı ve sertlik değeri arasındaki ilişki 13

Şekil 1.12. SKK yöntemi ile, karıştırıcı ucun eğik konumda daldırılması ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesi 15

Şekil 1.13. SKK ile birleştirilmiş alüminyum ekstrüzyon panelleri 16

Şekil 1.14. Space Shuttle External Tank projesi ve Marshall Space Flight Center laboratuarındaki SKK sistemlerinden görüntüler 17

Şekil 1.15. SKK ile birleştirilen Al-alaşımı prototip otomobil jantı 17

Şekil 2.1. Çatlak ilerleme modları 34

Şekil 2.2 Pürüzsüz bir numunede çoklu yorulma çatlak başlangıcı 37

Şekil 2.3 Alüminyum alaşımının kırılma yüzeyindeki duraklama çizgileri 37

Şekil 2.4 Yorulma kırılmalarının yüzeylerindeki işaretlerin şematik gösterimi 38

Şekil 2.5 7055 Alüminyum alaşımının S - N eğrileri 40

Şekil 2.6 Yorulma testi için sinüzoidal yükleme 41

Şekil 2.7 Eksenel gerilmeli yorulma deneyi cihazı 42

Şekil 2.8 Düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyi cihazı şematik gösterimi 43

Şekil 2.9 Sabit eğme momentli yorulma cihazı 44

Şekil 2.10 Ankastre kiriş türü yorulma deneyi cihazı 44

Şekil 2.11 Burulma momenti sağlayan deney düzeneği 45

Şekil 2.12 Çeşitli kanat malzemelerinin yorulma özellikleri 48

Şekil 3.1 Düz örgülü cam/ epoksi kompozit malzemelerin eğme yorulmasında kullanılan yorulma cihazı 49

Şekil 3.2 Cihazın 3D tasarım programında tasarlanmış izometrik görünüşü 50

Şekil 3.2.1 Cihaz görüntüsü 52

Şekil 3.3 Numune bağlantısı 53

Şekil 3.4 Cihaz genel görünümü 54

Şekil 3.5 Ana mil volan bağlantısı 55

Şekil 3.6 Genlik ayar mekanizması 56

Şekil 3.7 Kontrol butonları ve dijital sayaç 57

Şekil 3.8 Levhaların tezgaha bağlanması 60

Şekil 3.9 Kaynakta kullanılan uç geometrisi 61

Şekil 3.10 Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş Al levhalar 61

Şekil 3.11 Yorulma deney numunelerinin boyutları 62

Şekil 3.12 Kullanılan malzemeye ait test sertifikası 63

Şekil 4. Deney sonuçlarına göre oluşturulmuş N-S diyagramı 67

Şekil 4.1 2140 dev/dak devir hızı ve 40 mm/dak ilerleme hızında kaynak
Yapılmış numunenin ilerleme bölgesinde iç yapı 68

Şekil 4.2 2140 dev/dak devir hızı ve 40 mm/dak ilerleme hızında kaynak
Yapılmış numunenin çekilme bölgesinde iç yapı 69

Şekil 4.3 1070 dev/dak devir hızı ve 40 mm/dak ilerleme hızında kaynak
Yapılmış numunede zigzag oluşumu 70

Şekil 4.4 2140 dev/dak devir hızı ve 40 mm/dak ilerleme hızında kaynağı
Yapılmış numuneye ait x1000 büyütülmüş kırılma yüzey görüntü 71

Şekil 4.5 Kopan deney numuneleri 73

SİMGELER DİZİNİ

Simge	Adı	Birimi
S	Eğilme gerilmesi	
N	Tekrar sayısı	(-)
R	Gerilim oranı	(-)
σ_e	Maksimum eğilme	MPa
F_e	Eğilme kuvveti	N
I	Moment kolu	mm
E	Elastisite modülü	daN/cm^2
I	Atalet momenti	mm^4
B	Numune genişliğini	mm
H	Numune kalınlığı	mm
da / dN	Çatlak ilerleme hızı	m/saykıl
K	Gerilim şiddeti faktörü	MN /m $^{-3/2}$
C	Deneysel sabit	(-)
m	Deneysel sabit	(-)
da	Çatlak boyu	m
dN	Belirli bir gerilim altında malzeme kırılıncaya kadar geçen süre içerisindeki tekrar sayısı	saykıl

İ	Hasar sıra numarası	(-)
n	Her testteki numunelerin toplam sayısı	(-)
TS - EN	Türk Standartları Enstitüsü	(-)
ASTM	Amerikan Standartları Enstitüsü	(-)
Fmax	Maksimum kuvvet	N
A	Kesit alanı	mm^2
σ_a	Akma mukavemeti	MPa
σ_e	Maksimum eğilme gerilmesi	MPa
F_e	Maksimum eğme yükü	N
L	Destek mesafesi	mm
B	Numune genişliği	mm
H	Numune kalınlığı	mm
l	Moment kolu	mm
f	Genlik	mm
E	Elastikiyet modülü	daN/cm^2
I	Atalet momenti	cm^4

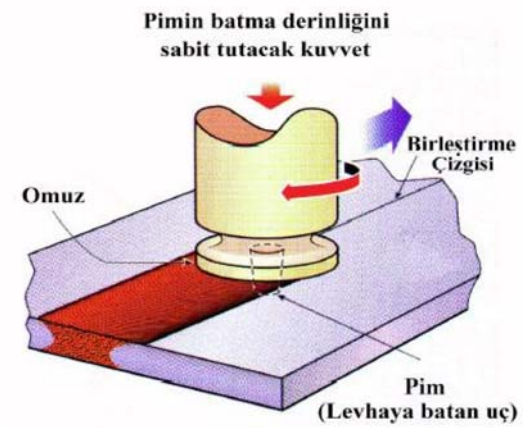
KAYNAK ÖZETLERİ

1.SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

1.1. GİRİŞ

Yeni geliştirilmiş malzemeler genellikle modern birleştirme tekniklerine ihtiyaç duyarlar. Son yirmi yılda alaşımların geliştirilmesinde bu malzemelerin kaynağı ile ilgili büyük ilerlemeler olmuştur. 1991'de Cambridge (İngiltere)'deki The Welding Institute (TWI) tarafından sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) bulunmuş ve üretimde kullanıldığı şekline geliştirilmiştir (Nicholas 2000). Bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı, düz ve bindirmeli alüminyum alaşım kaynakları için yeni bir kaynak tekniğidir (Kurt 2004). Geleneksel ergitmeli kaynak yöntemleriyle kaynağı güç olan, özellikle yaşlanma sertleştirilmesine tabi tutulmuş, alüminyum alaşımlarının kaynağında, kısa kaynak süresi, minimum yüzey hazırlama ve otomasyon kolaylığı gibi avantajları sayesinde başarıyla kullanılmaktadır (Şık 2005).

Sürtünme karıştırma kaynağının uygulanışı Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Birleştirilecek parçalar, alın alına aralarında boşluk kalmayacak şekilde sabitlenir. Yöntemin uygulama aşaması iki farklı şekilde olabilir. Parçaların hareketi söz konusu olabileceği gibi, takımın dönme ve ilerleme hareketi de mümkün olmaktadır (Şık 2003).



Şekil 1.1. Sürtünme karıştırma kaynağını şematik gösterimi

İşlem, kaynak yapılacak malzemeden daha sert bir sürtünme aparatının dönen ucu ile kaynak yapılacak parçaların birleşme bölgesinde ısı meydana getirilmesi prensibine dayanır (Kurt 2004). Hem uç, hem sürtünme aparatından kaynaklanan bu sürtünme ısısı, sürtünme aparatının altında ve ucun çevresinde plastik bir bölgenin oluşmasına önayak olur. Ancak ulaşılan sıcaklık, malzemenin ergime noktasına ulaşılması için yeterli değildir (Hattingh 2006) .

2XXX ve 7XXX serisi gibi yüksek alaşımlı hava endüstrisi malzemelerinin, yüksek sertliğe sahip, yorulma ve kırılma dayanımı yüksek kaynaklarının yapılmasındaki güçlük, bu tür malzemelerin birleştirilmesi için kaynak kullanımını büyük ölçüde kısıtlamıştır. Bu alüminyum alaşımları, kötü katılaşma mikroyapısı ve füzyon bölgesindeki porozite nedeniyle genel olarak kaynaklanamaz olarak sınıflandırılmıştır. Ayrıca, mekanik özelliklerdeki kayıp, esas metalle kıyaslandığında çok önemlidir. Bu faktörler, bu alaşımların geleneksel yöntemlerle birleştirilmesini oldukça zorlaştırmaktadır. Bazı alüminyum alaşımları direnç kaynağı ile kaynaklanabilmektedir, ancak yüzeydeki oksit, yüzey hazırlama için büyük bir sorun teşkil etmektedir (Mishra 2005). Sürtünme karıştırma kaynağı bu tür alaşımların sorunsuz olarak kaynaklanmasını mümkün kılmıştır.

1.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulanması

Sürtünme karıştırma kaynağının temel uygulanışı oldukça basittir. Tükenmeyen tipte, dönen bir takıma bağlı, özel üretilmiş bir sürtünme aparatı (takım omuzu) ve karıştırıcı uç, birleştirilecek sac veya levhaların birleşme köşesine daldırılır ve birleşme çizgisi boyunca, mil etrafında döndürülerek ilerletilir (Şekil 1.2). Takım iki ana amaca hizmet eder: iş parçasının ısıtılması ve bağlantının oluşması için malzemenin akışı (Mishra 2005) .



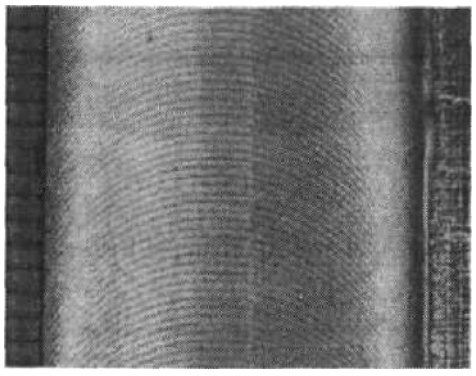
Şekil 1.2. SKK'nın uygulanışının şematik gösterimi

Karıştırıcı uç, daha geniş çaplı bir metal gövdeye bağlı, daha küçük çaplı bir sonda olarak şekillenmiştir. Karıştırıcı uç birleşme bölgesi içine daldırıldığında (karıştırıcı ucun dalma derinliği kaynak nüfuziyeti olarak da söylenebilir) geniş çaplı omuz diye tarif edilen metal kısım birleştirilecek yüzeylere önce bir temas yapar. Omzun malzemeye teması kaynak bölgesine ilave bir ısı sağlar. Karıştırıcı uçtan omuza kadar olan bölgedeki kombine sürtünme ısısı, gömülmüş olan karıştırıcının çevresi ile malzeme üst yüzeyi ve omzun temas ettiği temas yüzeyinde yumuşamış bir metal oluşturur. Isıl olarak yumuşayan metal karıştırıcı uca doğru giderek daralan ancak üst yüzeyde omuz ile temas eden daha geniş bir görünüm arz eder. Karıştırıcı uç çevresinde malzeme akışı, karıştırıcı uç arkasında ise malzeme ile dönen uç arasında izafi bir dönüş meydana gelmektedir (Kurt 2004).

1.3 Kaynağın Metalürjisi

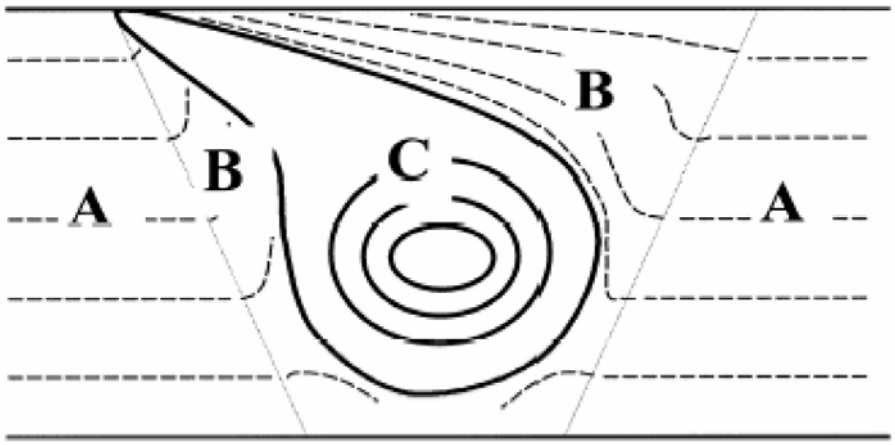
Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile kaynak yapılan bir bağlantıda göze ilk çarpan şey muhtemelen soğan halkalarıdır. Şekil 1.3'de bu yöntem ile kaynak yapılmış bir bağlantıdan alınan enine kesit görülmektedir. Takımın dönme düzlemine 900'lük bir düzlemde bu girdap görünümlerini anlamak oldukça zordur. Soğan halkalarının bu oluşumlarını, ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) duvarlarından akan ve soğumuş malzemenin görünümü veya yansıması olarak ifade etmek olasıdır.

Soğan halkalarının oluşumunun nedeninin, takımın dönme sırasında ileri doğru hareketi olduğu belirtilmektedir. Oluşan dairesel hareketler, daire halkalarını yönlendirir. Bu nedenle kaynak bölgesindeki karışma tam ve dikkatli bir şekilde olmalıdır (Mert 2003) .



Şekil 1.3. SKK sonucu kaynak bölgesinde oluşan soğan halkaları

Sürtünme karıştırma kaynağı sırasında kaynak bölgesinde meydana gelen aşırı plastik deformasyon ve açığa çıkan yüksek ısının ortak etkisi; karıştırılan bölgede yeniden kristalleşme ve yapının değişmesi, karıştırılan bölge içinde ve etrafında çökeltilerin çözünmesi ve irileşmesi sonucunu doğurur (Mishra 2005). Kaynak bölgesinde oluşan iç yapı Şekil 1.3'te şematik olarak gösterilmiştir. Kaynak bölgesi üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Bu bölgeler dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB), termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB) ve sıvı hal kaynak yöntemlerinde olduğu gibi ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) olarak adlandırılmaktadır (Kurt 2004).



Şekil 1.4. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan iç yapının şematik görünümü. A: Isının tesiri altındaki bölge (ITAB), B: Termodinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (TEB), C: Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB)

DKB (kaynak çekirdeği), sürtünme ısısı ve plastik deformasyonun bir sonucu olarak yeniden kristalleşmiş, ince taneli bir mikroyapıya sahiptir. Kaynak parametrelerine, takım geometrisine, iş parçasının sıcaklığına ve malzemenin ısı iletimine bağlı olarak çeşitli şekillerde kaynak çekirdekleri gözlenmiştir. Temel olarak iki şekilden söz edilebilir: üst yüzeye yakın bir yerde genişleyen kase şekli ve eliptik şekil. Örneğin 6063-T5 alaşımında kase şeklinde DKB görülürken, 7075-T651 alaşımında eliptik şekil görülür.

Tane boyutunu etkileyen faktörler ise kaynak parametreleri, iş parçasının bileşimi ve sıcaklığı, dikey basınç ve aktif soğumadır.

DKB'deki tane boyutu, bölgenin üst kısmına yakın, artmaya yüz tutar ve orta çizgisinden itibaren her iki yöne doğru azalır ve bu durum kaynak bölgesindeki sıcaklık değişimine aşağı yukarı uymaktadır. Bu durumun sebebi basitçe, göreceli düşük sıcaklıkların tane büyümesini geciktirmesi olarak açıklanabilir.

SKK esnasında, ana metal ve DKB arasında, bu yönteme özgün bir geçiş bölgesi oluşur (Mishra 2005). TEB hem plastik deformasyonun hem de termal etkinin sonucudur. Alüminyumda yüksek sıcaklıkta yeniden kristalleşme meydana gelmeden, önemli plastik deformasyon oluşumu mümkündür.

Araştırmacıların çoğu TEB'in bir bölümünde DKB'nin, kalan bölümünde ise plastik deformasyona uğramış fakat yeniden kristalleşmemiş kısmın olduğunu belirtmektedir. Sürtünme karıştırma kaynak tekniği ile kaynaklanmış diğer malzemelerde tipik olarak kaynak çekirdeği bulunmaz. TEB tamamen yeniden kristalleşmiş olarak görülür.

TEB'in yeniden kristalleşmeyen kısmı, DKB'deki tanelerden farklı olarak plastik deformasyona ve termal etkiye uğramış tanelerden oluşur. Taneler ana malzemeninkine benzer boyutlardadır (Doğan 2006) .

ITAB ise malzemenin hiçbir plastik deformasyona uğramadığı ancak kaynak ısısının etkisiyle bir dereceye kadar mikroyapısal değişimlerin görüldüğü bölgedir (Khaled 2005). Yaşlandırılabilir bir alüminyum alaşımında bu bölgedeki sıcaklık değişimi 250°C'nin üzerindedir. ITAB'ın tane yapısı ana metalinkiyle aynıdır, ancak ulaşılan sıcaklık çökeltilerin yapısında kayda değer bir etki yapar (Mishra 2005).

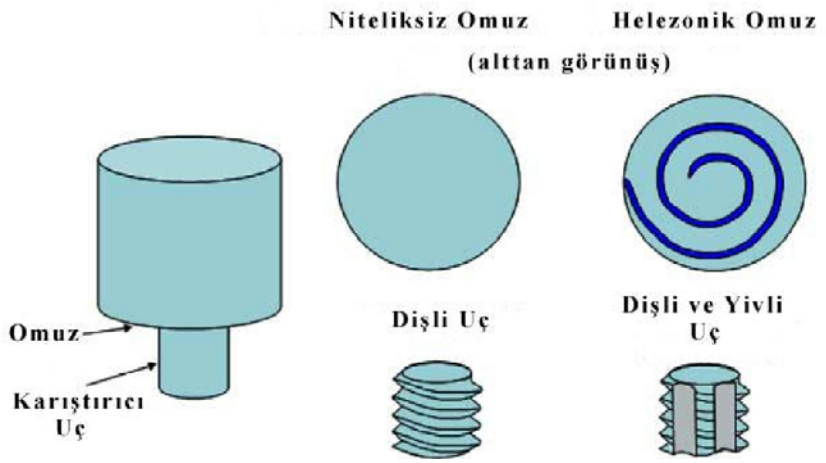
1.3 Kaynağa Etki Eden Faktörler

İlk bakışta SKK diğer yöntemlere göre daha az kompleks gibi görünse de, takımın devir sayısı ve ilerleme hızı, ucun batma derinliği, takım geometrisi ve malzemesi, iş parçasının cinsi ve kalınlığı gibi bir çok faktör, kaynak kalitesini, etkinliğini ve takımın performansını etkilediğinden kontrol altında tutulmalıdır. Bu etkilerin yankıları olarak da x, y ve z eksenlerindeki kuvvet, takımın ve kaynak bölgesinin sıcaklığı, ısı girdisi ve uygulanan tork söylenebilir.

Tüm bunlar kaynak bölgesinin mikroyapısal gelişimini ve dolayısıyla mekanik özelliklerini belirlemektedir (Hattingh 2006).

1.4.1 Takım Geometrisi ve Malzemesi

Takım geometrisi, prosesin gelişimi üzerindeki en önemli etkendir. Plastik şekil değiştiren malzemenin akışı üzerinde kritik bir rol oynar ve kaynak dikişinin profilini, mikroyapısını ve özelliklerini etkiler (Colligan 2001). Bir SKK takımı, Şekil 1.5'te gösterildiği gibi omuz diye tarif edilen sürtünme aparatı ve karıştırıcı uçtan meydana gelmektedir.



Şekil 1.5. SKK takımının şematik gösterimi

SKK'nın ilk günlerinde tek parçalı çelik takımlar kullanılıyordu ve karıştırıcı uç yalnızca basit bir silindirdi. Karıştırıcı ucun bu şekli kısıtlı bir malzeme akışı ve karışımı sağlayabiliyordu ve sonuç olarak kaynak hızları düşük olmak zorundaydı. Karıştırıcı uç dizaynı zamanla TWI tarafından geliştirilmiştir (Colligan 2001). İlk aşamada, plastik şekil değiştiren malzemenin, uç etrafında ve kaynak dikişinin üst kısımlarından alt kısımlarına tam olarak karışımını sağlamaya yardımcı olmak için dişli uçlar üretilmiştir.Son yıllarda ise akıcı kıvama gelen malzemenin kaynak bölgesinde kalmasını geliştirmek için çok değişik takım dizaynları geliştirilmiştir .

Kaynağı zor veya daha kalın malzemelerde, plastik şekil değiştiren kısmın, karıştırıcı uç kısım etrafındaki akışı daha önemli hale gelir. Eğer, oldukça geniş çapta karıştırıcı uç kısımlar gerekli ise çok geniş hacimli malzeme hareketi olacaktır.

Takımlar, plastik şekil değiştirebilen malzemenin, karıştırıcı uç kısım etrafındaki akışını arttıracak şekilde olmalıdır (Doğan 2006,Mert 2003).

Mikser tipi içi boş karıştırıcı uç kısma sahip takım, plastik şekil değiştiren malzemenin, karıştırıcı uç kısmın içinden geçmesine olanak sağlar. Benzer çaptaki dolu takımlar ile karşılaştırıldığında, daha az miktarda malzeme yer değiştirir. Bu sayede, sürtünme etkisinde kalan bölge, yer değiştiren hacimden daha büyüktür.

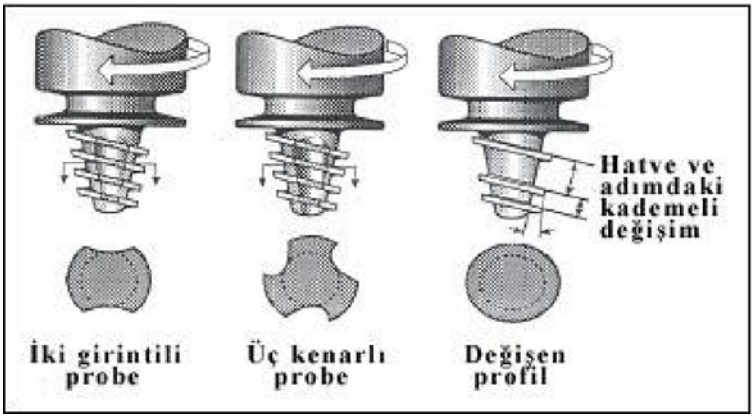
Özellikle kalın levhaların birleştirme işlemlerinde kaynak bölgesinde boşluk oluşumunu gidermede veya azaltmada ve işlem verimliliğini yükseltmede önemli bir faktör dinamik süpürme hacminin (karıştırıcı ucun dönmesi sırasındaki hacminin) statik hacme oranıdır. Bu oran batıcı uç yüzeyine değişik profiller işlenerek arttırılabilir, dolayısıyla batıcı uç etrafında ve altında malzeme akış yolları genişletilerek malzemenin kaynak dikişi içerisinde kalması desteklenir. Bu amaçla, kalın levhaların kaynağında, ince levhalar için geliştirilmiş olan geleneksel silindirik karıştırıcı ucun yerine hacminin yaklaşık %60-70'i boşaltılmış olan konik uç kullanılmaktadır (Mert 2003).

TWI tarafından geliştirilen Whorl^{TM}, Triflute^{TM} takımları ile, 25-40 mm kalınlığındaki AA6082-T6 levhaların tek taraflı, 40-75 mm kalınlığındaki levhaların da çift taraflı kaynağının yapılması amaçlanmıştır. Şekil 1.6'te görülen takım konfigürasyonlarıyla denemeler yapılmıştır.

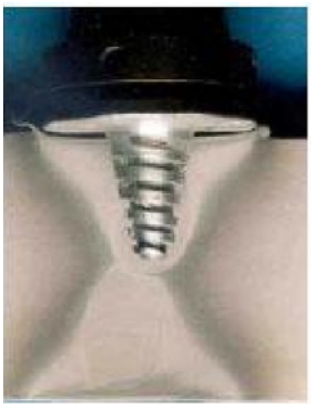
Kesik koni şeklindeki takım uçları, plastik akışa uğrayan metali aşağıya doğru yönlendirmek için helisel sırtlı profiller içermektedir. Kesik koni şeklindeki bazı uçlar, kaynak metalinin akış yolunu geliştirmek için kenarlı veya girintili yapıya sahiptir. Whorl^{TM} takımları, dairesel olmayan karıştırıcı uç kesiti ihtiyacını karşılar. Bu şekilde, malzemenin daha kolay akmasına imkan vermek için ucun yer değiştirmemiktarı, dönme miktarından daha az olmaktadır. Şekil 1.6'da 75 mm kalınlığındaki AA6082-T6 alaşımının içine geçmiş Whorl^{TM} serisi takım görülmektedir. TEB ile takım profilinin ilişkisi apaçık ortadadır. Gösterilen takım kullanılarak kabul edilebilir mekanik ve metalurjik özellikler elde edilmiştir.

