

AA 6082 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ YORULMA DAVRANIŞI ÜZERİNE
TEMPER DURUMUNUN ETKİSİ

EMRE DORUK

OCAK 2015

THE EFFECT OF TEMPER CONDITION ON FATIGUE BEHAVIOUR OF AA
6082 ALUMINIUM ALLOY

EMRE DORUK

JANUARY 2015

AA 6082 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ YORULMA DAVRANIŞI ÜZERİNE
TEMPER DURUMUNUN ETKİSİ

EMRE DORUK

ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALINDA
YÜKSEK LİSANS
DERECESİ İÇİN GEREKLİ ÇALIŞMALARI YERİNE GETİREREK
ONAYA SUNULAN TEZ

OCAK 2015

THE EFFECT OF TEMPER CONDITION ON FATIGUE BEHAVIOUR OF AA
6082 ALUMINIUM ALLOY

by

EMRE DORUK

THESIS SUBMITTED TO

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES OF

THE ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY

IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE

OF

MASTER OF SCIENCE IN

THE DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

JANUARY 2015

Fen Bilimleri Enstitüsü'nün Onayı

Prof. Dr. Duran Karakaş

Enstitü Müdürü

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinde bir tez olarak gerekli çalışmaları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Ali Naci Çelik

Bölüm Başkanı

Okuduğumuz bu tezin Yüksek Lisans derecesinde bir tez olarak onaylanması, düşüncemize göre, amaç ve kalite olarak tamamen uygundur.

Doç. Dr. Murat Pakdil

Tez Danışmanı

Ortak Tez Danışmanı

Jüri Üyeleri

1- Prof. Dr. Gürel Çam -----

2- Doç. Dr. Murat Pakdil -----

3- Yrd. Doç. Sabri Öztürk -----

Approval of the Graduate School of Natural And Applied Sciences

Prof. Dr. Duran Karakaş

Director

I certify that this thesis satisfies all the requirements as a thesis for the degree of Master of Science.

Prof. Dr. Ali Naci Çelik

Head of Department

This is to certify that we have read this thesis and that in our opinion it is fully adequate, in scope and quality, as a thesis for the degree of Master of Science.

Assoc. Prof. Murat Pakdil

Co-Supervisor

Supervisor

Examining Committee Members

1- Prof. Dr. Gürel Çam -----

2- Assoc. Prof. Murat Pakdil -----

3- Asst. Prof. Sabri Öztürk -----

ÖZET

AA 6082 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ YORULMA DAVRANIŞI ÜZERİNE TEMPER DURUMUNUN ETKİSİ

Doruk, Emre

Yüksek Lisans, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışman: Doç. Dr. Murat Pakdil

Ocak 2015, 80 sayfa

Bu tez çalışmasında, alüminyum 6xxx serisinde yer alan AA 6082 sac malzemenin yaşlandırma ısı işlemi yapılmış ve çözeltiye alma tavlama yapılmış halde yorulma testine tabi tutulması ve sonuçların karşılaştırılması ele alınmıştır. Bu sayede, alaşıma uygulanan farklı ısı işlem şartlarının yorulma özellikleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yaşlandırma sertleştirilmesi yapılmış numunelere uygulanan çözeltiye alma tavlama işleminin mikro yapı üzerine etkileri SEM’de görüntülenmiş ve yorumlanmıştır. Çalışma sonucunda, uygulanan çözeltiye alma tavlamanın yorulma ömrüne etkisi yapılan testler sonucunda ortaya konulmuş ve temper durumunun yorulma ömrünü etkilediği kesin olarak görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: AA 6xxx serisi, ısı işlem, yorulma

ABSTRACT

THE EFFECT OF TEMPER CONDITION ON FATIGUE BEHAVIOUR OF AA 6082 ALUMINIUM ALLOY

Doruk, Emre

Master of Science, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Associate Prof. Dr. Murat Pakdil

January 2015, 80 pages

In this study, the AA 6082 (6xxx series) sheet material was subjected to fatigue testing in age hardened and annealed conditions and the results obtained were compared. Thus, the effect of different temper condition on fatigue properties of the alloy was investigated. The influence of temper condition on the microstructure was investigated by employing SEM and then discussed. As a result, the effect of the temper condition on fatigue life was evaluated by conducting fatigue tests and it was well demonstrated that the temper condition affected the fatigue life.

Keywords: AA 6xxx series, heat treatment, fatigue

TEŞEKKÜR

Tez danışmanım sayın Doç. Dr. Murat Pakdil'e araştırma boyunca anlayış ve rehberliği için en derin teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Arş. Gör. Mehmet Fatih Kahraman ve Arş. Gör. Habibullah Bilge'ye de araştırma boyunca yaptıkları katkılardan dolayı teşekkür ederim. Tüm eğitim hayatım boyunca yardımlarını benden esirgemeyen aileme ve tez çalışması boyunca beni cesaretlendiren ve destekleyen eşim Tuğba Doruk'a teşekkürlerimi sunarım.

ACKNOWLEDGMENTS

I express sincere appreciation to Associate Profesör Murat Pakdil for his guidance and insight throughout the research. I also express sincere appreciation to Research Assistant Mehmet Fatih Kahraman and Research Assistant Habibullah Bilge for their contribution throughout the research. I am also grateful to my family who has supported me throughout my education. My sincere thanks are for my wife, Tuğba Doruk, for her encouragement and support in every step of our life together.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ACKNOWLEDGMENTS.....	vii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI.....	4
2.1. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	5
2.1.1. Dövme Alüminyum Alaşımlar.....	6
2.1.1.1. 1xxx serisi (Saf) alüminyum.....	8
2.1.1.2. 2xxx serisi (Al-Cu) alaşımları.....	8
2.1.1.3. 3xxx serisi (Al-Mn) alaşımları.....	9
2.1.1.4. 4xxx serisi (Al-Si) alaşımları.....	9
2.1.1.5. 5xxx serisi (Al-Mg) alaşımları.....	9
2.1.1.6. 6xxx serisi (Al-Mg-Si) alaşımları.....	10
2.1.1.7. 7xxx serisi (Al-Zn) alaşımları.....	10
2.1.1.8. 8xxx serisi (Al-Li) alaşımları.....	11
2.1.2. Döküm Alüminyum Alaşımlar.....	11
2.1.3. AA 6082 Alüminyum Alaşımları.....	12
3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARIN ISIL İŞLEM MEKANİZMALARI.....	14
3.1. Alüminyum Alaşımların Isıl İşlemi.....	15
3.1.1. Homojenizasyon İşlemi.....	17
3.1.2. Tavlama İşlemi.....	18
3.1.3. Gerilim Giderme Tavlaması.....	19
3.2. Çökeltme Sertleşmesi Isıl İşlemi.....	19

	Sayfa
3.2.1. Çözeltiye Alma İşlemi.....	20
3.2.1.1. Önceden belirlenen bir sıcaklığa kadar ısıtma..	22
3.2.1.2. Belirli bir süre bekletme.....	23
3.2.1.3. Su verme.....	23
3.2.1.4. Suni (yapay) yaşlandırma.....	24
3.2.2. Çökeltme Sertleşmesi ile Mekanik Özelliklerde	
Meydana Gelen Değişim.....	26
4. YORULMA.....	28
4.1. Malzemelerde Yorulma Olayı.....	30
4.1.1. Alüminyum Alaşımlarının Yorulma Özellikleri.....	31
4.2. Yorulma Mukavemetine Etki Eden Faktörler.....	33
4.2.1. Sıcaklık.....	33
4.2.2. Parçanın Yüzey İşleme Kalitesi.....	34
4.2.3. Gerilme Türü.....	34
4.2.4. Korozyon.....	34
4.2.5. Çentik Etkisi.....	35
4.2.6. Malzemenin İçyapısı.....	35
4.3. Yorulma Testleri.....	36
4.4. Yorulma Testlerinde Kullanılan Cihazlar.....	40
5. MALZEME VE METOT.....	42
5.1. Malzeme.....	42
5.2. Yorulma Test Numunelerinin Hazırlanması.....	43
5.3. Isıl İşlem Uygulamadan Yapılan Yorulma Testleri.....	45
5.4. Uygulanan Isıl İşlemler (Çözeltiye Alma Tavı).....	47
5.5. Çözeltiye Alma Tavlama Sonrasında Yapılan Yorulma	
Testleri.....	49
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	52
6.1. Yorulma Test Sonuçları.....	52