Takım etrafındaki malzemenin daha etkili akışı, her bir helisel sırt arasındaki uzaklığın sırt kalınlığından daha büyük hale getirilmesiyle sağlanmıştır. Uç çekirdeğinin helisel sırtla paralel olması ve sırtın üniform hatvelere sahip olması gerekli değildir.

Nitekim, helisel sırtın yüzey alanı, farklı malzemelere uygunluk için değiştirilebilir (Nicholas 2001).



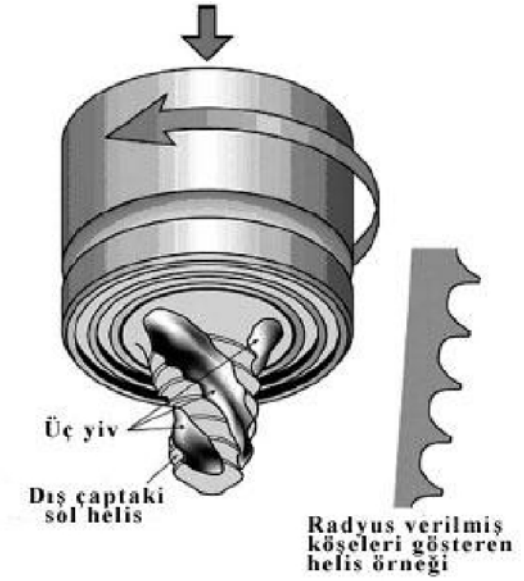
Şekil 1.6. Whorl^{TM} tipi SKK takımlarının malzeme kalınlığına göre değişik biçimleri (Mishra 2005)



Şekil 1.6. WhorlTM tipi takımının prototipi ve 75 mm kalınlığındaki AA6082 levhanın kaynağından bir kesit (Nicholas 2000)

Multi-Helix takımların (MX Triflute^{TM}) yivlerinin çevresinde helisel sırtların bulunması takımın hacmini düşürmekle beraber malzeme akışına yardım eder ve yüzeydeki oksitleri dağıtır (Şekil 1.7).

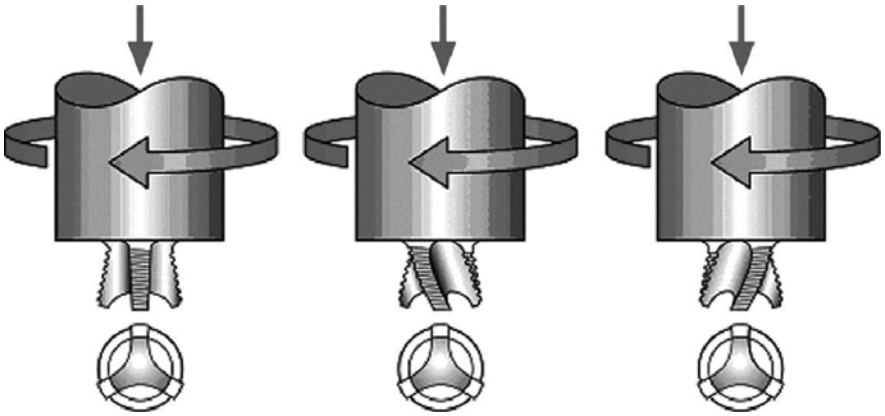
Alın kaynağında kullanılan Whorl^{TM} ve Triflute^{TM} takımları kesik piramit şeklindedir ve yüzeylerinde aşağıya doğru delme etkisini kolaylaştırmak amacıyla kaba işlenmiş helisel oluklar bulunmaktadır. Bu girintili köşe şekilleri, ucun hacmini azaltır ve statik hacim oranı için uygun olan karıştırma hacmini sağlar. Daha iyi bir hacim oranı ile malzemenin akış yolu daha iyi olur ve böylece takım daha etkili çalışır. Ayrıca özellikle ucun etrafındaki kaba işlenmiş helisel sırtlarda bulunan girintili köşe, kaynak bölgesinde kalmasına ve dağıtılmasına yardımcı olur (Serindağ 2006).



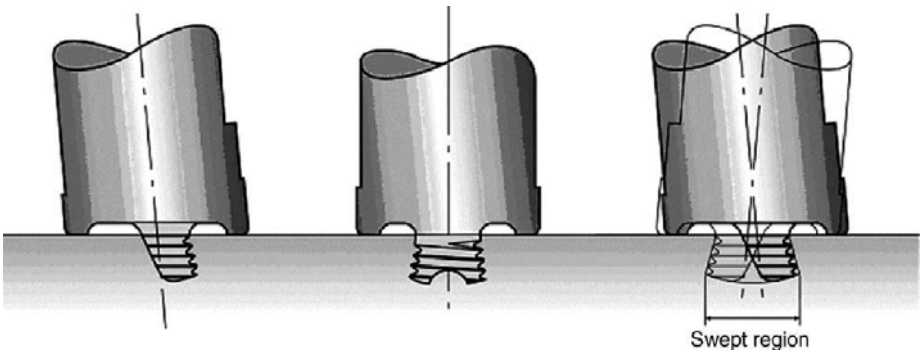
Şekil 1.7. MX TrifluteTM takımının şematik gösterimi (Mishra 2005)

Bindirme kaynağında, standart dişli silindirik uçlar, üstteki levhanın aşırı incelmesine sebep olurlar ve dirsek özelliklerinde belirgin bir düşme meydana gelir. Ayrıca, yorulmanın önemli olduğu uygulamalarda, kaynak arayüzünün genişliği ve dişin kaynağın köşesine değdiği açı da önemlidir. Son zamanlarda bindirme kaynağı için daha iyi kalite sağlayan, yivlerin dışa doğru genişlediği Flared-Triflute^{TM} (Şekil 1.8) ve uç eksenine, makine miline doğru hafifçe eğim verilmiş A-skew^{TM} (Şekil 1.9) uçlar geliştirilmiştir.

Bu uçlar; dinamik süpürme hacmi ile statik hacim arasındaki oranı arttırabilmekte, dolayısıyla ucun etrafındaki ve altındaki akış yolunu geliştirmekte, kaynak bölgesini genişletmekte, daha gelişmiş oksit parçalanması ve kaynak ara yüzeyinde dağıtımını sağlamakta, eğriltme hareketiyle kaynağın kökünde orbital bir kuvvet sağlayarak bu bölgedeki kaynak kalitesini arttırmaktadır.Standart dişli uçlarla karşılaştırıldığında, Flared-Triflute^{TM} ve A-skew^{TM} takımlarının; kaynak hızında %100 artış, eksenel kuvvette %20 azalma, daha geniş kaynak bölgesi (standart uçlarda levha kalınlığının %110'u, bu uçlarda ise %190-195'idir) ve üst levhanın incelmesinde 4 kattan daha fazla azalma sağlar (Mishra 2005).



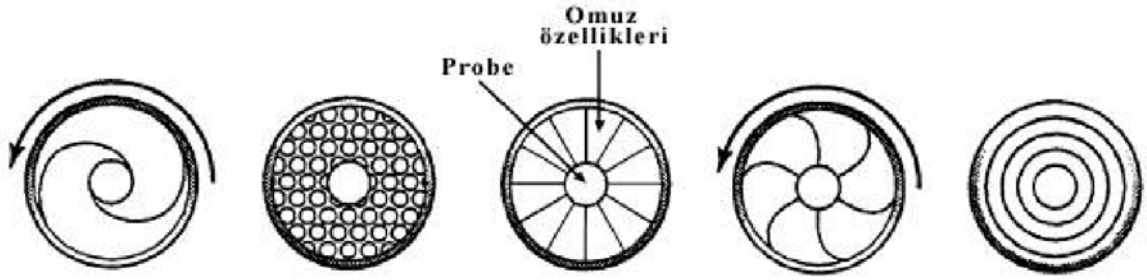
Şekil 1.8. TWI tarafından geliştirilen Flared-TrifluteTM takımları: (a) yansız yivler, (b) sol yivler, (c) sağ yivler (Mishra 2005)



Şekil 1.9. TWI tarafından geliştirilen A-skewTM takımları: (a) yan görünüş, (b) ön görünüş, (c) eğriltme hareketinin neden olduğu süpürülmüş bölge (Doğan 2006)

Yeni jenerasyon helezonik ve üç yivli takımların omuzları da özel profillere sahiptir (Şekil 1.10). Farklı omuz profilleri, farklı malzeme ve koşullara uyum sağlayarak, omuz ile iş parçası arasında daha iyi bir temas yüzeyi sağlamak maksadıyla kullanılır.

Sürtünme teması ile akan malzemenin kaynak bölgesinden ayrılması önlenmektedir (Doğan 2006).



Şekil 1.10. Takım omzu geometrileri, alttan görünüş (Mishra 2005)

SKK'da, takım malzemesi, takım aşınmasının yanı sıra, sürtünme katsayılarını ve ısı üretimini etkiler. TWI tarafından geliştirilen iki parçalı takımlar spesifik koşullar için özel uç malzemesi kullanmayı mümkün kılar. Örneğin, kalın levhaların veya ergime noktası yüksek malzemelerin kaynağı için yüksek sıcaklık malzemesi, 7xxx serisi alaşımların kaynağında Zn'nin sebep olduğu gevremeye karşı dirençli malzeme vb. Yüksek ergime noktasına sahip malzemelerin kaynağında kullanılan takımlar, fiziksel ve kimyasal aşınmaya dirençli, yüksek sıcaklıklarda yeterli dayanıma sahip, takım üzerinde biriken ısıyı etkin biçimde dağıtabilecek şekilde olmalıdır (Khaled 2005).

1.4.2 Kaynak Parametreleri

SKK'da iki kaynak parametresi çok önemlidir: saat yönü veya tersi yönde takımın devir sayısı (n, dev/dk) ve kaynak dikişi boyunca takımın ilerleme hızı (V, mm/dk). Takımın dönmesi, dönen uç etrafındaki malzemenin karışmasına sebep olur, karışan malzemeyi ucun önünden arkasına taşır ve kaynak prosesi sonlanır.

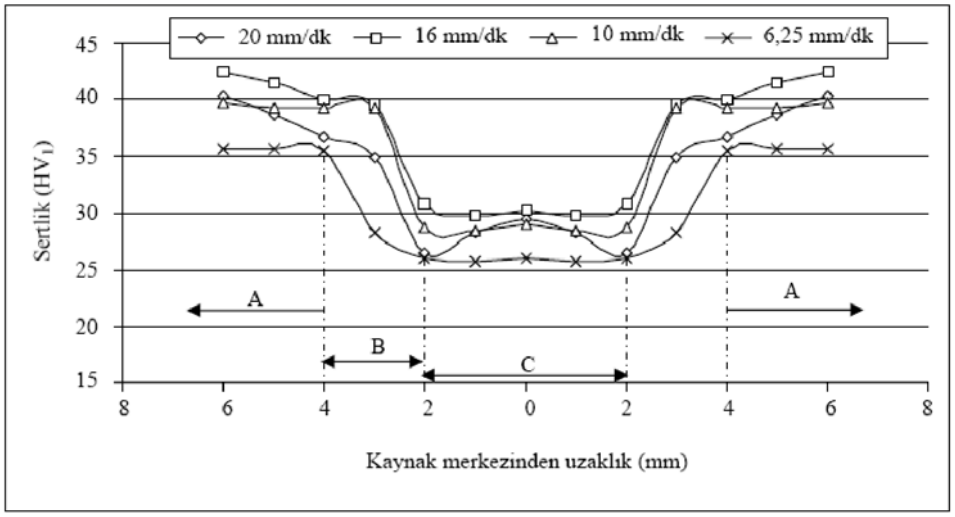
Takımın yüksek devir sayılarında, sürtünmenin fazla olması sebebiyle yüksek ısılar üretilir ve malzemenin daha kuvvetli karışmasına sebep olur (Mishra 2005,Doğan 2006).

Ancak bu noktada dikkat edilmesi gereken husus, takım yüzeyi ve iş parçası arasındaki sürtünmenin, ısıyı asıl kontrol eden etken olduğudur. Yani, artan devir sayısıyla birlikte yüzeyler arası sürtünme katsayısı değişeceğinden, ısının tekdüze bir artış göstermesi beklenmemelidir (Mishra 2005).

Kaynak ilerleme hızı ise birim alana düşen ısı miktarını etkilemektedir. İlerleme hızı arttıkça birim alana düşen ısı miktarı da azalmaktadır. Dolayısıyla hem mikroyapı hem de sertlik ve çekme gibi mekanik özellikler değişmektedir. Düşük kaynak ilerleme hızlarında kaynak metali yönlenmesi fazla belirgin görülmemekte ve artan hızlarla birlikte artmaktadır. Kaynağı etkileyen diğer faktörlere göre uygun bir kaynak ilerleme hızı seçildiğinde yönlenme daha homojen bir dağılım göstermektedir.

Isı girdisi azaldıkça, kaynak metalinin sertliği, düşük hızlara göre artmaktadır. Sertlik miktarındaki değişim kaynak bölgesinde fazladır ve bu merkezden esas metal tarafına doğru ilerledikçe belirgin bir şekilde azalmaktadır. Yapılan deneylerde, takımın omuz kısmından sonra esas metal sertliği elde edilmiştir. Şekil1.11'de kaynak ilerleme hızı ile değişen, 1xxx serisinden bir alüminyum alaşımının kaynak metali sertlik değerleri görülmektedir. Ancak burada sertlik, takımın omuz kısmının altına karşılık gelen bölgeden alınmıştır.

Sürtünme karıştırma kaynaklı numuneler çekme testlerine tabi tutulmuşlar ve bütün numuneler kaynak dikişinin dışından uzama göstererek kopmuşlardır (Kurt 2004).



Şekil 1.11. Kaynak merkezinden uzaklaştıkça kaynak ilerleme hızı ve sertlik değeri arasındaki ilişki. (C) DKB, (B) TEB, (A) ITAB (800 dev/dk devir sayısı, AISI1050 helisel uç) (Kurt 2004)

SKK'yı etkileyen bir diğer parametre ucun batma derinliğidir. Yukarıda belirtilen parametreler kontrol edilebilir ve sabit takım geometrisi ile yapılan kaynaklarda kaynak sırasında önemli oranda değişmezler. Fakat, ucun batma derinliği kritik ve kontrol edilmesi güç bir parametredir. Batma derinliğinin kaynak işlemi süresince sabit kalması gerekmektedir. Fakat özellikle uzun levhaların birleştirme işlemlerinde yüzeylerin çok düzgün olmaması durumunda bunu sağlamak mümkün olmayabilir. Bu yüzden kaynak öncesi yüzey hazırlama oldukça kritik olup, bu hususta özen gösterilmesi gerekmektedir. Kaynak işleminde iyi bir nüfuziyet elde etmek için, takım ucunun arka yüzeye yaklaşık olarak 0,508 mm mesafede sabit tutulması gerektiği deneysel olarak gösterilmiştir. Takımın ucu ile iş parçasının arka yüzeyi arasındaki mesafe "nüfuz etme mesafesi" olarak bilinmektedir. Bundan dolayı, SKK'da yüzey hazırlama klasik ve lineer sürtünme kaynaklarında olduğundan daha kritiktir. Kaynak işlemi süresince nüfuz etme mesafesini sabit tutmak için malzeme kalınlığındaki değişimler minimum düzeyde olmalıdır. Takım ölçüsü, düşük ısı girdisi ve küçük kaynak dikişi sağladığı ve dolayısıyla büzülmeyi azalttığı için mümkün olduğunca küçük tutulmalıdır (Serindağ 2006).

1.4.3 Malzeme Cinsi ve Kalınlığının Etkileri

Sürtünme karıştırma kaynağı tüm alüminyum alaşımlarına başarıyla uygulanabilmektedir. Bunun yanı sıra Cu ve alaşımları, Ti ve alaşımları, Mg ve alaşımları, metal matrisli alüminyum kompozitler ve bazı tür çeliklerde de (düşük karbonlu çelikler, düşük Cr ve C içeren çelikler, 304L ve 316L türü paslanmaz çeliklerin 6 mm'ye varan kalınlıklardaki parçaları vb.) uygulanabilir duruma gelmiştir (Mert 2003).

50 mm kalınlığa kadar saf bakırın, bu amaç için özel olarak üretilmiş SKK makinesiyle kaynağı TWI tarafından başarıyla gerçekleştirilmiştir. 100 mm/dk'ya ulaşan kaynak hızlarında, tüm beklentileri aşan kusursuz kaynak kalitesi elde edilmiştir (Nicholas 2000).

SKK, en az çinko ve kurşun levhalarda olduğu kadar magnezyum alaşımlarında da başarı ile uygulanabilmektedir. TWI tarafından 9.5 mm kalınlığındaki AZ61A alaşımı üzerinde yapılan deneyler başarı ile sonuçlanmıştır. Japonya'da yapılan bir çalışmada da, 6 mm kalınlığındaki AZ31 magnezyum alaşımı üzerinde yapılan ileri laboratuar deneylerinde, kaynak esnasında ince yeniden kristalleşmiş tane yapısının oluşmasından dolayı, numunelerin mukavemeti ile ana metalin mukavemet değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu tespit edilmiştir.

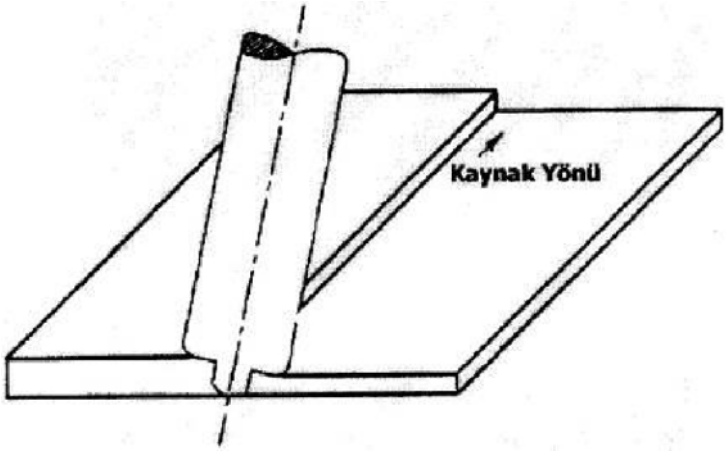
Uzay ve havacılık endüstrisinde kullanılan titanyum alaşımlarında ise, SKK denemeleri ilk olarak Ti-6Al-4V alaşımında başarı ile gerçekleştirilmiş ve diğer alaşımlar üzerinde çalışmalar başlatılmıştır. Yüksek korozyon dayanımından dolayı petrol boru hattı şebekeleri ve su üstü platformlarında rakipsiz olan bu alaşıma, bu uygulamalarda da sürtünme karıştırma kaynağının uygulanmasına çalışılmaktadır

Bir malzemeye üretim amaçlı sürtünme karıştırma kaynağı uygulamadan önce, en uygun takım malzemesini saptamak için birçok deney yapılması gerekmektedir. Uygun malzeme bulunduğunda, takım dizaynının geliştirilmesi ve en uygun prosedürlerin saptanması için çalışmalar yapılabilir.

Ayrıca kaynak bölgesinin mekanik ve metalurjik özellikleri de incelenmelidir (Nicholas 200). Malzemenin cinsi büyük oranda kaynak bölgesinin mikro yapısını etkilemektedir.

Kaynak çekirdeğindeki yeniden kristalleşme mekanizması ve ulaşılan sıcaklık farklı olacağından, kaynak çekirdeğinin şekli, tane boyutu farklılıklar göstermektedir. Kaynak bölgesinde ulaşılan sıcaklık ayrıca diğer bölgelerin yapısını da etkilemektedir (Mishra 2005). Örneğin, daha önce de bahsedildiği gibi bazı malzemelerde kaynak çekirdeği görülmemektedir. TEB tamamen yeniden kristalleşmiş şekilde olabilmektedir. Bu etkiler sonucunda da mekanik ve metalürjik özellikler büyük ölçüde değişir (Doğan 2006).

Sürtünme karıştırma kaynağı ile Al-alaşımlarında tek pasoda 50 mm ve çift taraftan kaynak yapmak suretiyle 100 mm kalınlığa kadar levhaların alın kaynağı yapılabilmektedir. SKK, levhaların bindirme kaynağında da başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. Ayrıca, bu kaynak yöntemi ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirme işlemi Şekil 1.12'de görüldüğü gibi, pimin eğik konumda levhalara daldırılması ile yapılabilmektedir. Kaynak hızı kaynaklanacak levha kalınlığına bağlı olarak değişmektedir (Çam 2005) .



Şekil 1.12. SKK yöntemi ile, karıştırıcı ucun eğik konumda daldırılması ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesi (Özsoy 2002)

Kalınlık artışı kaynak nüfuziyetini de etkilemektedir. Yeterli hidrostatik basınç elde edilemez ise, kaynaklanan levhaların tabana yakın kısmında soğuk birleşme (yetersiz nüfuziyet) meydana gelir. Bu sorun, yukarı doğru hareket etme eğilimindeki çamur kıvamındaki malzemenin aşağıya doğru hareketini kolaylaştırıp, kaynak dikişinde kalmasını sağlayabilecek optimum batıcı uç ve omuz dizaynı yapılması, devir hızının arttırılması gibi önlemler ile ortadan kaldırılabilir (Seridağ 2006).

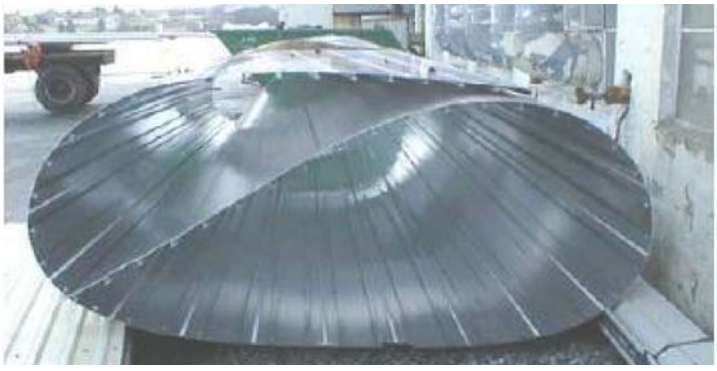
Bu bağlamda, karıştırıcı uç üzerinde açılan spiral dişler sayesinde aşağı doğru itme hareketi sağlanarak malzemenin yukarı doğru akması önlenir. Bu önlemler aynı zamanda kaynak bölgesindeki malzemenin omuz altından kaybı sonucu kaynak dikişi içerisinde oluşan tünel şeklinde porozite probleminin de giderilmesini sağlar. Kalınlık artışı aynı zamanda, kaynak bölgesinin alt kısmından üst kısmına doğru sıcaklık farkını arttıracağından, tane boyutu farklılığını da arttırmaktadır (Mishra 2005).

1.5. Yöntemin Uygulama Alanları

Sürtünme karıştırma kaynağının ilk ticari uygulaması balıkçı gemilerinde kullanılan oluklu alüminyum panellerinde yapılmıştır. Bu kaynak yöntemindeki minimum distorsiyon ve yüksek verimlilik, teknik ve ekonomik yönden sert panel üretiminde bu prosesi cazip kılmaktadır. Bu yöntem ile, Japonya'da alüminyum petek paneller ve deniz suyunun korozyon etkisine dayanıklı panellerin üretimleri yapılmaktadır.

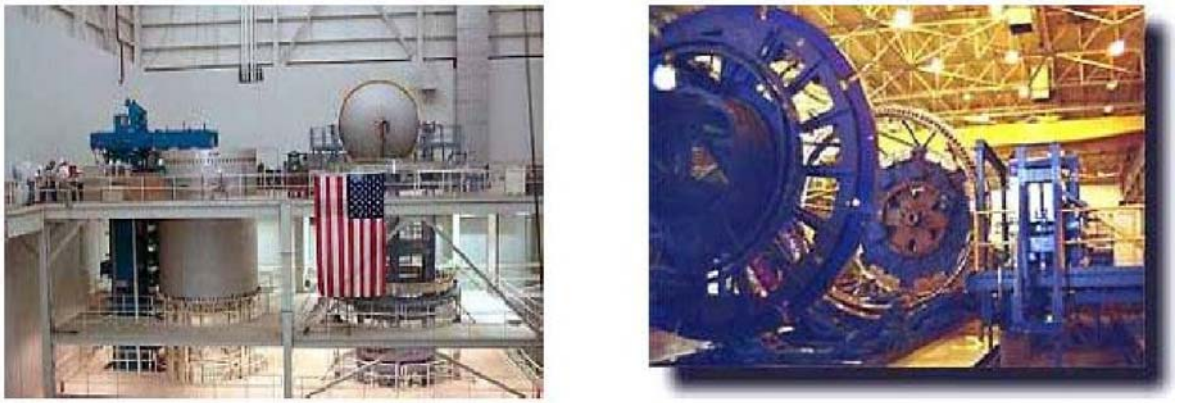
Yüksek hız feribotlarında kullanılan standart boydaki alüminyum ekstrüzyon panelleri sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmektedir.

Ergitme kaynaklarına kıyasla ısı girdisinin düşük olması, panellerdeki distorsiyon ve kalıntı gerilmelerinin minimum düzeyde olmasını sağlamaktadır (Şekil 1.13) (Çam 2003).



Şekil 1.13. SKK ile birleştirilmiş alüminyum ekstrüzyon panelleri (Nicholas 2000)

SKK, yolcu uçakları gibi hafif alüminyum iskeletli yapılarda büyük potansiyel arz etmektedir ve bu konuda araştırmalar yoğun olarak sürdürülmektedir. Yöntem Al-Li 2195 alaşımından üretilen uzay mekiklerinin yakıt tanklarının son kubbe kısımlarının kaynağında başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (Şekil 1.14). Buna ilaveten, özellikle Japonya'da hızlı trenlerin vagonlarının üretiminde, alüminyum ekstrüzyonlardan kaynak konstrüksiyonla petek panellerin imalatında bu kaynak yöntemi uygulanmaktadır (Serindağ 2006).



Şekil 1.14. Space Shuttle External Tank projesi ve Marshall Space Flight Center laboratuarındaki SKK sistemlerinden görüntüler

Otomotiv sektöründe alüminyum kullanımının hızla artması yakıt ve ağırlık tasarrufunda daha etkili araçların üretilmesine yol açmıştır. Süspansiyon kollan gibi küçük çaptaki parçalar SKK yöntemi ile Japonya'da üretilmektedir. Bunun yanı sıra Norveç'te tekerlek jantlarının bu yöntem kullanılarak yapımı da gerçekleşmektedir (Şekil 1.15) (Külekçi 2003).



Şekil 1.15. SKK ile birleştirilen Al-alaşımı prototip otomobil jantı

SKK, gemi, uçak ve uzay aracı, tren ve kara taşıtlarının imalatı gibi çok geniş bir uygulama alanı yelpazesine sahiptir. Bu uygulamalarda, bu yeni kaynak teknolojisi, sınırlı da olsa ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. Robotik sürtünme karıştırma kaynağı ile Al ve Mg alaşımlarının kaynağında katedilecek aşamalar daha hafif taşımacılık sistemlerinin seri üretimini mümkün kılacak ve bu şekilde araçların yakıt tüketiminde de önemli tasarruflar sağlanacaktır. Bu yeni kaynak yönteminin özellikle gemi inşaatında, uçak ve uzay endüstrisinde, otomotiv sektöründe ve diğer imalat sektörlerinde kullanımının her geçen gün artması beklenmektedir (Serindağ 2006).

1.6. Yöntemin Avantaj ve Dezavantajları

1.6.1 Avantajları

SKK yöntemi enerji tasarrufu sağlayan basit bir işlemdir. Yüksek kaynak enerjisine sahiptir. Örneğin, 3 KW'lık toplam güçle 6xxx alaşımında 12,5 mm derinliğinde kaynak yapılabilir. Kaynak işlemi, dolgu telleri ve gazdan korunan kaynak banyosu gerektirmez. Kaynak, ark olmaksızın yapıldığı için manyetik üfleme yoktur. Verimi yüksektir. Çok az bakım ister. Kaynaktan hemen sonra oksit tabakasının kaldırılmasına gerek yoktur. Bu nedenlerle uygun maliyet sağlar. İdeal olarak teknik otomasyona uygundur. Bütün pozisyonlarda uygulanabilir. Katı-faz kaynağı oluşumu, alaşımın metalurjik özelliklerini saklamasına olanak tanır. Çatlamaya duyarlılıklarından dolayı ergitme kaynağı yapılamayan alaşımların kaynağı rahatlıkla yapılabilir ve gözenek oluşumu gözlenmez. Farklı yapıdaki malzemelerin kaynağını mümkün kılar. Normalde pratikte mümkün olmayan veya çıkarma veya dökümde maliyeti arttıran uzun, geniş, haç şeklinde, kutu şeklinde ve üretimden geldiği şekildeki gibi birçok bileşimin kaynağı mümkündür. Hassas kaynak ağzı hazırlığına gerek yoktur. Ağızlarda ergime oluşmaz, dolayısı ile ITAB hemen hemen yoktur. Sıçrama olmaksızın düz yüzey elde edilebilir (Özsoy 2002).

1.6.2. Dezavantajları

Kaynaklanacak parçaların çok sıkı bağlanmaları şarttır. Ayrıca, özellikle kalın levhaların kaynağı için gelişmiş tezgahlara ihtiyaç vardır. Tek parçalı karıştırıcı uç kullanıldığında kaynak sonunda delik kalır (Doğan 2006). Bu şekilde yapılan kaynaklarda ucun girdiği delik kapatılmalıdır. Bazı alaşımlı saclarda tek pasolu kaynak hızı, diğer mekanikleşmiş ark kaynağı tekniğinden daha yavaştır. %100 nüfuziyet isteniyorsa parçalar ters çevrilip arka tarafından da kaynak yapılmalıdır. Kaynak öncesi yüzey hazırlama kritik olup, bu hususta özen gösterilmesi gerekmektedir .

2.1. ALÜMİNYUM

Günümüzde çelikten sonra en çok tüketilen metalik malzeme alüminyum ve alaşımlarıdır. Alüminyum diğer metaller ile birleşmiş olarak yer kabuğunun % 8 'ini oluşturmaktadır. Hafif bir metal oluşuyla tanınır ve bu yüzden hafif metaller sınıfına dahil bir elementtir. Saf alüminyum gayet yumuşak ve demirden yaklaşık üç kat daha hafiftir. Diğer metallerin çok az katılmasıyla alaşımlandırıldığında , yoğunluğunun az artmasına karşılık , mekanik dayanımında önemli oranlarda artışlar meydana gelmektedir (Serfiçeli 2000,Değer 1995).

Alüminyumun çekici özelliklerinin başında; oksidasyonunun diğer metallere göre en kolay olmasına karşılık, pek çok ortamda kararlılığının bozulmadan kullanılması gelir. Kuru oksijenli ortamlarda alüminyum yüzeyinde, 2.5 ile 3 nanometre kalınlığında, sık ve koruyucu bir oksit tabakası meydana gelir. Ortamdaki nem oranı arttıkça bu tabakanın kalınlığı da artmakta ve neme doymuş ortamlarda iki katına kadar çıkabilmektedir. Saydam görünüşlü oksit tabakası sayesinde, alt kısımlarda kalan alüminyum özellikleri korunabilmektedir. Dolayısıyla da ana metal korozyon nedeniyle aşınmamaktadır. Tablo 3.1'de görüldüğü gibi 2.7 g/cm^3 olan yoğunluğu, hafif bir metal olmasını sağlamaktadır. Ergime sıcaklığının 660 C olması dökülerek işlenmesini kolaylaştırmanın yanında, yüksek sıcaklıklarda kullanılmasını engellemektedir. En önemli özelliklerinden biri olan elektrik iletkenliği, bakırın yaklaşık % 65 'i kadardır. Bu özelliklerinin yanı sıra dekoratiflik, soğuk ve sıcak işlenebilme gibi karakteristikleri ile her nevi döküm işlemine uygun olması ve kaynakla birleştirilebilme gibi özelliklere sahip bulunmaktadır (Serfiçeli 2000,Aytaç 2004).

Tablo 3.1 Alüminyum elementinin özellikleri (Nicholas 2000)

Kimyasal Simgesi	Al
Öz Kütlesi (Yoğunluğu)	2.7 g/cm^3
Atom Numarası	13
Atom Agırlığı	26.98 g/atom
Ergime Derecesi	660 C
Rengi	Parlak gümüşi

2.1.1 Alüminyum ve Bileşimleri

Kimya ve seramik alanında kullanılan birçok alüminyum bileşimi vardır. Bu bileşimlerden alümina, alüminyum metali üretiminde kullanılan basit bir oksittir. Alümina sentetik yollarla üretilen zımparalarda aşındırıcı olarak kullanılır. Ayrıca porselen, refraktör tuğla ve seramik yapımında kullanılan kil 'in temel bileşimini oluşturur (Serfiçeli 2000).

Hidrata alümina ($Al_2O_33H_2O$); katalizör olarak kullanılır. Cam ve emaye yapımında dayanım artırıcı olarak görev görür. Alüminyum hidroksit; suda çözünmeyen beyaz ince toz halindedir. Boya yapımında, tekstil ve kağıt kaplamada ıslanmayı önlemek için kullan ılır. Alüminyum sülfat, kağıt, deri ve tekstil endüstrisinde önemli malzemelerden biridir (Serfiçeli 2000).

2.1.2 Alüminyum ve Alaşımları

Alüminyum alaşımları; plastik şekil verme yöntemleriyle şekillendirilmiş dövme alüminyum alaşımları; ergitme ve katılaştırma işlemleri ile şekillendirilmiş döküm alüminyum alaşımları olmak üzere iki grupta sınıflandırılır (Smith 2001). ALCAO (Aluminum Company of America), içerdikleri alaşım elementlerine göre dövme alüminyum alaşımlarını Tablo 3.2'de belirtildiği gibi gruplandırmıştır.

Tablo 3.2 Dövülebilen alüminyum alaşım grupları (Kurt 2004, Khaled 2005)

Ana alaşım elementi	**Alaşım sayısı**
Minimum % 99 Al	1XXX
Bak ır	2XXX
Mangan	3XXX
Silisyum	4XXX
Magnezyum	5XXX
Magnezyum +Silisyum	6XXX
Çinko	7XXX
Diğer elementler(Lityum dahil)	8XXX
Kullanılmayan seri	9XXX

Tablo 3.2 'de gruplandırılmış dövülebilen alüminyum alaşımlarını tanımlamak için dört rakamlı bir işaret kullanılır. İlk rakam belirli alaşım elementlerini içeren alaşım grubunu belirtir. Son iki rakam alüminyum alaşımını tanımlar veya alüminyumun saflığını belirtir. İkinci rakam başlangıçtaki alaşım üzerinde yapılan değişiklikleri veya katışık sınırlarını belirtir (Smith 2001).

Dövülebilen alüminyum alaşımları için menevişleme işaretleri bir uzatma işareti ile ayrılmıştır. (örneğin, 1100-0) . Ana menevişleme işleminin alt grubu, harflerle belirtilen ana menevişlemeyi izleyen ek bir rakam daha alır. (örneğin, 1100-H14). Ana menevişleme işaretleri Tablo 3.3 'te belirtilmiştir (www.makinamuhendisi.com 2004).

Tablo 3.3 Ana menevisleme isaretleri

F	Üretildiği gibi.Deformasyon sertleşmesinin miktarı üzerinde bir denetim yok , mekanik özellikler sınırı yok
O	Tavlanmış ve yeniden kristallenmiş. En düşük dayanım ve en yüksek süneklilik için menevi şlenmiş.
H	Deformasyon sertleştirilmesi yapılmış.
T	F veya O ' dan başka kararlı menevişler için ısıl işlem görmü ş

Döküm alüminyum alaşımları ANSI'ye (American National Standards Institute) göre Tablo 3.4 'te belirtildiği gibi gruplandırılmıştır (Kurt 2004,Serfiçeli 2000) Alaşım elementlerine göre son iki rakamı arasına bir nokta konan dört rakamla tanımlanmaktadır.

Alüminyumun; silisyum ve magnezyum gibi elementler ile yaptığı alaşımlar, uygulamada en çok kullanılanlardır. Alüminyumun bu elementler ile yaptığı alaşımlar, memekanik özelliklerini iyileştirilmesi açısından önem taşır (Serfiçeli 2000,Smith 2001).

Alüminyum - bakır alaşımları ; duralüminyum olarak adlandırılan alaşımlar bu grup içerisinde değerlendirilir. % 2-6 oranında bakır içeren bu alaşım en yaygın kullanılan alüminyum alaşımıdır. Korozyona karşı direnci , diğer alaşım gruplarına göre düşüktür. Kaynak kabiliyeti ise sınırlıdır (örneğin, Al 2024 , Al 2025) (Serfiçeli 2000,Smith 2001).

Tablo 3.4 Döküm alüminyum alaşımları

Ana alaşım elementi	**Alaşım sayısı**
Minimum % 99 Al	1XX.0
Bak ır	2XX.0
Silisyum , bakır ve magnezyum	3XX.0
Silisyum	4XX.0
Magnezyum	5XX.0
Kullanılmayan seri	6XX.0
Çinko	7XX.0
Kalay	8XX.0
Diğer elementler	9XX.0

Alüminyum - silisyum - magnezyum alaşımları; iç yapısında % 1.3 'e kadar silisyum (Si) ve magnezyum (Mg) eşit olarak bulunur. Az miktarda bakır (Cu) , krom (Cr) ya da kurşun (Pb) yaşlandırma durumunda korozyon direncini ve dayanımını artırmak amacıyla ilave edilir. Vida, makine parçaları, mobilya ve köprü taşıma elemanları üretiminde kullanılır. (örneğin, Al 6061, Al 6063) (Serfiçeli 2000).

Alüminyum-magnezyum-çinko alaşımları ; iç yapılarında % 1-7.5 çinko ve 3.3 magnezyum vardır. Krom (Cr) ve bakır (Cu) dayanımını artırmak amacıyla alaşıma ilave edilir. Bu son eklemeler kaynak yeteneğini olumsuz yönde etkiler. En yüksek dayanımlı alüminyum alaşımları bu grup içerisinde ele alınırlar. Yapısal malzeme olarak uçak yapımında kullanılırlar. (örneğin, Al 7055, Al 7075) (Serfiçeli 2001, www.makinamuhendisi.com 2004).

Alüminyum - magnezyum alaşımları; döküm alaşımı olarak tanınırlar ve korozyon dirençlerinin yüksekliği otomotiv ve uçak üretiminde kullanılmalarına olanak sağlar. İçyapılarında % 10 ' a kadar magnezyum (Mg) vardır. (örneğin, Al 332.0 , Al 512.0) (Serfiçeli 2001, www.makinamuhendisi.com 2004).

Alüminyum - silisyum alaşımları; tuzlu ortamlarda oluşan korozyona karşı yüksek dayanımları nedeniyle deniz ulaşımında kullanılan taşıtların yapımında kullanılmalarına olanak sağlamıştır. Bilinen en yaygın kullanılan döküm alaşımlarıdır. (örneğin, Al 413.0, Al 443.0) (Serfiçeli 2001, www.makinamuhendisi.com 2004).

Alüminyum - kalay alaşımları; alaşımın oluşumunda kullanılan kalay (Sn) miktarı %20 - 30 'dur. Yüksek yük taşıma yetenekleri, yorulma dirençlerinin fazlalığından kaynaklanır. Otomotiv sektöründe bağlama elemanı ve ambalaj sektöründe konserve kutusu olarak kullanılır. (örneğin, Al 821.0 , Al 832.0) (Serfiçeli 2001, www.makinamuhendisi.com 2004).

2.1.3. **Alüminyum Üretimi**

Alüminyum üretiminin ana ham maddesi alüminadır. Alümina üretimi için gerekli olan ham madde ise boksittir. Alüminyumun ticari evsaftaki bir filizi olan boksit bir mineral cinsi olmayıp, içerisinde alüminyum hidroksitleri bileşen olarak bulunduran bir kayaçtır. Boksit, kimyasal karışım ve fiziksel görünüm bakımından en çok değişkenlik gösteren ham maddedir. Boksit maden yataklarında değişik renklerde görülebilir. Bunlar; beyaz, gri, pembe, kahverengi, sarı, ten rengi, yeşil ve siyaha yakın renklerdir. Öz kütlesi 1.3 ile 1.9 arasında değişmekte ve bazen 3.7 kadar yoğun olabilmektedir. Bu değişiklikler, boksitin gözeneklerinin çokluğu ya da azlığı ile içinde bulunan demirli minerallerin miktarından ileri gelmektedir. Boksitin kimyasal özellikleri ve karışımı, üretilmesi açısından karar verici esas faktör olmaktadır. En önemli bileşenleri alüminyum oksit ve silikadır (Serfiçeli 2001,Smith 2001, www.makinamuhendisi.com 2004).

Boksitten alümina üretimi için, öncelikle öğütülmesi, ardından kimyasal reaksiyona sokulması gerekir. Kimyasal reaksiyon sonucunda, sodyum alümina boksitten ayrılmış ve bir çözelti haline gelmiş olur. Bu çözelti hidroliz edilerek hidrat elde edilir. Daha sonra da yıkanmış hidrat döner fırınlarda ısıtılmak suretiyle fiziksel ve kimyasal suyu uçurulur ve alümina üretilmiş olur. Boksitten elde edilen alüminanın (AhO3) % 90 'dan fazlası alüminyum metali üretiminde , geri kalan kısmı da aşındırıcı , refraktör ve kimyasal maddeler yapımında kullanılmaktadır (Serfiçeli 2001,Smith 2001, www.makinamuhendisi.com 2004).

2.1.4. Alüminyum Birincil Ürünleri

Alüminyum üretim fabrikalarında üretilen sıvı alüminyum , birçok işleme tabi tutularak alüminyum birincil ürünleri yada nihai olarak kullanılmaya hazır bir ürün haline getirilir (Smith 2001).

Alüminyum birincil ürünleri üretim kademelerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

a) Döküm ingotu: Ticari arı, EC Grade ya da alaşımlı külçe ve T ingotlarıdır. Ağrlıkları 2 kg ile 1000 kg arasında değişir.
b) İşleme ingotu: Genel olarak yuvarlak ve yassı ingot olarak iki ana gruba ayrılır. Yuvarlak ingot, çekme ürünleri üretiminde kullanılır. Bu ingotlar 80 - 240 mm çaplarında ve çeşitli boylarda üretilmektedir. Ağırlıkları 300 kg kadar olabilmektedir. Yassı ingotlar ise hadde ürünleri üretiminde kullanılır. Dikdörtgen prizmalar biçiminde ve ağırlıkları 2500 kg ile 10000 kg arasında değişmektedir.
c) Sürekli döküm çubuk: Filmaşin
d) Sürekli döküm levha
e) Platina : En fazla 400 mm kalınlığa kadar olan plakalardır.
f) Granüle alüminyum: 3-20 mm çapındaki taneciklerdir. Çelik endüstrisinde deoksidant olarak kullanılmaktadır (Serfiçeli 2000, Smith 2001).
g) Toz alüminyum: Boya endüstrisinde kullanılmaktadır.

2.1.4.1. Alüminyum Haddeleme Ürünleri

Alüminyum hadde ürünleri iki grupta sınıflandırılır.

Levha: Sıcak haddelenmiş, kalınlıkları 6 mm ve daha üstü ölçülerde üretilir. Soğuk haddelenmiş olanları ise 0.2 mm ve daha üstü kalınlıklarda üretilir.

Folyo : Kalınl ığı 7 - 200 mikron arasındadır. Folyo ürünleri; kaplama, boyama gofraj oluklandırma, disk halinde kesme, laminasyon, aklama, boyama, baskı gibi işlemlere tabi tutulmaktadır (Smith 2001).

2.1.4.2 Alüminyum Ekstrüzyon Ürünleri

Alüminyumun, plastik şekil değiştirme özelliğinden yararlanılarak yarı mamüllerine yüksek basınç uygulanma suretiyle belirli bir açıklıktan geçirilmesi ile elde edilir. Örnek olarak; her kesitteki içi dolu profil, içi dolu çubuk filmaşin ve yine her kesitte, içi boş profiller ve borular gösterilebilir (Smith 2001).

2.1.4.3. Alüminyum İletken Teller

İletken, elektrik enerjisini iletmeye yarayan bir yada birden fazla telden meydana gelen ve yalıtılmamış olan tel yada tel demetidir. Yüksek elektrik iletkenliği, hafifliği, sınırsız ömrü, mekanik dayanımı ve ekonomikliği dolayısıyla çelik özlü ya da sade alüminyum iletkenler enerji iletimi ve dağıtımında vazgeçilmez bir malzemedir. İki tür alüminyum iletken bulunmaktadır. Çelik özlü alüminyum iletken; genellikle tel ya da örgülü çelik tel üzerine ve bunun ekseni etrafına helisel olarak bir yada bir çok tabaka halinde alüminyum tellerin sarılmasıyla elde edilen tel grubudur. Sade alüminyum iletken ise aynı anma çapındaki alüminyum tellerin bunlardan birisinin üzerine ve bunun ekseni etrafına helisel şekilde bir ya da birkaç tabaka halinde sarılmasıyla elde edilen tel grubudur (Smith 2001).

2.1.4.4. Alüminyum Parça Döküm Ürünleri

Alüminyum parça döküm ürünlerini üç grupta sınıflandırabiliriz.

a) Kum döküm ürünleri: Model kullanmak suretiyle yapılan maçalı yada maçasız kum kalıplama, gerekli şekillerdeki sıvı alüminyum dökülüp, soğutulmasıyla elde edilir. Temizlendikten sonra, gerektiğinde mekanik ve ısıl işleme tabi tutulur.

b) Kokil döküm ürünleri: Mekanik işlemler ile üretilmiş, pik yada çelik kalıplarda, kum yada çelik maçalar kullanılmak suretiyle, gerekli şekillerdeki sıvı alüminyumun dökülüp soğutulması ile elde edilir.

c) Basınçlı döküm: Sıcak iş takım çeliklerinden üretilen kalıplarda, ayrı malzemeden maça kullanılmak suretiyle, gerekli şekillerdeki sıvı alüminyumun yüksek basınç ve hızla kalıp boşluğunda dondurulması ile elde edilir. Parçalar temizlendikten sonra gerektiğinde ısıl ve mekanik işlem uygulanır (Serfiçeli 2000, Smith 2001).

d) Kokil döküm ürünleri: Mekanik işlemler ile üretilmiş, pik ya da çelik kalıplarda, kum yada çelik maçalar kullanılmak suretiyle, gerekli şekillerdeki sıvı alüminyumun dökülüp soğutulması ile elde edilir.

e) Basınçlı döküm: Sıcak iş takım çeliklerinden üretilen kalıplarda, ayrı malzemeden maça kullanılmak suretiyle, gerekli şekillerdeki sıvı alüminyumun yüksek basınç ve hızla kalıp boşluğunda dondurulması ile elde edilir. Parçalar temizlendikten sonra gerektiğinde ısıl ve mekanik işlem uygulanır (Serfiçeli 2000, Smith 2001).

2.1.4. Alüminyumun Kullanım Alanları

Özellikleri kısmında açıklandığı üzere, birçok üstünlüğe sahip olan alüminyum ve alaşımları, üretim sektörünün hemen hemen her dalında, kullanılmaktadır. Özellikle çelik ve bakır yerine alüminyum ve alaşımlarının kullanılmasıyla (makine üretim endüstrisinde, çeşitli konstrüksiyonlarda ve taşıt araçları üretiminde), ağırlıkların önemli ölçüde azaltılmasını sağlamıştır. Bu yüzden alüminyum ve alaşımları, otomotivden inşaat sektörüne kadar endüstrinin çeşitli dallarında uygulama alanı bulmuş ve bu endüstrilerin vazgeçilmez bir temel girdisi durumuna gelmiştir (Serfiçeli 2000, Smith 2001).

1991 Yılında Avrupa'da yapılan araştırmada, sektörel bazda alüminyumun kullanıldığı alanlar şu şekilde tespit edilmiştir:

. İnşaat %27	. Ulaşım %24
. Ambalaj %15	. Elektrik %10
. Genel mühendislik % 9	. Metalurji %3
. Kimya ,tarım ilaçları %1	. Mobilya ev eşyası %6

. Diğer sektörler % 7

Burada görüleceği üzere tüketim alanlarının başında ilk üç sırayı inşaat, ulaşım ve ambalaj sanayi almaktadır. Gerçekte de dünya alüminyum üretiminin büyük çoğunluğu bu sektörler tarafından kullanılmaktadır. Bunun nedenlerinin başında, alüminyumun uygulamada kullanılan metaller içinde en hafif ve en çok korozyona dayanan metal olması gelmektedir (Serfiçeli 2000, Smith 2001).

Eloksal kaplama olarak adlandırılan anodik oksidasyon ile çeşitli renklerde üretilebilen alüminyum, inşaat sektöründe değişik uygulama alanları bulunmaktadır. Pencere ve kapı yapımı ile dış cephe kaplamaları buna en güzel örnekleri oluşturur.

Günümüzde üretilen 1 ton alüminyumun, 250 kilogramı ulaşım sektöründe ya otomobil ya uçak ya da hızlı tren yapımında kullanılır. Alüminyumun sağladığı hafiflik, ulaşım sektörünün hızlı olması gereken taşıtlarına önemli bir kolaylık sağlar. Bir otomobilde ortalama olarak 80 kg oranında alüminyum kullanımı söz konusudur. Aynı işlevi görecek çelik ve alaşımlarından birinin yerine kullanılan bu miktardaki alüminyum, üretilen otomobilin toplam ağırlığından 160 kg tasarruf yapılmasına olanak tanır. Bu da otomobilin kullanım süresince 2400 litrelik yakıt tasarrufu oluşması demektir. Diğer bir ulaşım aracı olan uçak yapımında kullanılan alüminyum miktarı daha da yüksek oranlarda olmaktadır. Ortalama bir uçağın yapımında kullanılan metallerin %70'ini alüminyum ve alaşımları oluşturur. Yüksek oranda hız yeteneğine sahip günümüz trenleri de ana malzeme olarak alüminyum ve alaşımlarından yapılır (Serfiçeli 2000, Smith 2001).

Avrupa tüketiminde %15 ile üçüncü sırada saydığımız ambalaj sanayi, alüminyum ve alaşımlarının en çok kullanıldığı sektörlerden biridir. Alüminyumun özellikle ince folyo olarak üretilmesi ve folyonun hava ile teması önlemesi, ambalaj sanayinde kullanımını artırır. Bunun yanında, mor ötesi ışınların ulaşımını da engellemesi açısından, gıda maddelerinin uzun süreler bu tür ambalajlar içinde saklanmasına olanak tanımaktadır. Diğer yandan, ilaç kutuları, içecek kutuları, diş macunu kapları ilk başta sıralanabilecek örnekler içerisindedir (Serfiçeli 2000, Smith 2001).

2.2. YORULMA

Hareketli parçaların, içten ve dıştan yanmalı motorların gelişimi ile birlikte yaygın olarak kullanılması tekrarlı, sabit ve değişken yüklere maruz kalması sonucu kalıcı hasarlara uğradığı bir gerçektir. Malzemelerin yorulma kırılmasına uğrama limitini (yorulma dayanımını) artırmak için değişik deney ve çalışmalar yapılmaktadır. Yorulma hasarını veya yorulma ömrünü artırmak için uygulanmakta olan değişik yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerden bazıları malzemenin içyapısında değişiklik meydana getiren ısıl işlemlerden, normalizasyon, yüzey sertleştirme, komple sertleştirme ve ostemperleme gibi ısıl işlemlerdir. Diğer yöntemler ise malzeme yüzeyinde kalıcı (artık) gerilme oluşturan bilyeli dövme ve yüzey ezme (haddeleme) gibi plastik deformasyon işlemleridir (Değer 1995, Aytaç 2004).

Kırılmanın görüldüğü parçaların görevlerini belirli bir süre yerine getirdiği düşünülerek , tekrarlı olarak uygulanan yüklere karşı malzemenin dayanım gücünün azaldı ğ , ve bunun sonucu olarak da yorulduğu fikri ilk defa 1840 ve 1850 'li yıllarda ortaya atılmıştır. Yorulma ile ilgili ilk sistematik çalışmalar Almanya'da 1850-1860 yılları arasında "Agust Wöhler" tarafından yapılmıştır (Serindağ 2006, Marzoli 2006). Demiryolu vagonlarının aksları üzerinde yapılan bu sistematik çalışmalarda Wöhler, kendi geliştirdiği yorulma deneyi cihazını kullanmıştır. Metal malzemeler üzerinde yapılan deneylerde, uygulanan yüklerin büyüklüğü üzerinde durulmuştur. Deney sonuçlarından yararlanılarak yorulma olayında uygulanan maksimum gerilmeden ziyade gerilme aralığının (C_{max} ve a_{min} arasındaki fark) önemli olduğu sonucuna varılmıştır. İlk defa Wöhler tarafından gerilme - çevrim sayısı (S-N) diyagramları kullanılarak belirli bir gerilme değerinin altındaki değerlerde numunelerin kırılmadığı gösterilmiştir. 1850 ve 1865 yılları arasında "Hodgkinson ve Fairbairn" tarafından kiriş sistemleri üzerinde tekrarlı eğme deneyleri yapılmıştır. Statik yükleme durumunda 120 KN altında kırılma meydana gelirken, tekrarlı yükleme halinde 30 KN 'luk yük kırılmaya yeterli olmuştur. 1870 ve 1890 'lı yıllarda yapılan Wöhlerin klasik çalışmaları genişletilerek değişik araştırmacılar tarafından sürdürülmüştür.

1900 'lü yıllarda yorulma mekanizmasının anlaşılmasında optik mikroskop kullanılmıştır. Mikro çatlakların meydana gelmesinden lokalize kayma doğrultuları ve kayma bantlarının önemli olduğu gözlenmiştir (Aytaç 2004, Kayalı 1983).

2.2.1 Yorulma Analizi

Yorulma kelimesi genel olarak malzemelerin statik gerilme ve uzamalar altındaki davranışlarından farklı olarak, değişken gerilme veya uzamaların söz konusu olduğu durumlarda gösterdiği davranışlarını belirtmek üzere kullanılmaktadır. "Bazı nokta veya noktalardaki tekrarlı gerilme veya uzama şartlarına maruz malzemelerde görülen , yeterli bir tekrar sayısından sonra çatlakların büyümesine veya tamamen kırılmasına sebep olan lokalize sürekli gelişen kalıcı yapı değişikliği olayıdır." (Smith 2001). Tanımlamada üzerinde durulan dört faktör vardır.

- Süreklilik
- Lokalize olması
- Çatlakların büyümesi
- Kırılma

Tekrarlanan gerilmeler altında çalışan metalik parçalarda, gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmalarına rağmen, belirli bir tekrarlanma sayısı sonunda genellikle yüzeyde bir çatlama ve bunu takip eden kopma olayına neden olurlar (Kayalı 1983).

Yorulma kırılması gevrek türde olduğundan nerede ve ne zaman olacağını önceden kestirmek zordur. Yorulma kopmaları, yapı parçası içersindeki hesaplanan gerilmeler elastik bölgede (Hooke Eğrisi) bulunmasına rağmen, meydana gelir. Ancak bu olay genellikle düzensiz bir gerilme dağılımı söz konusu olduğu durumlarda ortaya çıkar. Yorulma kopmasına uğrayan parçalara örnek olarak miller, bağlantı çubukları ve dişliler gibi hareketli parçaları gösterebiliriz. Makinelerdeki hasarların yaklaşık yüzde sekseninin yorulma kopmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir (Değer 1995, Kayalı 1983).

2.2.2. Yorulma Kırılmasını Etkileyen Faktörler

Yapısal parçaların yorulma performansını pek çok parametre etkiler. Bunlar, gerilme (yük), parçanın geometrisi ve özellikleri ve dış çevreyle ilgili parametrelerdir. Gerilme parametreleri; gerilmenin durumu, gerilme genliği, gerilme oranı, sabit veya değşken yükleme frekansı ve maksimum gerilmeyi içerir. Parçanın geometrisi ve özellikleri; gerilim arttırıcılar, boyut, gerilim eğimi, esas metal, kaynakların metalürjik ve mekanik özelliklerini kapsar. Dış çevre parametreleri ise sıcaklık ve saldırgan çevreyi içerir (Değer 1995).

2.2.2.1. Yüzey Koşulları

Yorulma kopmalarının çoğu metal yüzeyinde başladığından, yüzey durumundaki her değişiklik metalin yorulma ömrünü de etkileyecektir (Marzoli 2006). Yüzeydeki pürüzler çentik etkisi yaparak çatlak oluşumunu kolaylaştırır. Yüzey işleme kalitesi azaldıkça yorulma mukavemeti de azalır. Bunlar, parlatılmış, taşlanmış, talaş kaldırılmış, sıcak haddelenmiş ve dövme yüzeylerdir (Anık 1993). Parçanın kendinde olan basınçlı iç gerilmeler, örneğin haddeleme sırasında soğuk şekil vermede, çekmede veya kum püskürtme ile oluşan iç gerilmeler, yorulma mukavemetini ve aynı zamanda yüzey tabakasının sertliğini arttırırlar (Anık 1993). Örneğin, çeliklere uygulanan karbürleme veya nitrürleme gibi yüzey sertleştirme işlemleri yorulma ömrünü arttırmaktadır. Öte yandan, çelik yüzeyini yumuşatan karbon giderme ısıl işlemi yorulma ömrünü düşürmektedir. Metal yüzeyinde artık basma gerilmesi yaratan bir uygulama yorulma ömrünü artırmaktadır (Kayalı 1983).

2.2.2.2. Sıcaklık Değişimi

Sıcaklık genellikle mukavemetleri azaltıcı yönde etkilediğinden yorulma mukavemetinin de azalması doğaldır (Kayalı 1983). Yaklaşık 200°C'a kadar sıcaklığn bir etkisi yoktur; ancak daha yükselirse yorulma mukavemeti azalır. Cr Ni Mo-çelikleri 400°C'a kadar değişmezler.

Metastabıl içyapıya sahip alaşımlar yüksek sıcaklıkta ayrışma yolu ile iç yapı değişimine uğrarlar. Bu ayrışma olayı yorulma mukavemetine etki eder (Anık 1993).

2.2.2.3. Çevresel Etkiler

Değişken gerilme altında çevrenin kimyasal etkisi daha şiddetli olur, dolayısıyla yorulma ömrü kısalır (Aytaç 2004). Saldırgan ortamın yorulma ömrüne etkisi genellikle çok barizdir. Yorulma çatlakları, saldırgan olmayan bir ortamınkine göre daha az sayıda tekrar sonucu oluşur (Eryürek 1993).

Özellikle asma köprülerde çelik kablo ile bağlantı kelepçelerinin temas yüzeylerinde bu tür korozyon oluşur, bu da köprü ömrünü etkileyen en önemli olaydır (Aytaç 2004).

Vakumda yapılan deneylerde, numuneler normal yorulma deneyine göre daha fazla yük tekrarına dayanırlar. Korozyon etkisi yaratan gazların çok küçük miktarları bile sonucu kuvvetli bir şekilde etkiler.

Sulu çözeltilerde yapılan yorulma deneylerinde Wöhler eğrisinin daha aşağıda yer aldığı ve 10^9 yük tekrarından sonra bile düşmeye devem ettiği görülmüştür (Anuk 1993).

2.2.2.4. Frekans

Normal koşullarda frekansın yorulma mukavemetine etkisi önemsizdir. Hidrolik yorulma makineleri 50 Hz'i geçmediği halde elektromıknatıslarla kuvvet uygulayan makinelerde bu değer 400 Hz'e kadar çıkartılabilmiştir. Çok yüksek frekanslarda plastik şekil değiştirme için daha az zaman kaldığından genellikle yorulma mukavemeti yaklaşık %10 kadar artar (Kayalı 1983). Metallerde 10^4 yük tekrarı/dakika'ya kadar ısınma meydana gelmez; bu nedenle bu bölgede frekansın bir etkisi yoktur.

Plastik maddelerde 10 Hz civarında bile ısınma meydana gelir ve böylece yumuşar; yani mukavemet değerleri düşer (Anık 1993). Diğer taraftan saldırgan ortam içinde yorulma dayanımı frekansa kuvvetle bağlıdır. Korozyonlu yorulma dayanımı frekans azaldıkça azalır. Düşük frekanslarda ve özellikle düşük şekil değiştirme genliklerinde, malzemeyle çevresi arasındaki etkileşim için yeterli zaman mevcuttur.

Buna karşılık yüksek frekanslarda ve özellikle yüksek şekil değiştirme genliklerinde bu mümkün olmaz. Bu etki özellikle 10 Hz'ten küçük frekans değerlerinde çok barizdir (Eryürek 1993).

2.2.2.5. Gerilme Koşulları

Yapı elemanlarına kendi ağırlığından dolayı bir ön statik yük etkir ve elemanın taşıyacağı tekrarlı yük buna eklenir. Kendi ağırlığından doğan statik yükün oluşturduğu G_{or} ortalama gerilmesine ek olarak servis yükünden doğan bir G_a değişken gerilme genliği etkir (57). Toplam gerilme;

$$\sigma_m = \sigma_{or} + \sigma_a \text{ (3T)} \qquad (2.1)$$

σ_m : Toplam gerilme (MPa),

σ_{or}: Ortalama gerilme (MPa),

σ_a : Değişken gerilme genliği (MPa)

Bu tip yükleme genellikle sabit durumda dönme periyodu süresince şaftlar ve rodlar gibi makine parçalarında meydana gelir. Çoğu karmaşık değişken yük, çeşitli genlikte rasgele düzendedir. Bu tip yükleme gemiler, uçaklar, köprüler ve toprak işleri makinasını içeren çoğu yapılarda görülür (Değer 1995, Aytaç 2004).

Mühendislik elemanlarındaki *artık gerilmelerin* varlığı, yorulmalarına ve kırılma davranışlarına önemli şekilde etkide bulunabilir. Üretimden veya yüzey özelliklerinden ve ısıl işlemlerden meydana gelen *artık gerilmeler*, dışarıdan uygulanan gerilmelerin üzerine bindiğinde yorulma devri ve hasar görme süresinin seviyesi konusunda genellikle etkili olur. *Artık gerilmeler*, çekme gerilmesi varsa zararlı, basma gerilmesi varsa yararlı olarak bilinir (Sobczyk 2004).

2.2.3. Yorulma Çatlaklarının Özellikleri

Yorulma çatlakları genel olarak dört aşamada meydana gelir.

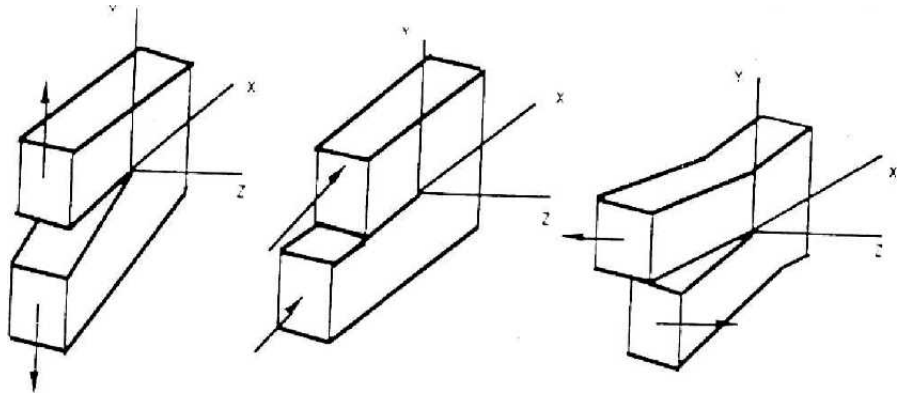
Çatlağın çekirdeklenmesi: Yorulma hasarı işlemi, çatlak başlangıçları için çekirdeklenme alanları gibi rol oynayan test malzemesi içinde en zayıf bağlantıları (süreksizlikleri) kullanır (Eryürek 1993).

Çatlağın yerel kayma bandında ilerlemesi: Çatlak, kayma gerilmelerinin yüksek olduğu ve çekme doğrultusuyla 45° lik açı doğrultusunda ilerlemesi.

a) Çatlağın $\sigma_{çmax}$'nin (maksimum çekme gerilmesi) etki ettiği düzlemde ilerlemesi.

b) Çatlak uzunluğunun kritik bir değere ulaşmasıyla kalan kesitin kırılması (Eryürek 1993).

Çatlak ilerlemesinde 3 temel mod mevcuttur; a) açılma modu, b)kenar kayma modu, c) kesme veya yırtma modu. (Şekil 2.1) (Ay 2002).



Şekil 2.1 a) açılma modu b) kenar kayma modu c) kesme yırtma

Gözlemler yorulma çatlağı ilerleme hızının çatlak derinliğinin karesi ile arttığını göstermektedir. Çatlak ilerleme hızlarının hesaplanabileceği çeşitli denklemler geliştirilmiştir. Bu denklemlerden birisi Paris-Erdoğan denklemidir (Ay 2002).

$$da/dN = C.(AK)^{m} \qquad (2.2)$$

da / dN: çatlak ilerleme hızı (m/saykıl),

K: gerilim şiddeti faktörü(MN /m $^{-3/2}$),

C ve m: deneysel sabitlerdir

da: çatlak boyu (m) ,

dN: belirli bir gerilim altında malzeme kırılıncaya kadar geçen süre içerisindeki tekrar sayısı (saykıl),

m: çelikler için 3, alüminyum alaşımlar için 3 veya 4 tür .

Bazı hallerde ise yorulma çatlakları kesitin tam olarak ayrılması ile sonuçlanmaz. Çatlak oluşması ile parça daha az zorlanır ve dolayısıyla gerilmenin üst sınırı malzemenin yorulma dayanımı değerinin altında kalırsa veya çatlağın çevresinde gerilme durumunun değişmesi ile yerel bir malzeme pekleşmesi oluşursa çatlak ilerlemesi durabilir (Değer 1995).

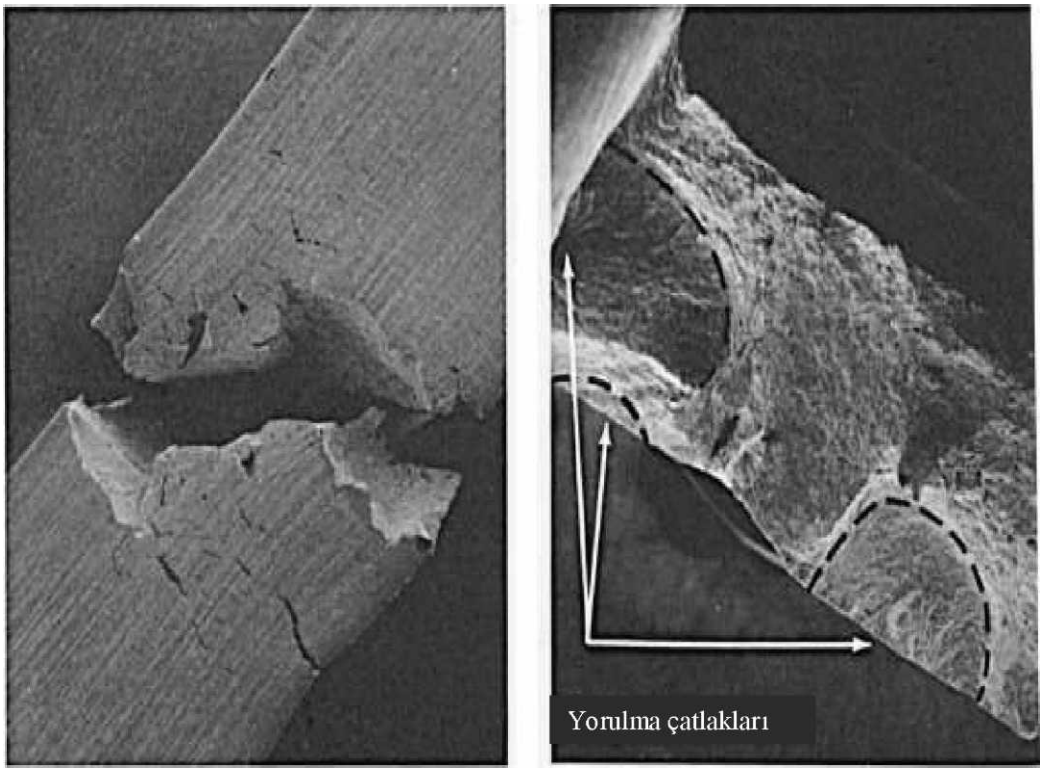
2.2.4. Yorulma Çatlaklarının Görünümü

Yorularak hasara uğramış elemanların kırılma yüzeyleri yorulmaya has üç ayrı bölgeye sahiptir.

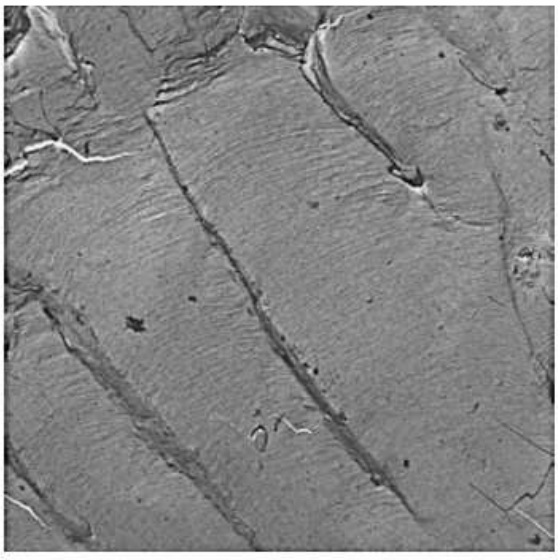
- Yorulma çatlağının çekirdeklendiği bölge.
- Yorulma çatlağının ilerlemesi sonucu oluşan bölge.
- Zoraki kırılma bölgesi (Eryürek 1993).

Çoğu yapısal parçalarda yorulma çatlakları, gerilim arttırıcılardan başlar ve yayılırlar. Kaynaklanmamış parçalardaki gerilim arttırıcılar, ya yüzey kusurları ya da geometrik değişikliklerdir(Şekil 2.2). Kaynaklı parçalardaki gerilim arttırıcılar, gaz boşlukları gibi gömülmüş kusurlar, hapsolmuş cüruf ve kaynaşma eksikliği, kaynak bitişleri ve kaynak çıkıntıları ya da geometrik değişikliklerdir (Eryürek 1993).

Yorulma çatlağının ilerlemesi sonucu oluşan bölge, makroskopik olarak düz ve pürüzsüzdür. Çatlak zamanla yavaş ilerlerken karşılıklı yüzeylerin sürekli birbirine sürtünmesi sonucu yorulma kırılması yüzeyi parlak görünür (Şık 2005). Zorlamanın durdurulduğu aralıklar veya zorlama seviyesinin değişimi nedeniyle, ağaçlarda görülen yaş halkalarına benzer *duraklama çizgileri* bulunabilir. (Şekil 2.3, 2.4) Genellikle bu çizgiler alüminyumda çelikten daha çok belirgindir (Değer 1995).

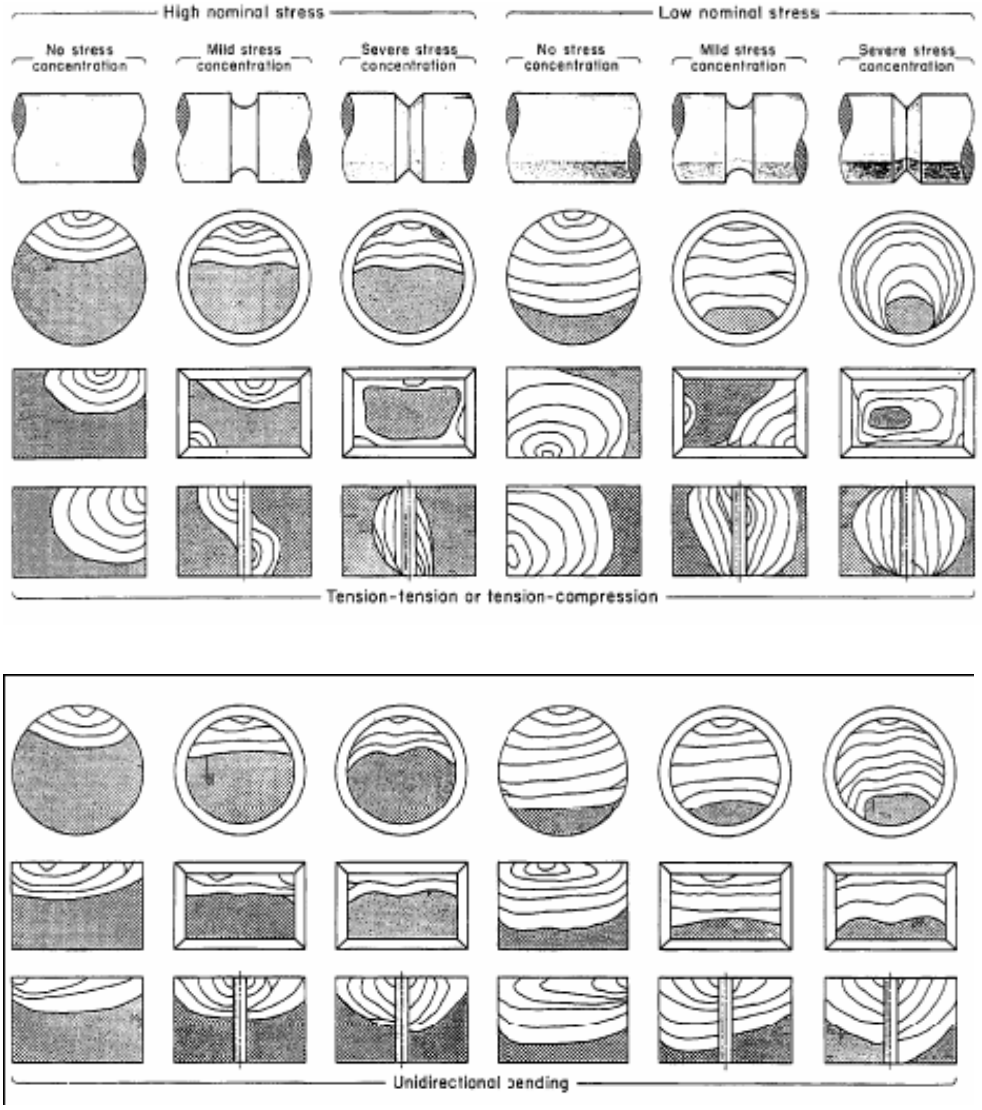


Şekil 2.2 Pürüzsüz bir numunede çoklu yorulma çatlak başlangıcı (59)

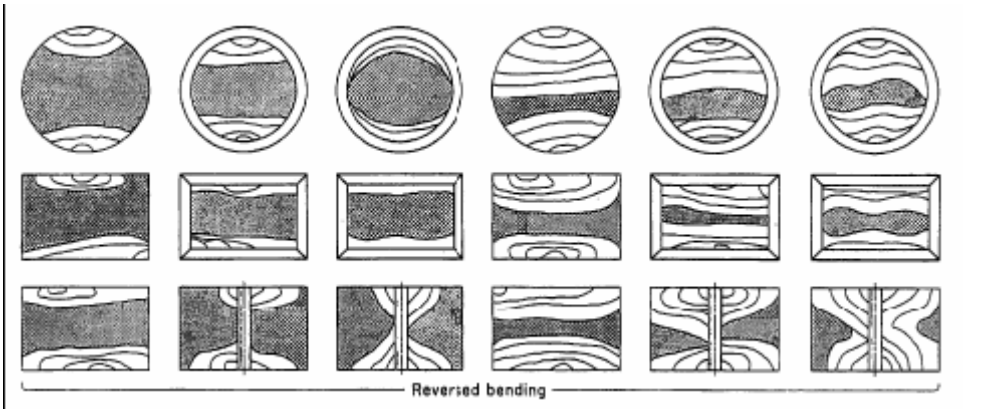


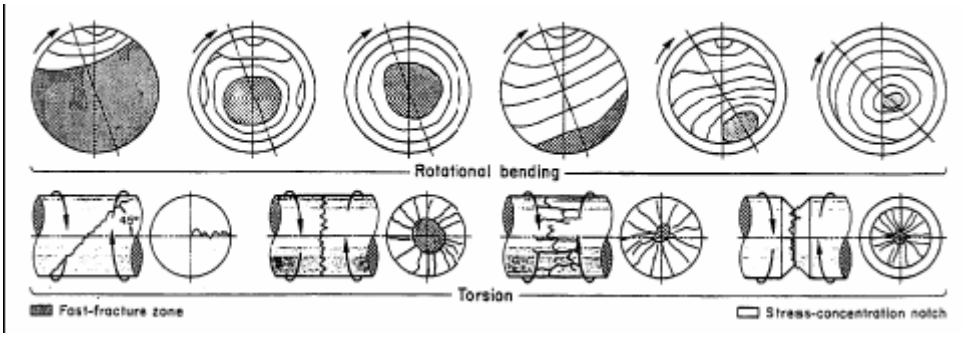
Şekil 2.3 Alüminyum alaşımının kırılma yüzeyindeki duraklama çizgileri (Eryürek 1993)

Zoraki kırılma bölgesinin büyüklüğü, uygulanan yükün büyüklüğü konusunda bilgiler verir. Çatlak ilerleyip geri kalan dolu kesit normal yükü taşıyamaz hale gelince ani kırılma meydana gelir ve kırılma yüzeyi taneli görünüştedir (Değer 1995).



Şekil 2.4 Yorulma kırılmalarının yüzeylerindeki işaretlerin şematik gösterimi (Değer 1995)



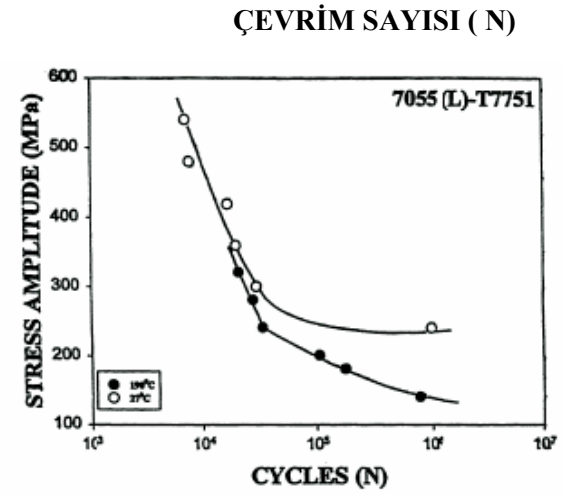


Şekil 2.4 'ün devamı: Yorulma kırılmalarının yüzeylerindeki işaretlerin şematik gösterimi (Değer 1995,Eryürek 1993)

2.2.5. Yorulma Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yorulma deneyinin sonuçları genellikle bir grafik halinde verilir.Deney esnasında uygulanan gerilme değeri (S)düşey eksende ve bu gerilme altında kırılıncaya kadar geçen süre içerisindeki çevrim sayısı (N) yatay eksende olmak üzere bir grafik çizilir (Değer 1995,Berg 1989,Rowley 1996).

Meydana getirilen bu grafiğe S-N eğrisi veya Wöhler diyagramı denilir. Her iki eksende verilen değerlerin logaritması alınarak tam logaritmik skala veya sadece çevrim sayısı eksenine logaritmik değerler alınarak yarı logaritmik skala kullanılabilir. (Şekil. 5) (Değer 1995,Berg 1989,Rowley 1996).



Şekil 2.5 7055 Alüminyum alaşım ının S - N eğrileri (Srivatsan 2000)

Değişken zorlamalarda malzemenin iç bünyesinde meydana gelen değişiklikler , N ile simgelenen yük değişme sayısına bağlıdır. Bu bakımdan alçak ve yüksek yük değişme sayılarına tekabül etmek üzere değişken zorlamalar iki bölgeye ayrılır. Kesin bir değer olmamakla beraber N <104 olduğu bölge alçak yük değişme sayılarını (Low Cycle) , N> 104 olduğu bölge yüksek yük değişme sayılarını (High Cycle) kapsar (Sakin 2004).

Alçak yük değişme sayısında meydana gelen kopma, statik kopma gibidir. Dolayısıyla, statik kopmadan farklı olan yorulma yüksek yük değişme sayılarının etkisi altında meydana gelen bir olaydır. Düşük gerilmelerde yorulma ömrü önemli ölçüde artar ve bazı durumlarda yorulma ömrü sonsuz olabilir. Bu durumda genellikle yüksek çevrimli yorulmadan bahsedilir. Bu durumun oluştuğu gerilmeye *"yorulma dayanım sınırı*" denilir (Sakin 2004).

2.2.6. Yorulma Deneyleri

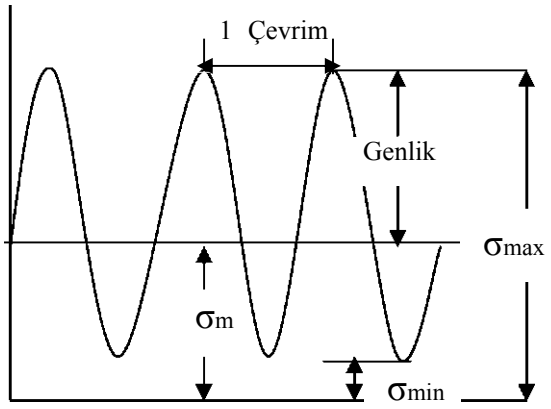
Yorulma testi, genellikle sinüzoidal yükleme ile yap ılır. Böylece yorulma yükünün durumunu Şekil 3.6 'da gösterilen birkaç parametre ile tarif edilebilir. Maksimum ve minimum gerilmenin belirlenmesiyle , gerilme dağılımı (σr) , gerilme genliği (σa) , ortalama gerilme (σm) ve gerilme oranı (R) gibi diğer gerilme parametrelerine kolayca karar verilebilir (Sakin 2004).

$$\sigma r = (\sigma max - \sigma min) \tag{2.3}$$

$$\sigma m = (\sigma max + \sigma rmin) / 2 \tag{2.4}$$

$$\sigma a = (\sigma max - \sigma rmin) / 2 \tag{2.5}$$

$$R = \sigma max / \sigma min \tag{2.6}$$



Şekil 2.6 Yorulma testi için sinüzoidal yükleme

R değeri, yorulma yükünün modunu gösteren değerdir. Tablo 2.5 'te önemli yorulma modları özetlenmiştir (Sakin 2004).

Tablo 2.5 R değeri ile gösterilen yorulma yükü modları

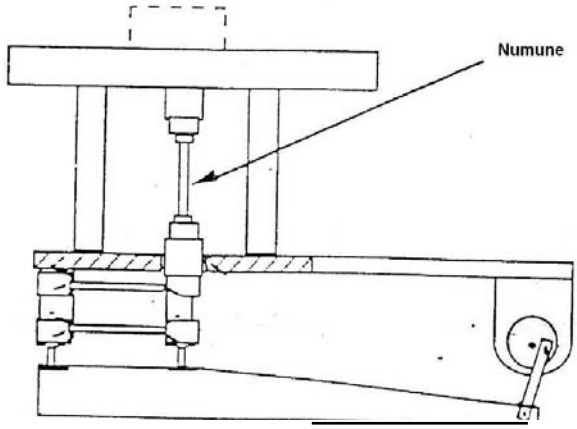
Yorulma Gerilmesi Oranı	Yorulma Yükü Modu
R - 1	Statik Yükleme
R - 0	Çekme -Yüksüz
0<R<1	Çekme - Çekme
R - - 1	Çekme - Basma, Tam Değişken
-1 < R < 0	Çekme - Basma

Yapılan araştırmalar sonucunda tam belirlenmiş bir yorulma testi ve numune boyutları bulunamamıştır. Çünkü makine parçasının yorulma ömrünü etkileyen pek çok faktör vardır ve yorulma çatlağının başlangıç ve yayılma aşamaları süresince farklı durumlar hedeflenir. Bu yüzden tekrarlı yüklemeye maruz çalışmakta olan makine parçasının yorulma ömrünü belirlemek için, mümkün olduğunca gerçek koşulların oluşturulması ve her deneysel durumda belirli bir koşulun sabit tutmalı. Diğerlerinin değiştirilmesinden dolayı, her bir duruma uyan sayısız değişik test düzeneği ortaya çıkmaktadır (Değer 1995,Sakin 2004). Günümüzde kullanılan yorulma deney makinaları çekme, çekme-basma, döner eğme, ileri-geri eğme ve burma yanında bileşik zorlamaları da mümkün kılmaktadır. Yorulma deneylerinin

esas amacı malzeme veya makine parçalarının uygulanan yüklemeye karşı göstereceği performansını tespit etmektir. Deneyde kullanılan gerilme türü yorulma deneyine de adını vermektedir (Değer 1995,Sakin 2004).

2.2.6.1. Eksenel Gerilmeli Yorulma Deneyi

Bu tür yorulma deneyinde numuneye uzunluğu boyunca değişken çekme ve basma gerilmeleri uygulanır. Gerilme numune kesitinde homojen olarak dağılır.



Şekil 2.7 Eksenel gerilmeli yorulma deneyi cihazı (Değer 1995)

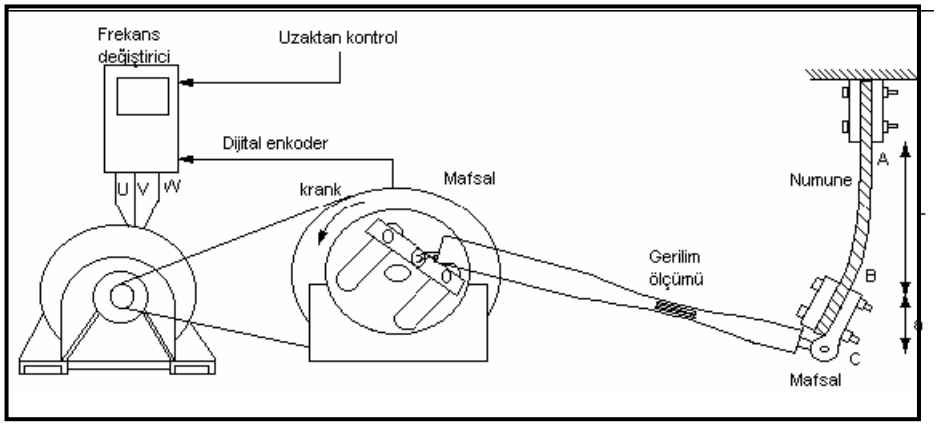
Eksenel yükler mekanik, hidrolik, elektromekanik sistemler ile uygulanabilir. (Şekil 2.7) eksenel gerilmeli yorulma deneyi cihazını şematik olarak göstermektedir (Değer 1995)

2.2.6.2. Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi

Eğmenin türüne bağlı olarak;

- Düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyi,
- Dönen eğme gerilmeli yorulma deneyi, olarak iki gruba ayrılır.

Düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyi türünde, numune nötr (tarafsız) bir düzleme göre tekrarlanan eğme gerilmelerinin etkisi altındadır. Numune hareketsiz olup eğme yükü hareketlidir. (Şekil 3.8) düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyi cihazını (schenk) göstermektedir (Değer 1995, Paepegem 2001).



Şekil 2.8 Düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyi cihazı şematik gösterimi (Değer 1995, Paepegem 2001)

Dönen eğme gerilmeli yorulma deneyinde ise numune devamlı dönen ve nötr bir eksene göre tekrarlanan eğme gerilmesine maruz bırakılır.

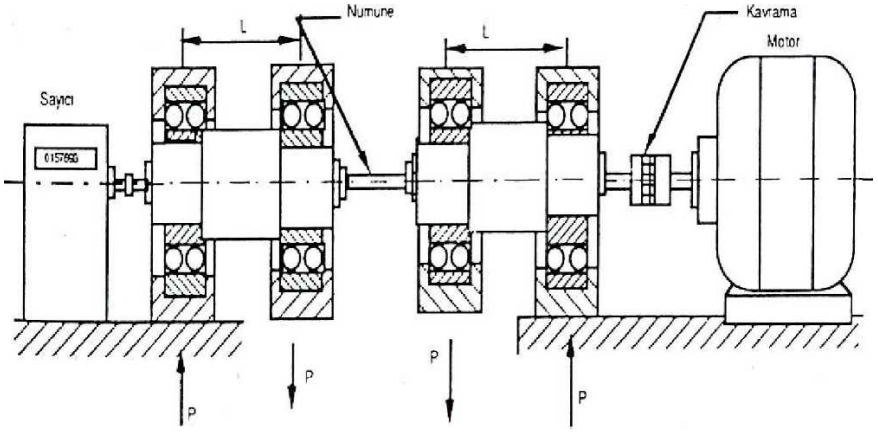
Bu tür yorulma deneyi ilk defa WöhIer tarafından geliştirilmiş ve demir yolu vagon akslarının yorulma dayanımı denenmiştir (Değer 1995, Paepegem 2001).

Dönen eğme gerilmeli yorulma deneyi cihazları yükün uygulama durumuna bağlı olarak iki gruba ayrılmıştır.

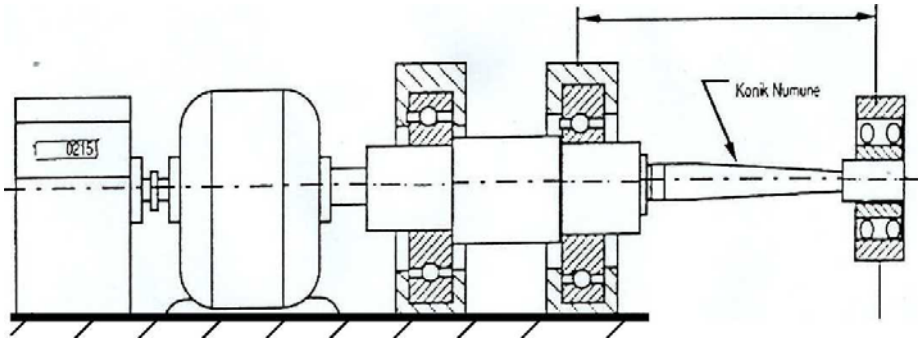
- Sabit eğme momentli (Şekil 2.9),

- Ankastre kiriş türü (Şekil 2.10)

Bu tür gerilmelere örnek olarak hareket halindeki taşıtların akslarında meydana gelen gerilmeler gösterilebilir (Değer 1995).



Şekil 2.9 Sabit eğme momentli yorulma cihazı (Değer 1995)

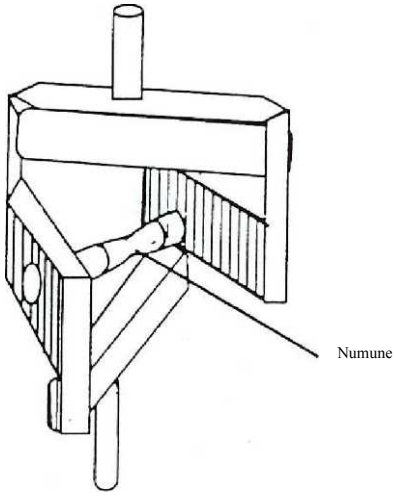


I

Şekil 2.10 Ankastre kiriş türü yorulma deneyi cihazı (Değer 1995)

2.2.6.3. Burulma Gerilmeli Yorulma Deneyi

Deney numunesine sabit bir eksene göre tekrarlanan burma işlemi uygulanmaktadır. Araçların süspansiyon yaylarında ve çekme basma kuvvetlerinin uygulandığı bütün helisel yaylara bu tür burma gerilmeleri uygulanır (Sekil 2.11) (Değer 1995) belirli bir açıda burulmayı sağlayan deney düzeneğini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 2.11 Burulma momenti sağlayan deney düzeneği (Değer 1995)

2.2.6.4. Bileşik Gerilmeli Yorulma Deneyi

Aynı anda birden fazla gerilme türünün uygulanması halinde yorulma davranışını incelemekte kullanılır. Uygulamada en çok kullanılan bileşik gerilme durumu eğme ve burma gerilmelerinin bir arada bulunduğu durum ile eksenel ve burma gerilmelerinin bir arada bulunduğu durumdur. Motorların krank mili üzerinde bulunan biyel kolu yataklarındaki gerilme eğme burma gerilmesinin bir arada bulunduğu gerilme türüne ait en güzel örnektir (Değer 1995).

2.2.7. Rüzgar Türbini ve Kanatlarındaki Yorulma

Rüzgar türbinleri ve vantilatörler, etkiyen değişken yüklerin karmaşık sisteminden dolayı özellikle yorulma hasarından çok etkilenirler. Özellikle kanatlar risk altındadır. Bu nedenle bir çok araştırmacı, işletme ömrü süresince kanatların yorulma hasar olasılıklarını değerlendirebilmek için yoğun çaba sarf etmişlerdir (Rowley 1996).

Eğer yorulmadan dolayı oluşan hasar belirli bir seviyenin üzerine çıkmış ise çevrim yükleri altındaki bir rüzgar türbini kısa zamanda hasara uğrayabilir. İlk başlangıçta, kırılma olmaksızın çevrim yükü alt ında hasar büyür. Çünkü,

- Bölgesel olarak oluşan net gerilme, malzemenin maksimum gerilmesini aşmıştır, yada
- Hasar birikimden dolayı kritik bir çatlak oluşmuştur. Bir elemandaki hasar büyüme oranı çevrimsel gerilme oranına bağlı ise, yük oranı R (uygulanan çevrim gerilmesinin malzemenin maksimum çekme mukavemetine bölümü) ve o andaki hasar değeri D ise,

$$\frac{dD}{dN} = R(\Delta\sigma, R, D) \qquad (2.7)$$

$\Delta\sigma$: Çevrim anındaki gerilim oranı

R : Uygulanan çevrim gerilmesinin malzemenin maksimum çekme gerilmesine oranı

D : Hasar değeri (kırılma gerçekleşen bölgedeki hasar yüzdesi)

N : Çevrim sayısı

Yorulma ömrü Nf , kırılmanın olduğu yerdeki başlangıç hasarını kırılma için en yüksek değerine yükselten veya hasar seviyesini kritik seviyenin üzerine çıkaran yük çevrim sayısıdır (Çam 2005).

Bu nedenle,

$$Nf = \frac{dD}{f(\Delta\sigma, R, D)} \qquad (2.8)$$

Bu durumda, Nf çevrim sayısını tanımlamak gerekecektir. Bu tanımlama için genellikle, S (gerilme)-N(çevrim) eğrileri kullanılır. Malzemeye uygulanan değişken gerilme ve çevrim sayısı (N) gerilme genliğinin bir fonksiyonu olarak tarif edilir. SN eğrisinin eğimi, malzeme yorulmasındaki direncin bir ölçüsüdür ve malzemeden malzemeye değişiklik gösteriri (Rowley 1996).

2.2.7.2. Yorulmaya Etki Eden Faktörler

S-N eğrileri, kanatlardaki yorulma özelliklerini izafi olarak verir. Ancak, S-N eğrileri çalışma süresince türbin kanatlarında etkili olan karmaşık ve farklı yük tekrarlarının etkilerini hesaba katmaz. Bu kuvvetler, kanatların kendi kütlesinden ve rüzgarın etkisiyle meydana gelir (62). Bu kuvvetler;

Yerçekimi (kanadın kütlesi üzerindeki dünyanın çekiminden dolayı, her çevrimde basma ve çekmeye sebep olur)

Merkezkaç (kanadın dönmesinden dolayı)

Rüzgarın itmesi (kanat düzlemine dik bir kuvvet) (nispeten daha yavaş)

Rüzgar türbülansından dolayı hızlı bir şekilde değişerek meydana gelen kuvvetler.

Araştırmalara göre, nispeten düşük frekans ve yüksek genlikli rüzgar itme kuvveti değişken eğilme gerilmeleri (çeki-bası) yaratacağından yorulma hasarı üzerinde oldukça etkilidir. Dolayısıyla, diğer bahsedilen yüklerle kıyaslandığında rüzgar itme kuvveti yorulma hasarı üzerinde çok daha fazla etkilidir (Rowley 1996).

2.2.7.3.Kanat Malzemelerindeki Yorulma Özellikleri

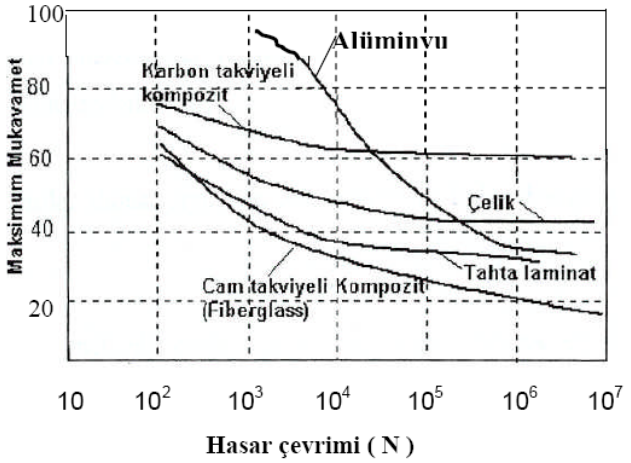
Türbin kanat malzemeleri üç grupta sınıflandırılabilir.

- Metaller
- Kompozitler

- Ahşap Laminantlar

Yumuşak çelik gibi bazı metaller nispeten daha iyi yorulma dayanımı gösterirler. Bu malzemelerin; maksimum çekme dayanımının yarısından daha az titreşim gerilmesine maruz kalması sağlanırsa, iyi dizayn edilir, bakımları zamanın da yapılırsa uzun süreli çalışmalar için kanat malzemesi olarak kullanılabilir (Rowley 1996).

Ne yazık ki , çoğu hafif alaşım gibi alüminyum da zamanla birlikte sürekli düşüş gösteren bir S-N davranışı sergiler.(Şekil 2.12)



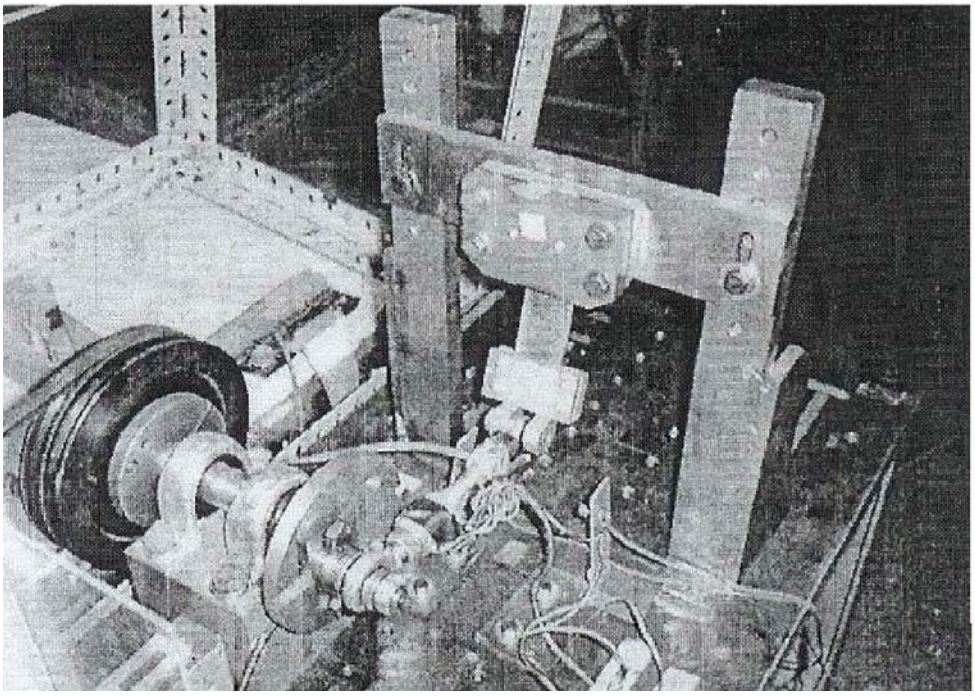
Şekil 2.12 Çeşitli kanat malzemelerinin yorulma özellikleri (Rowley 1996)

MATERYAL VE YÖNTEM

3. DENEYLERİN UYGULANMASI

3.1 Test Cihazı Tasarımı ve İmalatı

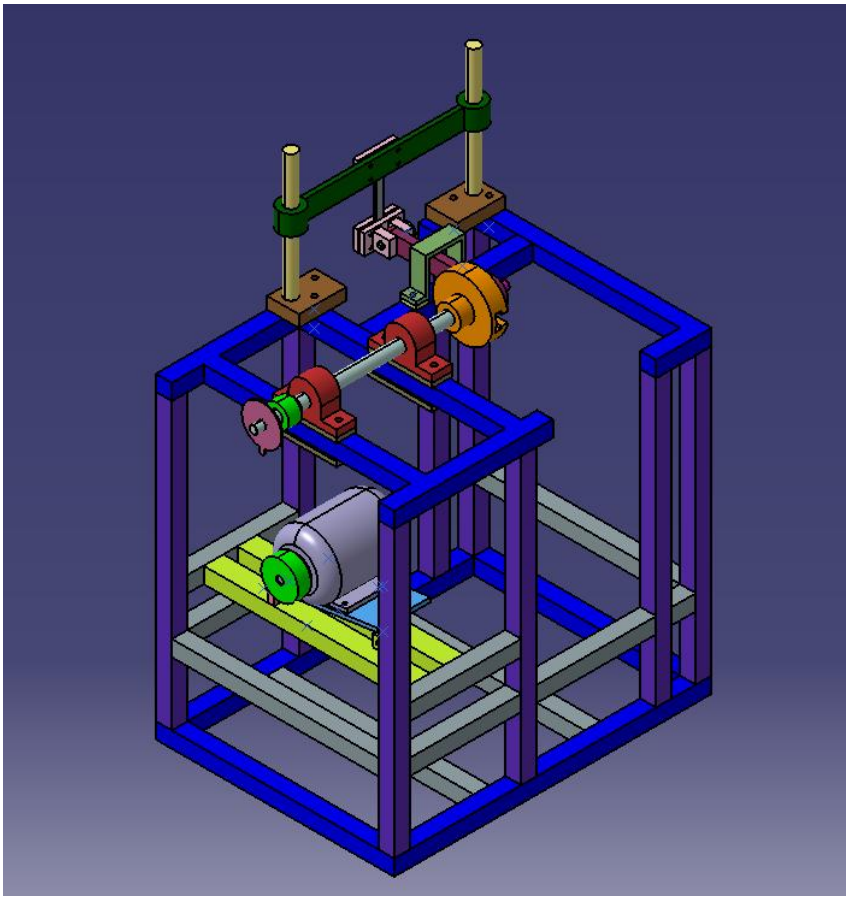
Rüzgar türbinlerinin kanatçıklarının yapımında kullanılan plaka şeklindeki alüminyum malzemelerin yorulma ömürlerinin tespit edilmesi amacıyla kullanılacak olan yorulma makinesi kompozit malzemelerin yorulmasında kullanılan düzlemsel eğme gerilmeli yorulma cihazı baz alınarak tasarlanmıştır.(Şekil 3.1) (Paepegem 2001).



Şekil 3.1 Düz örgülü cam/ epoksi kompozit malzemelerin eğme yorulmasında kullanılan yorulma cihazı (Paepegem 2001)

Cihazda kullanılan elektrik motoru, 380V motor olup, devir kontrol amacıyla

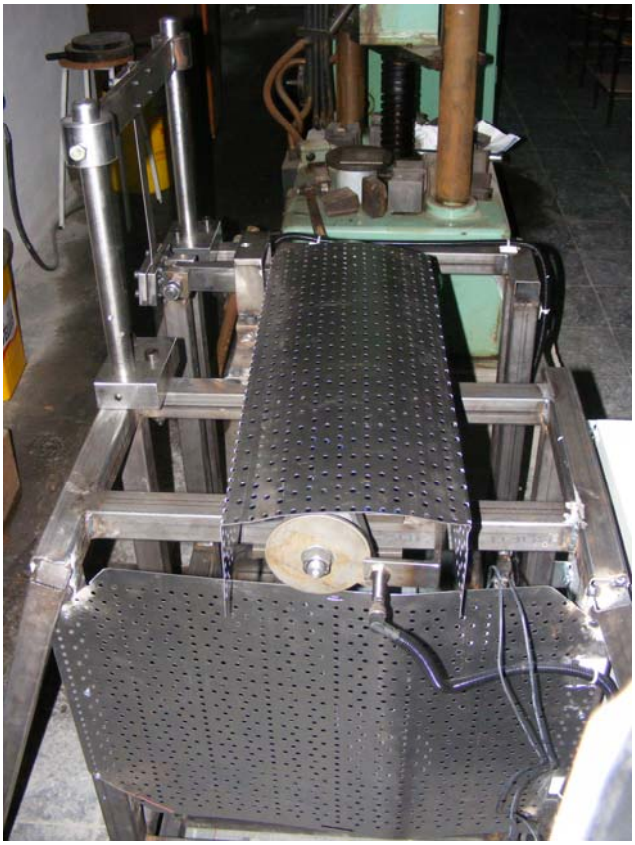
takılan invertör vasıtasıyla motorun 220 V luk şehir akımıyla çalışması sağlanmıştır. Motor devri 2850 dev/dak, motor gücü 0,75 KW (1 HP) tır. Motorla mil arasındaki hareket iletimi triger kayışı ile sağlanmaktadır(Şekil 4.2). Motor dişlisi ile mil dişlisi arasındaki hareket oranı 1,5 / 1 dir. Motor 2850 devirde dönerken mil 4275 dev / dak ile dönmesi teorik olarak planlanmıştır. Cihazın maksimum güçte çalışma esnasında dijital takometre ölçümlerine maksimum devir 4020 dev / dak olarak tespit edilmiştir. Maksimum çalışma frekansı 67 Hertz dir. Frekans cihaza akuple invertör vasıtasıyla 0-50 arasındaki bir skalada 0 dan 67 Hertz e kadar ayarlanabilmektedir. Cihaz tasarımında invertör yerleştirilmesindeki ana sebep cihaz imalatı sonrası yapılacak denemelerde yüksek devirlerde cihazda meydana gelebilecek tahribatla birlikte oluşabilecek güvenlik zafiyetlerinin önlenmesidir. Bir diğer sebepte, yüksek devirlerde oluşacak balans probleminin deneylerin sonucuna etki ederek çalışmanın güvenilirliğini azaltmasının önüne geçmektir.

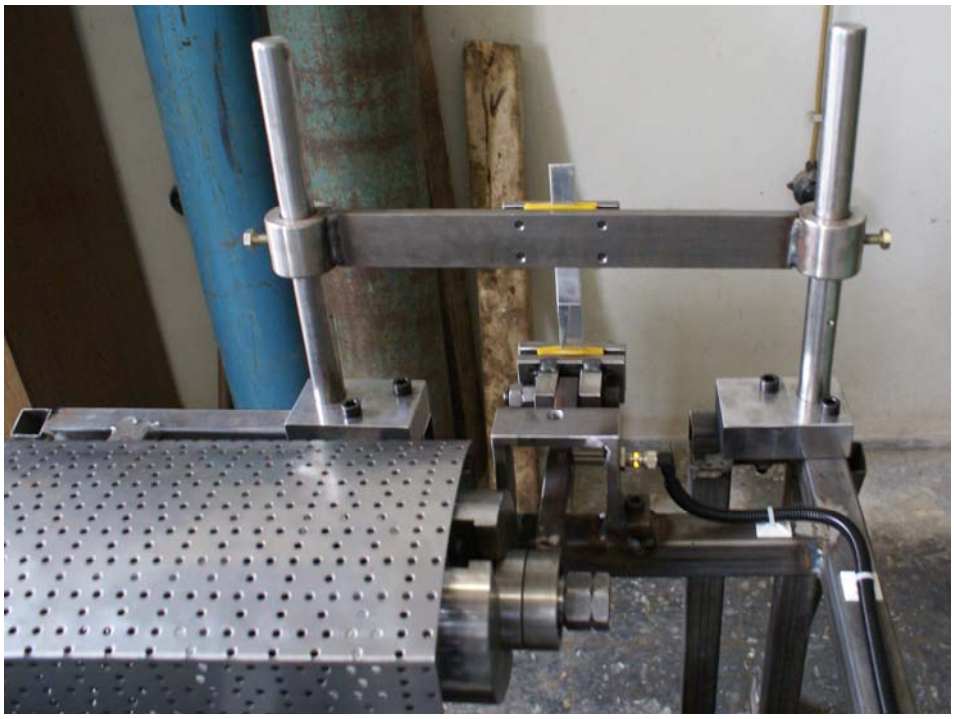


Şekil 3.2 Cihazın 3D tasarım programında tasarlanmış izometrik görünüşü

Cihaz imalatında çalışma süresince oluşabilecek yüksek dinamik kuvvetlere dayanıklı olabilmesi amacıyla cihazın taşıyıcı iskeleti 40 X 40 çelik profillerle güçlendirilmiştir. Oluşabilecek yüksek titreşimlerin cıvata bağlantılarında çözülmeye neden olabileceği nedeniyle profiller birbirlerine elektrik ark kaynak bağlantılarıyla birleştirilmiştir. Cihazın taban kısmından 200 mm yüksekliğinde çepeçevre sac panellerle kapatılmış bölüm bulunmaktadır. Bunda amaç cihazın yere sabitlenmesinden sonra bu bölmeye beton dökülmesi ile cihazın olabilecek en rijit şartları sağlamasıdır. Çalışmam sırasında bu bölüme beton dökülmemiş yerine aynı görevi gören kalın çelik miller koyulmuştur.

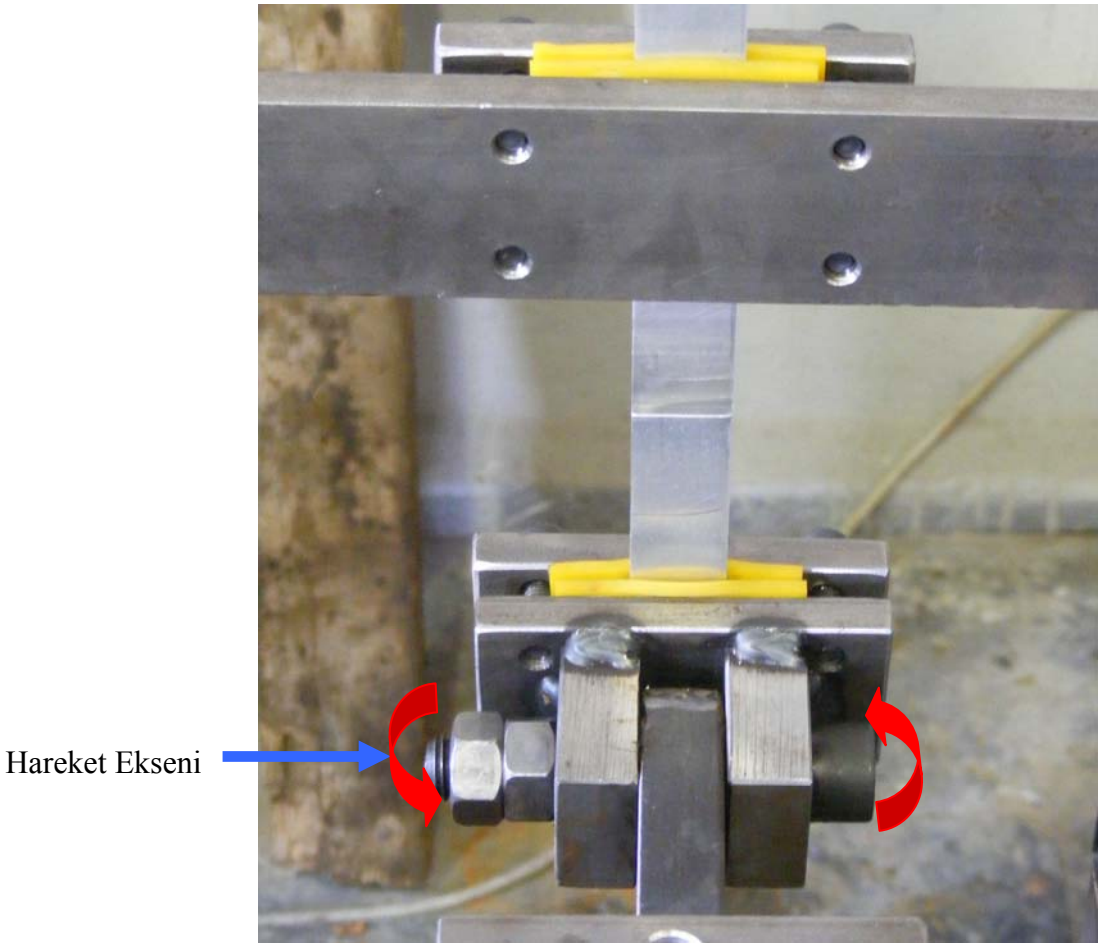
Cihazın zemine montajı, cihaz çalışma eksenine dik yönde oluşacak dinamik yükleri karşılayabilmesi için çapraz profiller kullanılmış, bu profiller de T profiller ile cihaza kaynaklı bağlantı, yere ise M 16 çelik dübel vasıtasıyla sağlanmıştır. Bu uygulama tasarım aşamasında ön görülmemiş ancak uygulama sonrası ortaya çıkan vibrasyon probleminin çözümü amacıyla uygulanmıştır. Zemin ile T profilin temas noktalarına darbeleri sönümleme amacıyla kauçuk takozlar yerleştirilmiştir. Cihazın motor-kayış ile mil-yatak bağlantıları güvenlik nedeniyle delikli saclar yardımıyla kapatılmıştır. Cihazın gerçek görünüşü Şekil 3.2.1 de gösterilmiştir.





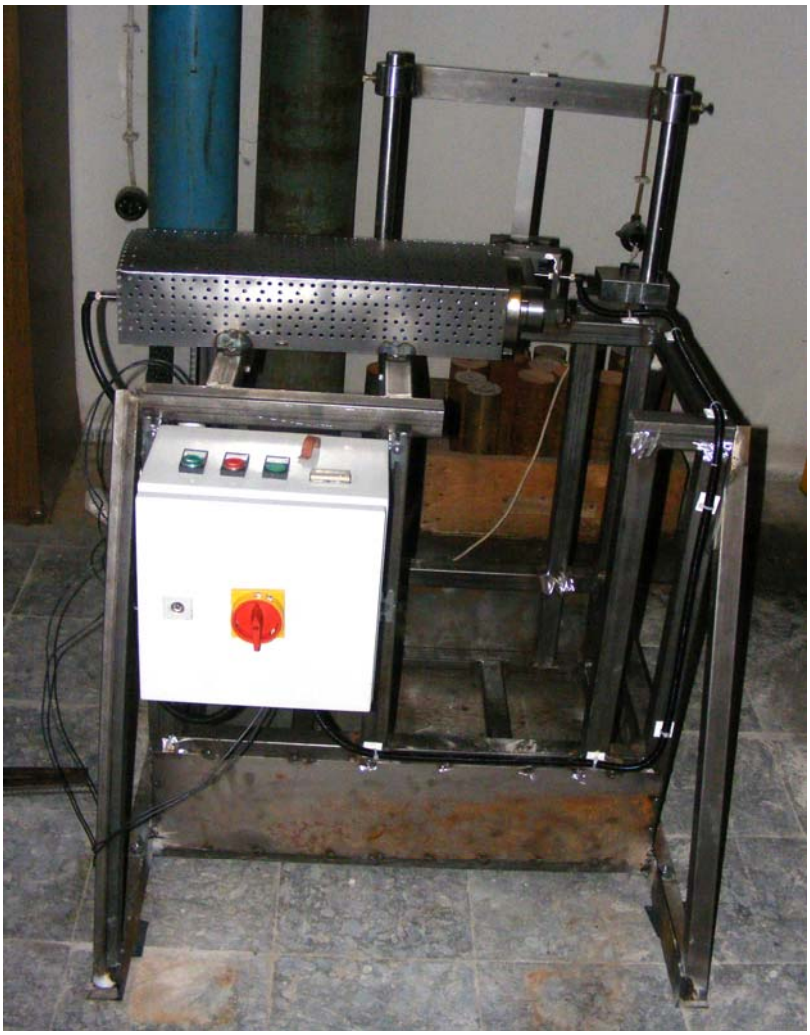
Şekil 3.2.1 Cihaz görüntüsü

Cihazda numune bağlama sistemi, temel olarak 2 adet çap 30 mm lik mil üzerinde hareket eden ve numune boyuna göre ayar yapılabilen ve üzerinde numunenin bağlanması için 4 adet cıvata bağlantılı iç yüzeyleri 3 mm kalınlığında vulkolon kauçuk kaplı pabuç ve bunu taşıyan kiriş sisteminden ibarettir. Burada kauçuk kullanılmasının nedeni, parçanın bağlantı elemanlarının eskin köşelerinde maruz kalacağı kesme kuvvetlerinden etkilenmesinin önüne geçilmesidir. Numuneye asıl yorulma kuvvetini veren biyel ile numune bağlantısı, yük doğrultusunda serbest olarak hareket edebilen bir mafsal ile sağlanmıştır. Yine burada da vulkolon kauçuk pabuçlar kullanılmıştır. (Şekil 3.3)



Şekil 3.3 Numune bağlantısı

Şekil 3.3 de görüldüğü üzere hareket ekseni çevresinde izin verilen hareket sayesinde biyel kolundan numuneye iletilen kuvvetin sadece izin verilen doğrultuda sehim yaptırılması sağlanmış, düğer yönlerde ki istenmeyen kuvvetler önlenmiştir.



Şekil 3.4 Cihaz genel görünümü

Cihazın altına yerleştirilmiş olan elektrik motoru bir tarafından menteşe bağlantısı yağılmıştır. Diğer tarafına ise M 18 lik cıvata üzerinde hareket etmesini sağlayan bağlantı yağılmıştır. Bu sayede kayış takılırken ve sonrasında kayışın gerginliği ayarlanırken sadece M 18 cıvata üzerinde ki somunların ayarlanması yeterli olmuştur.

3.1.1. Cihazın Çalışma Prensibi

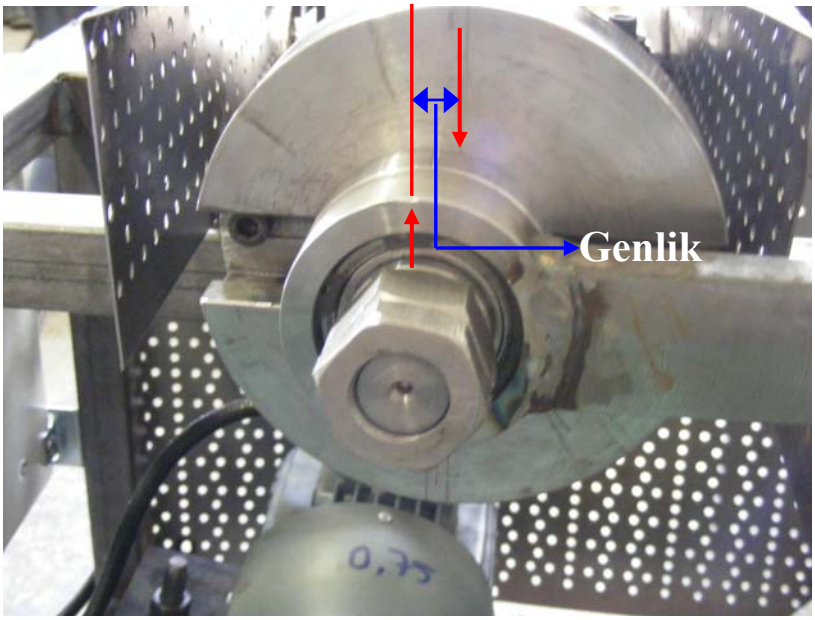
Cihaz motordan almış olduğu hareketi motor miline bağlı dişli çark vasıtasıyla triger kayışına, buradan volana bağlı ana mil üzerindeki dişliye aktarmaktadır. Burada dişliler arasındaki 1,5 / 1 lik çevirme oranı ile motordan çıkan devrin 1,5 katı devir volana iletilmektedir. Volana bağlı ana mil 30 mm çapında imalat çeliğinden hazır işlenmiş olarak seçilmiştir. Mili yataklaması amacıyla 2 adet çap 30 mm lik gres yağlamalı bilyeli yatak kullanılmıştır. (Şekil 3.5)



Şekil 3.5 Ana mil volan bağlantıları

Milden aldığı hareketle dönen 250 mm çapındaki volan, merkezinden rulman yataklaması ile hareketi biyel koluna iletir.

Burada dönme hareketi biyel kolu vasıtasıyla çekme-basma doğrultusunda numuneye iletilir. Burada çekme-basma kuvvetinin oluşabilmesi için biyel ile volanın merkezi arasında eksantriklik olması gereklidir. Bu aynı zamanda ayarlanabilir bir eksantriklik olmalıdır. Bu amaçla volan üzerine dönme eksenine dik yönde T kanal açılmıştır. Biyel bu kanal boyunca istenilen miktarda hareket edebilmekte, istenen değere ayarlanmasından sonra 2 adet M 22 lik somun ile kontra yapılarak sabitlenmektedir. Ayrıca somunların çalışma esnasında gevşeyerek T kanaldan fırlaması tehlikesine karşılık T kanalın her iki ucuna da birer adet stoper vasıtası gören M 6 cıvata yerleştirilmiştir. Yaptırılması istenen sehim bu şekilde ayarlandıktan sonra numunenin boyuna uygun bağlama yüksekliği kolonlar üzerinde hareket eden kiriş vasıtasıyla yapılır. Her iki yanında bulunan cıvataların gevşetilmesiyle kiriş istenen yüksekliğe ayarlanır ve cıvataların tekrar sıkılmasıyla sabitlenir. (Şekil 3.6)



Şekil 3.6 Genlik ayar mekanizması

Cihazın mekanik kısımlarının yanında emniyet ve hassasiyet için cihaza entegre elektronik sistemleri de mevcuttur. Tüm elektronik sistemlerin kontrolü cihaz üzerinde ki panoda toplanmıştır. Pano içerisinde 1 adet Delta marka frekans invertörü, 1 adet güç kaynağı ile sensör ve sayaç kontrollerinin yapıldığı devre kartı bulunmaktadır. Cihaz üzerinde 2 adet ışığa duyarlı fotoelektrik sensör bulunmaktadır. Sensörlerden biri ana milin uç kısmına bağlı, dairesel sac plakanın en dış çapında bulunan bir parçayı görecek şekilde ayarlanmıştır. Milin ve dolayısıyla volanın 360° lik her bir dönüşünde 1 kere sensör tarafından algılanmakta bu elektriksel sinyal sayaç tarafından alınarak devir sayısı sayaç ekranında görülmektedir. Cihazda kullanılan sayaç 8 hanelidir. Diğer sensör ise biyel kolunu görecek şekilde biyel kolunun etrafına yerleştirilmiş U şeklinde ki lamanın üzerine yerleştirilmiştir. Numunenin kopması sonrasında biyel kolunun tehlikeli şekilde hareketine devam etmesi bu U şeklindeki parça vasıtasıyla önlenmiştir. Burada ki sensör biyel kolunu görmesi üzerine ayarlanmıştır. Numune kopup biyel kolu aşağı düştüğünde sensör biyel kolunu görememekte ve gönderdiği sinyalle motora giden elektriği keserek hem cihazın test sonunda otomatik olarak durmasını hem de sayacın durmasını sağlamaktadır. Bu sayede uzun sürecek test süreçlerinde başında bir operatör bulunmaksızın testlerin yapılabilmesi sağlanmıştır. Denemelerin hızlı bir şekilde yapılabilmesi ve sonuçların görülebilmesi için pano üzerinde kontrol tuşları ve dijital sayaç ekranı yerleştirilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 kontrol butonları ve dijital sayaç

Her deneme öncesi sayacın sıfırlanması için “RESET” tuşuna basılır, denemeye başlamak için “START” butonuna, herhangi bir problemde denemeyi durdurmak için “STOP” butonuna basılır. Numune takılı değilken biyel kolu aşağıda olacağından sensör algılamayıp sistemin çalışmasını engelleyecektir.

3.2. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞININ UYGULANMASI

3.2.1. Kaynak Numunelerinin Hazırlanması

Ticari olarak 1000 X 2000 mm lik levhalar halinde satılan 3003 serisi alüminyum levhaların tedarik edilmesinden sonra ilk iş olarak levhalar U.Ü. Meslek Yüksek Okulu Laboratuarların da bulunan giyotin makas ile önce 1000 X 1000 lik 2 adet levhaya daha sonrada kaynak yapılacak boyutlarda 100 X 360 mm ebadında kesildi. Hazırlanan levhaların kesme işlemi sonrası kenarlarında oluşabilecek pürüzlülükler kaynak kalitesine etki etmemesi için kaynak alın yüzeyleri ince zımparayla temizlendi. Levha yüzeyleri yağ ve yabancı partiküllerden korunmak amacıyla silindi.

3.2.2. Kaynak Öncesi Hazırlıklar

Sürtünme karıştırma kaynağı yurtdışında giderek yaygınlaşan bir uygulamadır. Ancak ülkemizde bununla ilgili çalışmalar henüz yenidir. Bu yüzden sürtünme karıştırma kaynakları orijinal bu iş için dizayn ve üretimleri yapılmış tezgahlar yerine aynı işi yapabilecek üniversal freze tezgahlarında yapılmaya çalışılmıştır. Burada en büyük dezavantaj kaynağı yapan takım tutucu kafadan kaynaklanmaktadır. Orijinal sürtünme karıştırma kaynağı makinelerinde bu kafa hidrolik bir sisteme sahiptir ve istenildiği şekilde takım bastırma kuvveti ayarlanabilmektedir.

Bizim uygulamamızda ise baskı kuvveti ayarlanamamakta, burada insiyatif uygulayıcının tecrübe ve becerisine kalmaktadır. Ayrıca geleneksel freze tezgahlarında kafa sistemleri dişli mekanizmalarla dikey hareketi yaptıklarından kafaya gelecek aşırı kuvvet bu dişlilerin dağılmasına neden olacaktır.

Oysaki orijinal sürtünme karıştırma kaynağı tezgahlarında dikey hareket hidrolik sistemle sağlandığından, aşırı yüklemelerde sistem basıncı azaltarak kendini koruyabilmektedir. Bu sebeplerden kaynak uygulamaları yavaş ve dikkatlice olmuştur.

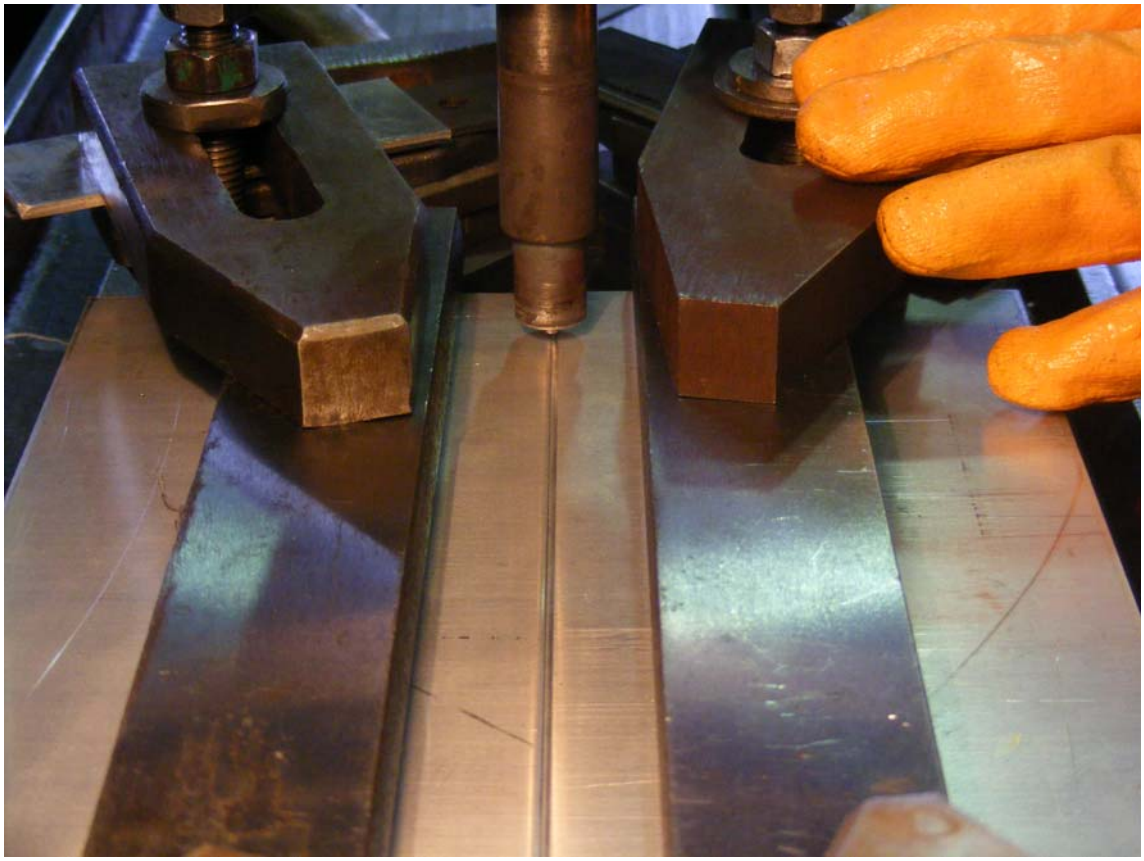
Sürtünme karıştırma uygulaması U.Ü. Müh Mim Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuarında bulunan 1969 yapımı TOS marka Çekoslavak malı üniversal freze tezgahında yapılmıştır. Kaynağa başlamadan önce uygulama esnasında kullanılacak kaynak parametreleri belirlenmiştir.

Uygulanan kaynak parametreleri için takım dönme hızları 1070, 1520,ve 2140 dev/dak, ilerleme hızları içinde 40, 80, 112 mm/dak'lık değerler alınmıştır

Parametreler seçilirken farklılıkların görülebilmesi için mümkün olduğunca geniş aralıklar seçilmiştir.

Uygun parametrelerin ayarlanmasından sonra kaynağı yapılacak parçalar tezgaha bağlanmaya başlanmıştır. Bu aşamada en önemli sorun parçaların kaynak süresince sabit olarak kalabilmesi ve aynı zamanda levhalarda olabilecek sehimlerin önlenmesidir. Bu amaçla önce tezgaha iki yüzeyi de frezede işlenmiş kalın bir çelik levha konulmuştur. Ardından parçalar aralarında boşluk kalmayacak şekilde levhanın üzerine yerleştirilmiştir. En son olarak kaynak ilerleme yönünde parçaların üzerine yine frezede işlenmiş kalın ama genişlikleri takımın hareketine mani olmayacak kadar olan çelik plakalar yerleştirilmiştir.

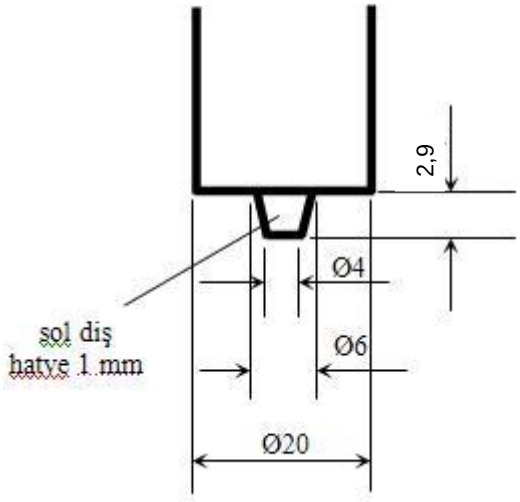
Bir ucu tezgahın T kanallarına bağlı diğer ucunda ise çelik plakalara baskı yapacak pabuçlar olan bağlama elemanları iyice sıkılarak parçanın rijit bir şekilde bağlanması sağlanmıştır. (Şekil 3.8)



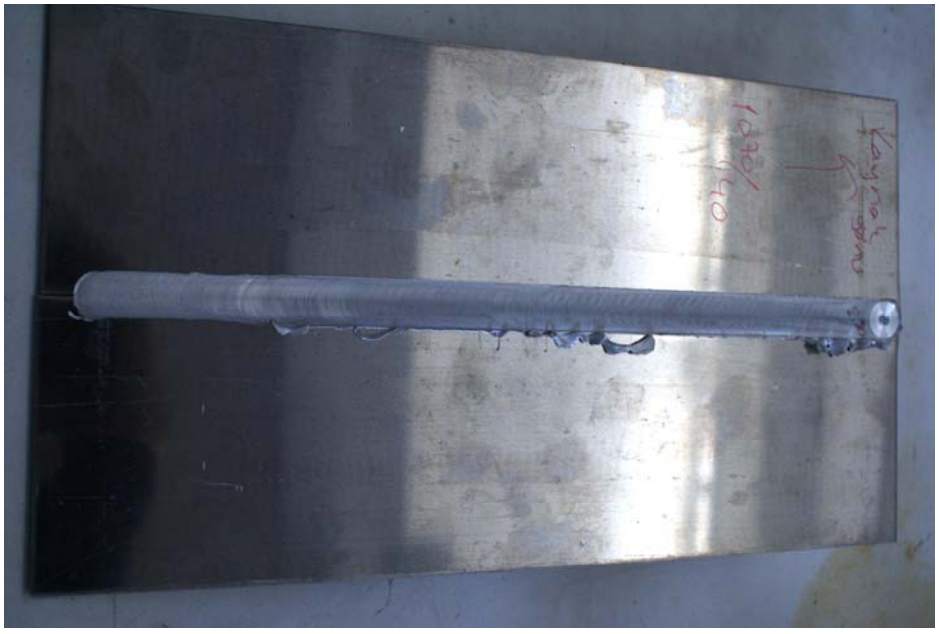
Şekil 3.8 Levhaların tezgaha bağlanması

Kaynaklar şekil 3.9' da geometrisi verilen kaynak takımı ile yapılmıştır. Kaynak yapılan takım ucu standart olmayıp CNC tornada özel olarak yaptırılmıştır. Ancak bu iş için yapılmış özel takımların uç geometrisine sahip olmadığı için kaynak başlangıcında takımın alüminyum levhaya girmesini kolaylaştırmak için el matkabı yardımıyla levhada kaynağın başlangıç noktasına iz yapılmıştır. Bu sayede takımın levhayı daha kolay nüfuz etmesii sağlanmıştır.

Kaynak sonrası elde edilen bir numunenin görüntüsü şekil 3.10 da gösterilmiştir.

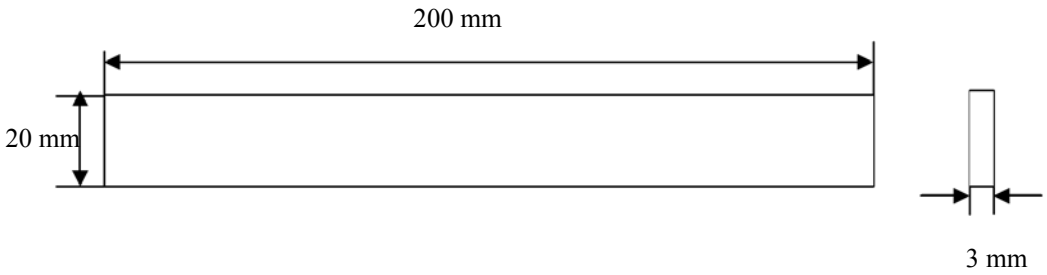


Şekil 3.9 Kaynakta kullanılan uç geometrisi



Şekil 3.10 Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş Al levhalar

Bundan sonraki aşama kaynaklı levhalardan deney numunelerinin alınmasıdır. Yorulma deneyi numuneleri şekil 3.11'de görülebilir



Şekil 3.11 Yorulma deney numunelerinin boyutları

3.3. YORULMA DENEYLERİNİN YAPILMASI

3.3.1. Deney Parametrelerinin Seçimi

Deney parametrelerinin seçiminde bizi sınırlandıran cihazımızın yetenekleri olmuştur. Cihazımız genlik ayarlı olduğundan numuneye test sırasında uygulanan maksimum gerilmenin önceden hesaplanarak bu gerilmeye uygun genliklerin belirlenmesi gerekmektedir. Öncelikle gerilme hesabının yapılabilmesi için malzeme özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla üretici firmanın yapmış olduğu testler sonucu elde ettiği minimum malzeme özelliklerini veren malzeme sertifikası aşağıda verilmiştir. (Şekil 3.12)

TEST SERTİFİKASI
INSPECTION CERTIFICATE

Tarih / Date
11.01.2010

(EN 10204-3.1.b'e göre düzenlenmiştir.)
(Prepared according to EN 10204-3.1.b)

Sipariş No / Order Number: 8809199
Müşteri Sipariş No / Customer Order Number:
Kafile No / Heat Number: T880919907/1
Paket No / Package Number: T10.0162
Alaşım - Kondüsyon / Alloy - Temper: 3003 H0
Ölçüler / Dimensions: 3,00 x 1500 x 3000 mm

Kimyasal Bileşim / Chemical Composition

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Zr	Al
min			0,050	1,000									
max	0,600	0,700	0,200	1,500	.....	.....	.....	0,100	.....	.....	.....	0,050	
Sonuçlar/ Test Result	0,201	0,665	0,053	1,082	0,127	0,000	0,001	0,014	0,021	0,011	0,018	0,003	97,804

Mekanik Özellikler / Mechanical Properties

	Çekme Muk. Tensile Strength (MPa)	Akma Muk. Yield Strength (MPa)	Uzama Elongation (%)	Sertlik / Hardness (HB)
min	95,00	35,00	20,00	
max	135,00			
Test Sonucu / Test Results	128,97	65,70	43,52	

Yüzey Özellikleri / Surface Properties

Düz / Plain ☒
Çetalı / Tread Plates; 5 Bar ☐ Diamond ☐
Gofrajlı / Embossed Products; Stucco ☐ Diamond ☐
Yağsız / Degreased ☒
Az Yağlı / Slightly Oil ☐
Yağlı / Mill Finish ☐

Notlar ve Özel Talepler / Notes and Special Demands:

Kalite Sağlama ve Geliştirme Şefliği

Şekil 3.12 Kullanılan malzemeye ait test sertifikası

Yorulma davranışının inceleneceği bu çalışmada malzemeye uygulanacak maksimum gerilmenin malzemenin elastik sınırları içerisinde olması önemlidir. Yorulma ancak elastik sınırlar içerisinde incelenebilmektedir. Bu sınırın aşılması durumunda malzeme plastik deformasyona maruz kalacağından malzemede kalıcı deformasyonlar oluşur. Bu da yorulma analizi yapılmasını anlamsız kılar. Bu nedenle numuneye uygulanabilecek maksimum gerilme malzemenin elastik sınırlarının bitip plastik deformasyon bölgesine geçtiği "Akma Gerilmesi" nin altında alınmalıdır.

Aşağıda Akma Gerilmesi baz alınarak malzemenin maksimum genlik sınırlarının hesaplanması verilmiştir.

Ankastre kiriş türü bağlantı için maksimum genlik değeri (3.1) ve (3.2) formülleri kullanılarak hesaplanmıştır (Değer 1995, Sakin 2004)

$$\sigma_e = \frac{6.\,F_e.l}{B.H^2} \qquad (3.1)$$

Burada σ_e maksimum eğilme mukavemeti olup malzemenin test sertifikasındaki akma mukavemeti seçilmiştir.

F_e = Eğilme kuvveti (N)

l = Moment kolu (mm), moment kolu numunelerde 100 mm olarak seçilmiştir.

B = Numunenin genişliği (mm), numune genişliği 20 mm olarak seçimiştir.

H =Numunenin kalınlığı (mm), numune kalınlığı 3 mm olarak belirlenmiştir

$$f = \frac{F_e.\,l^3}{3.E.I} \qquad (3.2)$$

F = Genlik (mm)

F_e = Eğilme kuvveti (N)

l = Moment kolu (mm), moment kolu numunelerde 100 mm olarak seçilmiştir.

E : Elastisite modülü (daN/cm2), elastisite modülü www.MatWeb.com sitesinden 3003-O Alüminyum alaşımı için 68,9 GPa olarak belirlenmiştir.

Il = Atalet momenti (mm4)

Dikdörtgen kesitli cisimlerin atalet momenti ;

$$I = \frac{B.H^3}{12} \tag{3.3}$$

Förmülü ile hesaplanır

I = Atalet momentini (mm4),

B = numune genişliğini (mm)

H = numune kalınlığını (mm)

Hesaplamalar sonucunda maksimum genlik f = 6,357 mm olarak hesaplanmıştır. Testin sonucunu etkilememesi için maksimum genlik 6 mm olarak seçilmiş, bu genlik dışında 4 ve 5 mm lik iki deney grubu daha belirlenmiştir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Deney Sonuçları

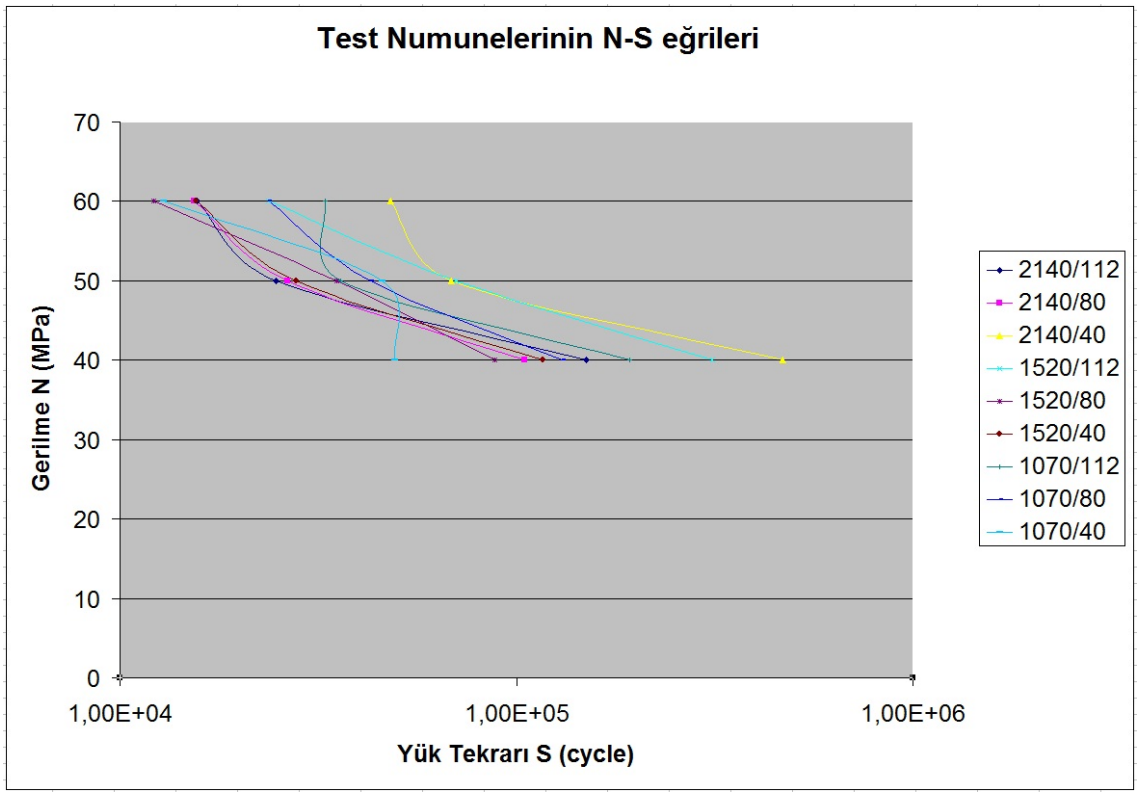
Farklı kaynak parametreleri ile kaynak edilen numunelerin yorulma deneyi sonuçları Tablo 4.1 de verilmiştir.

Tablo 4.1 Deney sonuçları

Kaynak Parametreleri Devir (rpm)/ İlerleme (mm/dak)	Deney Sonuçları (cycle)		
	Genlik (mm) / Gerilme (MPa)		
	4 / 40	5/ 50	6 / 60
2140/112	150324	24804	15636
2140/80	105138	26443	15413
2140/40	470639	68413	48155
1520/112	311956	70303	23725
1520/80	88123	35248	12160
1520/40	116413	27847	15565
1070/112	192466	36017	32905
1070/80	130433	42791	23693
1070/40	49220	45909	12894
Ana Malzeme	784247	133507	74257

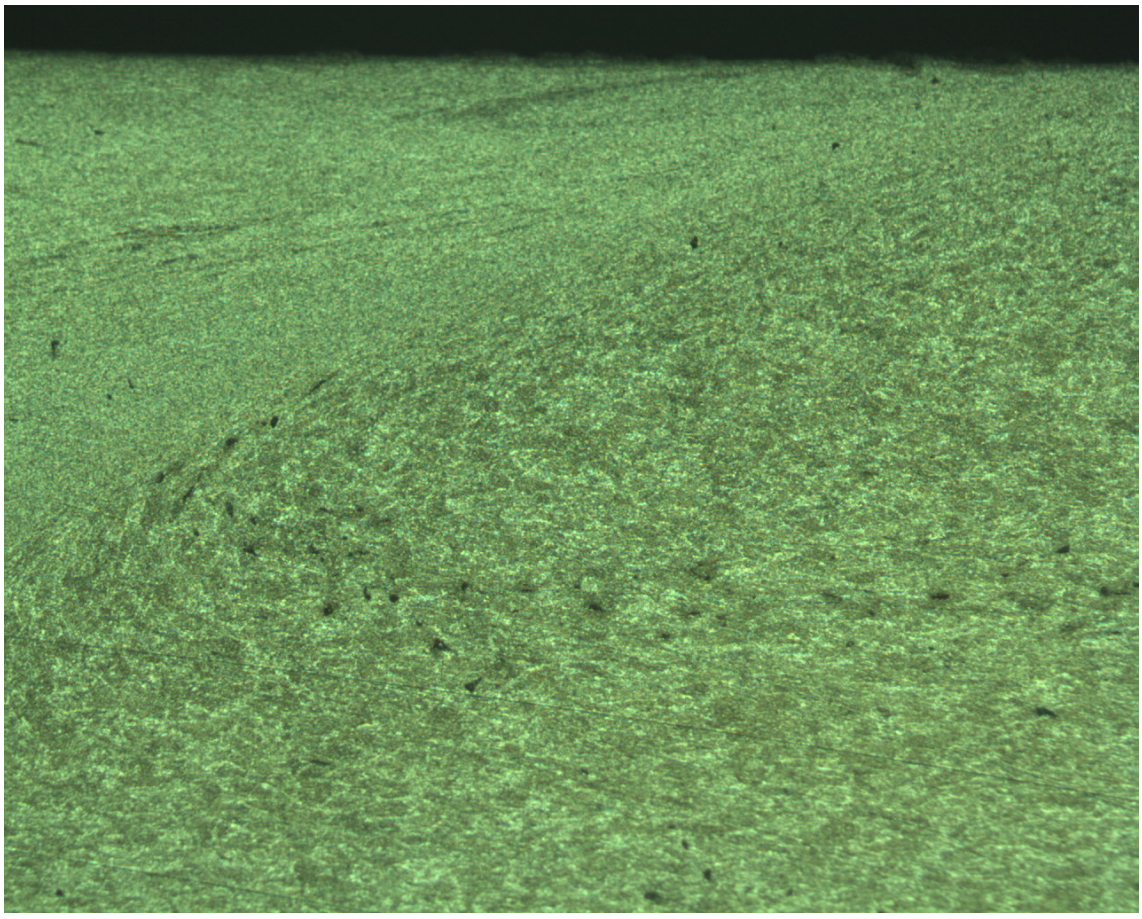
Elde edilen test sonuçlarına göre oluşturulmuş N-S eğrileri Şekil 4.1 de gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere en iyi ömür değerleri 2140 dev/dak takım dönme hızı ve 40 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynak numunelerinde elde edilmiştir. En kötü sonuçlar ise 1070 dev/dak takım dönme hızı ve 40 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir. Buradan hareketle aynı ilerleme hızında 2140 devirde 1070 e göre malzemelerin birbirleri içerisinde daha iyi karıştığı, 1070 devirde malzeme akışı için yeterli ısı açığa çıkmadığı için arada soğuk birleşmelerin olduğu düşünülebilir.

Şekil 4. Deney sonuçlarına göre oluşturulmuş N-S diyagramı

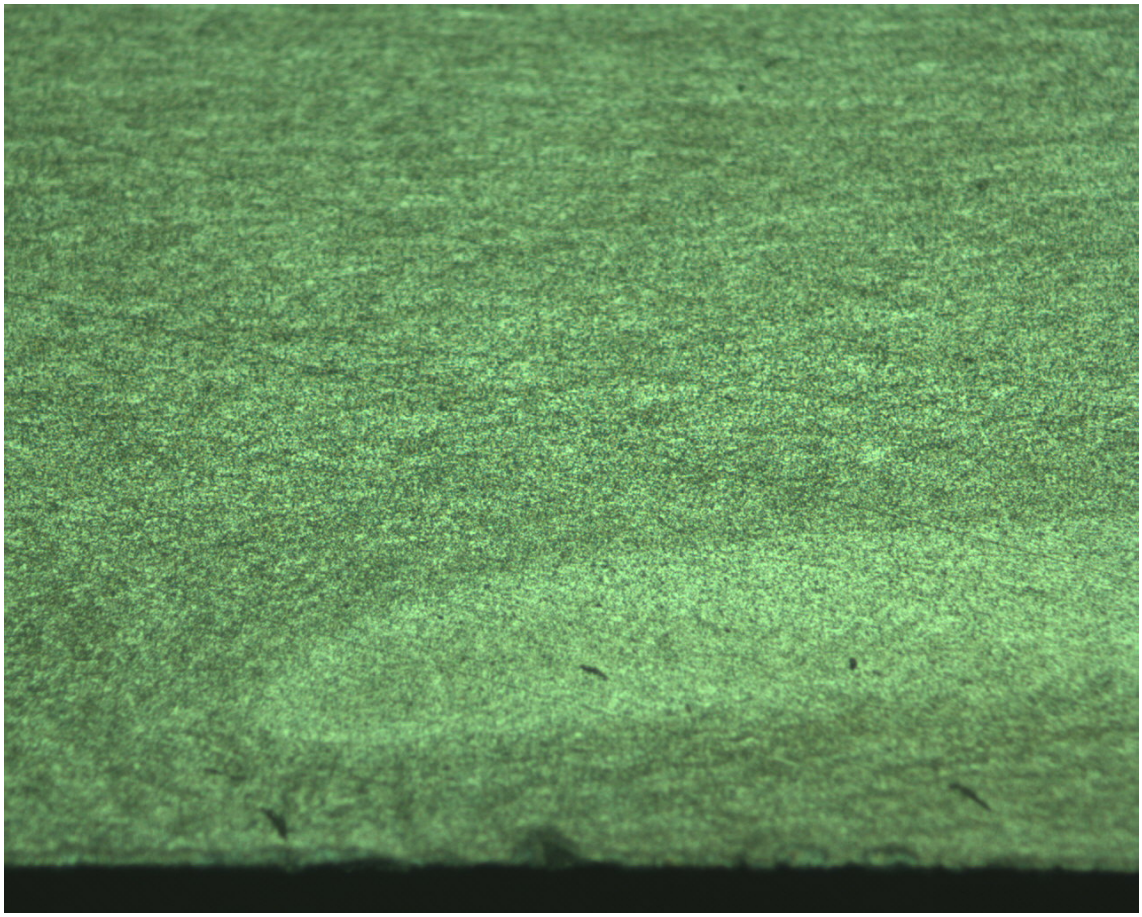


4.2. Malzeme İç Yapısının İncelenmesi

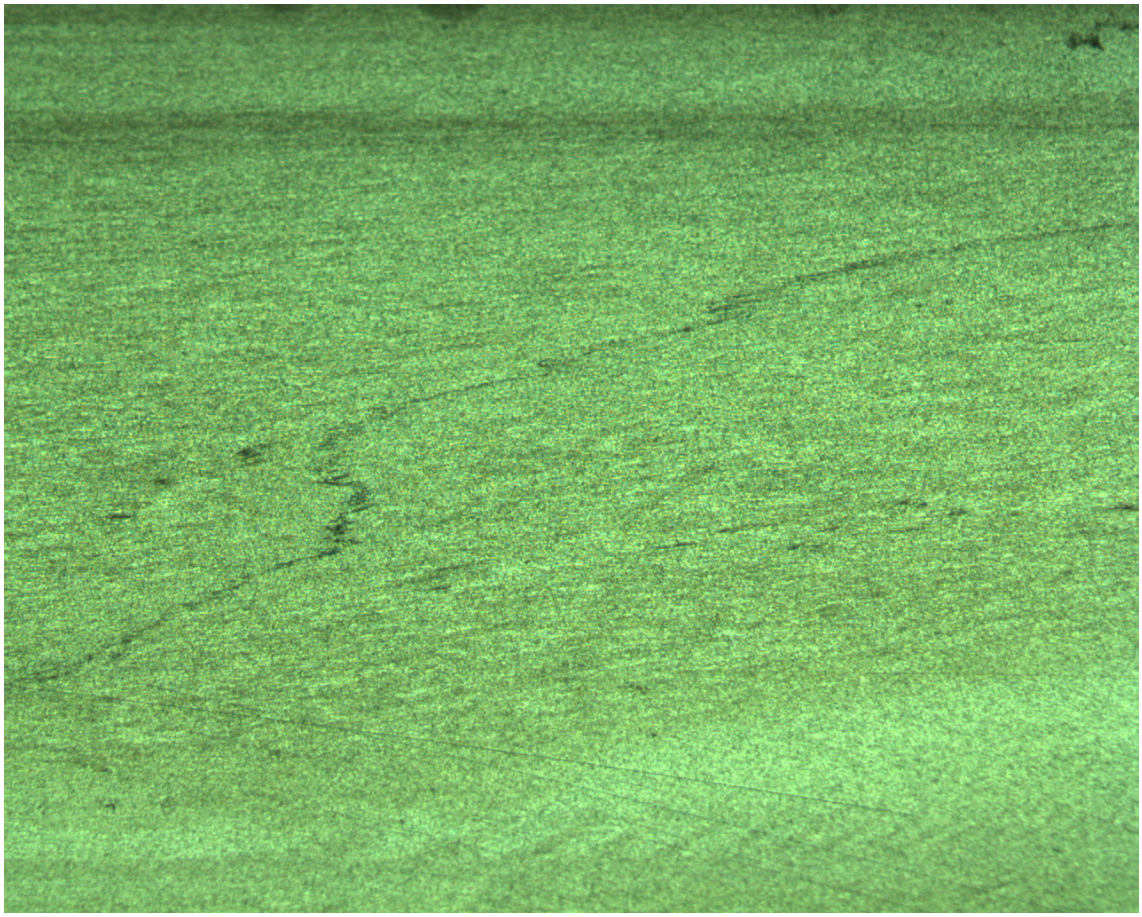
Farklı kaynak parametreleri ile üretilmiş numunelerin kaynak yönüne dik öncelikle iyice parlatılmış ardından uygun solüsyonla dağlanarak kaynak bölgesindeki farklı yapıların ışık mikroskobu altında görülebilmesi sağlanmıştır. Aşağıda çekilen kaynak bölgesine ait fotoğraflar gösterilmiştir.



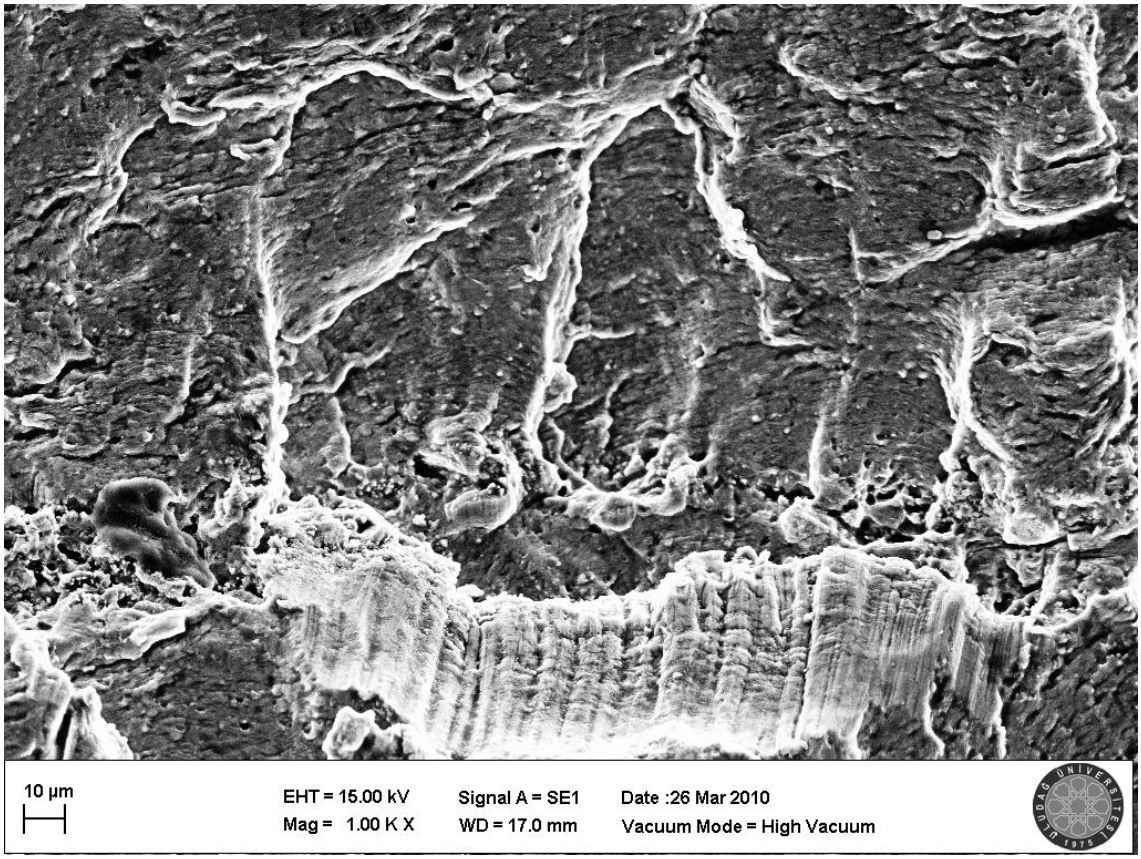
Şekil 4.1 2140 dev/dak devir hızı ve 40 mm/dak ilerleme hızında kaynak Yapılmış numunenin ilerleme bölgesinde iç yapı



Şekil 4.2 2140 dev/dak devir hızı ve 40 mm/dak ilerleme hızında kaynak
Yapılmış numunenin çekilme bölgesinde iç yapı



Şekil 4.3 1070 dev/dak devir hızı ve 40 mm/dak ilerleme hızında kaynak Yapılmış numunede zigzag oluşumu

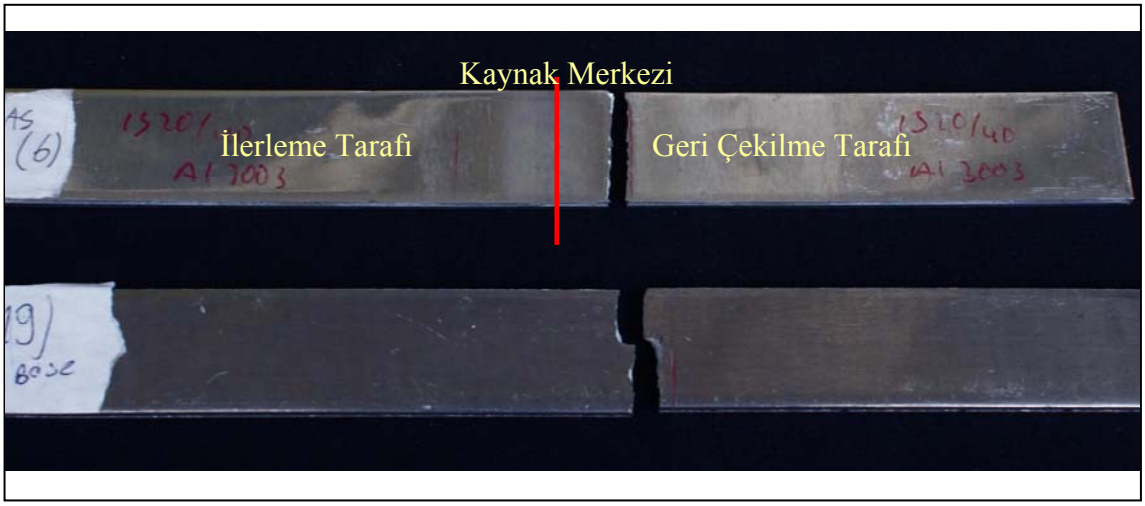


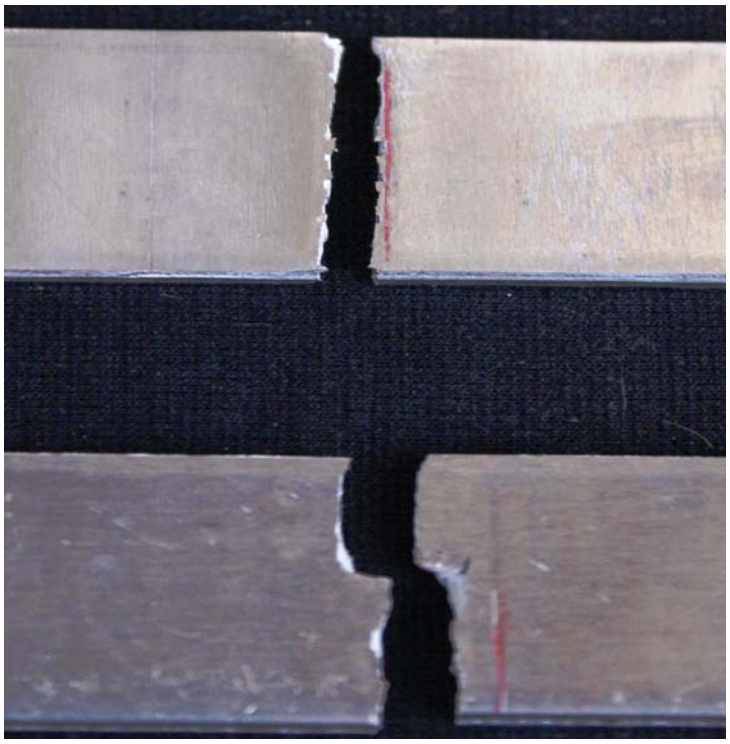
Şekil 4.4 2140 dev/dak devir hızı ve 40 mm/dak ilerleme hızında kaynağı Yapılmış numuneye ait x1000 büyütülmüş kırılma yüzey görüntüsü

4.3 Deney Sonuçlarının İncelenmesi

Elde edilen sonuçlar bize "Sürtünme Karıştırma Kaynağı" yönteminin 3003 serisi Alüminyum alaşımlarında kullanılabilirliği ve kaynak parametrelerinin yorulma üzerindeki etkisini incelemek açısından yeterli sayılabilir. Kopan numuneler Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde şu sonuçlara varılmıştır;

- Elde edilen sonuçlara göre kaynaklı bölgenin yorulma dayanımı ana malzemenin maksimum %64 ü kadar olduğu gözlenmiştir.
- Kaynaklı malzemede en yüksek yorulma dayanımının 2140 rpm takım dönme hızı ve 40 mm/dak ilerleme hızında olduğu görülmüştür.
- Numuneler incelendiğinde kopmaların "Geri Çekilme" tarafında ve ısıdan etkilenen bölge ile ana malzeme arasındaki sınırda olduğu gözlenmiştir. Kaynak bölgesinden kopmalar nadir olarak ta olsa görülmüştür.
- Elektron mikroskobu ile elde edilen görüntülerde kopma bölgelerinde oluşan yorulma çatlakları ve malzemenin kayma düzlemleri açıkça görülmüştür.
- Mikro yapı görüntülerinde "Isı Tesiri Altında ki Bölge" , "Termo-mekanik Olarak Etkilenmiş Bölge" ve "Kaynak Merkezi" görülmüştür. Bu bölgelerin tane boyutları arasındaki fark rahatlıkla gözlemlenmiştir. Bu saye de kırılma mekaniği daha kolay anlaşılabilmiştir.





Şekil 4.5 Kopan deney numuneleri

5. SONUÇ

Yapılan kaynaklar görüntü olarak diğer Alüminyum kaynak metodlarına göre daha düzgün olduğu görülmüştür. Kaynak dikişinin kenarlarında malzeme akışından oluşan Alüminyum talaşı çok kolay bir şekilde bertaraf edilebilir. Yüzeyde yanma ve ek malzemelerin oluşturacağı kademe farkı olmadığı için kaynak sonrası ek operasyon gerektirmez. Bu özelliğiyle özellikle gıda, otomotiv ve havacılık sanayi gibi sektörlerde kullanım açısından kendisine kullanım alanı bulmaktadır.

Yapılan yorulma testleri sonucunda kırılmaların ana malzemeden gerçekleştiği görülmüştür. Bu bize bu kaynak yönteminin yorulmaya maruz parçalarda yorulma karşısında dayanımının yeterli olduğu sonucunu göstermiştir.

Kaynak parametreleri açısından yapılan gözlemlerde ise şu sonuca varılmıştır. Aynı ilerleme hızında devir hızı arttığında malzeme daha çabuk yorulmuştur. Buna neden olarak artan devir hızının malzeme içerisindeki ısı miktarını arttırması ve buna bağlı olarak ısıdan etkilenen bölgenin genişlemesidir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar az gibi görünse de uzun ve yorucu geçen bir süreçte elde edilen sonuçlardır. Hiçbir kurumdan maddi destek alınmaksızın benzer tez konusu üzerinde çalışan meslektaşım ve dostum Tayfun Sayaca ile ortak olarak yorulma test cihazı tasarlanmış ve imal ettirilmiştir. Tayfun Sayaca ile ortak imalatımız olan yüksek frekanslı yorulma test cihazı tarafımızdan U.Ü.Müh.Mim.Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme ve Metalurji Laboratuarına kurulmuş ve ileriki zamanlarda eksenel yorulma konusunda çalışma yapacak arkadaşların kullanımına sunulmuştur.

Bu noktada ileriki çalışmalarla ilgili olarak bazı tavsiyelerim olacaktır.

- Deney süresinin kısaltılması aynı zamanda çok daha fazla test yapılmasına imkan sağlayacaktır. Bu sayede daha doğru sonuçlara ulaşılabilir. Bu amaçla test düzeneğinin rijitliği ve yüksek çalışma frekanslarında darbeleri sönümleme yeteneğinin arttırılması için ek olarak bağlantı ve gergi elemanları kullanılmalıdır.

KAYNAKLAR

ANIK, S., Vural, M., Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Birsen Yayınevi, İstanbul, (1993), 264.

ASTM E 8M -04 , Standart test methods for tension testing of metallic material, (2004), 2-3.

AY, İ., Kırılma mekaniği, Ders Notları, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri enstitüsü , Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir, (2005).

AYTAÇ, A., Çift fazlı çeliklerde tavlama sıcaklığı - yorulma davranışı ilişkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir, (2004).

BERG, D.E., Klimas, P.C., " Fatigue characterization of a wavt blade mateiral " Proceedings of the Eigth ASME Wind Energy Symposium , New Mexico, (1989), 19-23.

COLLIGAN, K., Ucok, I., McTernan, K., Konkol, P. J. and Pickens, J. R., Third International Symposium on Friction Stir Welding (Session 5), Kobe, Japan, 27-28 September -2001

ÇAM, G., 2003, Sürtünme karıştırma kaynağındaki gelişmeler, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı 24-25 Ekim, 47-64.

ÇAM, G., 2005, Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK): Al-alaşımları için geliştirilmiş yeni bir kaynak teknolojisi, Mühendis ve Makine Der. 46, Sayı 541, 30-39.

DEĞER, M., Perlitik-ferlitik ve küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanımı üzerine mikro yapı ve yüzey işlemlerinin etkisi" Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Ana Bilim Dalı, Konya, (1995).

ERTÜRK, İ., 1986, Gazaltı kaynak teknikleri, Ankara Sanayi Odası Dergisi, Sayı 77-79.

ERYÜREK, İ.B., Hasar analizi, Birsen Yayınevi, İstanbul, (1993), 75-79,117.

HATTINGH, D. G., 2006, Welding and not, The South African Mechanical Engineer 56, 16-17.

ISO 7438:2005(E), Metallic materials - Bend test, (2005), 1-5.

KAYALI, E.S., Ensari, C., Dikeç, E., Metalik malzemelerin mekanik deneyleri, İstanbul Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul, (1983), 143-169.

KHALED, T., 2005, An outsider looks at friction stir welding, Federal Aviation Administration, ANM-112N-05-06, 71 p.

KURT, A., Boz, M. ve Özdemir, M., 2004, Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak hızının birleşebilirliğe etkisi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. 19, 2, 191-197.

KÜLEKÇİ, M.K. ve Şık, A., 2003, Sürtünme karıştırma kaynağı ile Alüminyum alaşımı levhaların birleştirilmesi ve elde edilen kaynaklı bağlantıların özellikleri, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı, 34-44.

MARZOLI, L. M., Strombeck, A.V., Dos Santos, J. F., Gambaro, C. and Volpone, L.M., 2006, Friction stir welding of an AA6061/Al2O3/20p reinforced alloy, Composites Science and Technology 66, 363–371.

MERT, S. ve Kaluç, E., 2003, Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takımlardaki gelişmeler", Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı 24-25 Ekim, 103-115.

MISHRA, R. S. and Ma, Z. Y., 2005, Friction stir welding and processing, Materials Science and Engineering R 50, 1-78.

NICHOLAS, E. D. and Kallee, S. W., 2000, Friction stir welding - a decade on, IIW Asian Pasific International Congress, Sydney, 12 s.

PAEPEGEM W.V., Degrieck, J., "Experimental set-up for and numerical modelling of bending fatigue experiments on plain woven glass/epoxy composites", *Composite Structures,* 51, (2001), 1-8

ROWLEY P.N., "Section 3 - Dinamics and fatigue", AMSET Wind Energy Trainin Course , Monfort Üniversity, (1996), 1-5.

SAKİN, R., Bilgisayar destekli , çok numuneli eğilme yorulması test cihazı tasarımı ve cam-fiber takviyeli polyester kompozitlerde eğilme yorulması davranışının incelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri enstitüsü , Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir, (2004).

SERFİÇELİ, Y., S., Malzeme bilgisi, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul, (2000), 181-186.

SERİNDAĞ, H. T., 2006, Pirinç levhaların sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle alın kaynağı ve mekanik özelliklerin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Mustafa Kemal Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, 55 s. (yayımlanmamış).

SMITH, W. F., 2001, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, (Çev. N. G. Kınıkoğlu), Literatür Yayıncılık, 855 s.

SMITH, W.F., Malzeme bilimi ve mühendisliği, Kınıkoğlu, N.G., Literatür yayınları, İstanbul, (2001), 290-294,499-503.

SRIVATSAN, T.S., " Mechanisms governin cyclic deformation and failure during elevated temperature fatigue of aluminum alloy 7055 ", *International Journal of Fatigue,21,* (1999), 557-569.

SRIVATSAN, T.S., Anand, S., Sriram, S., Vasudevan, V.K., "The high-cycle fatigue and farcture behavior of aluminum alloy 7055", *Materials Science and Engineering,* A281, (2000), 292-304.

SRIVATSAN, T., S., Kolar, D., Magnusen, P., "The cyclic fatigue and final fracture behavior of aluminum alloy 2524", Materials and Desing, 23, (2002), 129-139

SOBCZYK, K., Trebicki, J., "Fatigue crack growth in random residual stresses" İnternational Journal of Fatigue , 26, (2004), 1179-1187.

ŞIK, A., 2005, Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen alimünyum levhaların eğme ve yorulma özelliklerinin incelenmesi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Der. 9, 2, 12-17.

ŞIK, A. ve Kayabaş, Ö., 2003, Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan alüminyumun kaynağında kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin incelenmesi, Gazi Üniv. Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fak. Der. 11, 12, 30-43.

TS EN 485-2, Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri, (2005), 2-3.

WWW.makinamuhendisi.com, "Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının standart gösterimleri",(2004).

WWW.MatWeb.com, "3003 Series aluminum , aluminum alloy, nonferrous metal", (2010)

ÖZGEÇMİŞ

Murat Tahir Yıldırım 1978 yılında Elazığ da doğmuş, ilköğretimine Kocaeli Karamürsel ilçesinde başladıktan sonra Bursa Dörtçelik ilkokulunda tamamlamıştır. Ortaöğretimine Bursa Çelebi Mehmet Lisesinde devam etmiş, akabinde aynı lisenin yabancı dil ağırlıklı bölümünden 1996 yılında mezun olmuştur. 1997 yılında U.Ü.Müh.Mim.Fak. Makine Mühendisliği bölümüne girmiş, 2001 yılında aynı üniversiteden lisans derecesi ile mezun olmuştur. Aynı yıl içerisinde U.Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Programına Başlamıştır.

2003 yılında askerlik hizmetini yerine getirmek amacıyla öğrenimine ara vermiştir. Bu süre içerisinde çeşitli özel sektör firmalarında özellikle Otomotiv sektöründe çalışmış ve halende sektöründe lider bir firmada çalışmaktadır.

TEŞEKKÜR

Başta test cihazı yapımı ve numunelerin hazırlanmasında birlikte çalıştığım yakın dostum ve meslektaşım Tayfun Sayaca'ya olmak üzere, tez danışmanım U.Ü.Müh.Mim Fakültesi Öğretim Üyesi Prof.Dr. Ali Bayram, U.Ü.Müh.Mim.Fakültesi Makine Müh. Bölümü Araştırma Görevlisi Hakan Aydın'a sürtünme karıştırma kaynaklarının yapılmasında büyük desteğini aldığım Makine Mühendisliği Makine Laboratuarı ve U.Ü.Meslek Yüksek Okulu Makine Laboratuarı çalışan ve sorumlularına. Yorulma cihazı tasarımı ve imalatını yapanı M.K.T firması sahipleri Cemal ve Celal Tunaoğlu'na teşekkür ederim.