	Sayfa
6.2. SEM İncelemeleri.....	53
6.3. Sertlik Değişimi.....	56
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	58
KAYNAKLAR.....	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE	Sayfa
2.1. Saf alüminyumun özellikleri.....	4
2.2. Dövme alüminyum alaşımlarının gösterimi (alaşım bilgileri ve yaşlandırma kabiliyetleri).....	7
2.3. Alüminyum döküm alaşımlarının ticari sınıflandırması.....	12
2.4. Ticari AA 6082 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi.....	12
2.5. AA 6082 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri.....	13
3.1. Alüminyum alaşımlarında temper kodlaması.....	14
3.2. 6xxx serisi homojenizasyon şartları.....	17
5.1. AA 6082 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri (T6 ve çözeltiye alma tavlaması sonrasında).....	43
5.2. Isıl işlem uygulanmadan yapılan yorulma test sonuçları.....	47
5.3. Çözeltiye alma tavlaması sonrasında yapılan yorulma test sonuçları.....	51

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL	Sayfa
3.1. Alüminyum alaşımlarının ısıt işlemlerinin esası.....	16
3.2. Alüminyum billet (ingot).....	17
3.3. Alüminyum alaşımlarda çökelme sertleşmesi mekanizması.....	20
3.4. Çözeltiye alma işlemi.....	21
3.5. Denge diyagramında solüsyona alma sıcaklığının belirlenmesi....	22
3.6. Yaşlanma aşamalarının gösterimi.....	25
3.7. Al-Cu alaşımında yaşlanma esnasında oluşan çökelti fazının kademeleri.....	26
4.1. Yorulma sonucu malzemede meydana gelen kopma.....	28
4.2. Çatlak oluşumu ve ilerlemesi.....	30
4.3. Malzemelerde yorulma olayı.....	31
4.4. Bir alüminyum çubuğun çatlaması.....	32
4.5. Herhangi iki malzemeye ait Wöhler diyagramı a) Demir ve alaşımları, b) Demir dışı metal ve alaşımları için.....	37
4.6. Smith diyagramı.....	38
4.7. Gerber parabolü, Goodman ve Soderberg doğrusu.....	39
4.8. INSTRON 8801 (100 kN kapasiteli) servo-hidrolik yorulma test cihazı.....	41
5.1. Sac plakadan su jeti ile kesim ile numunelerin elde edilmesi.....	44
5.2. Yorulma Test Numunesi ve Ölçüleri.....	44
5.3. Periyodik yükleme.....	45
5.4. Yükleme profili.....	45
5.5. Wöhler (S-N) diyagramı-Isıl işlem uygulanmadan.....	47
5.6. Protherm PLF 130/25 kamara ısıt işlem fırını.....	48
5.7. Numunelere uygulanan ısıt işlemler.....	49
5.8. Wöhler (S-N) diyagramı-Isıl işlem uygulanarak.....	51

ŞEKİL	Sayfa
6.1. T6 ve çözeltiye alma tavlaması yapılmış yorulma ömürleri.....	52
6.2. SEM öncesi numune hazırlama işlemi.....	54
6.3. T6 ve çözeltiye alma tavlaması yapılmış optik mikroskop görüntüleri.....	55
6.4. (a) T6 SEM görüntüleri (10 μm), (b) çözeltiye alma tavlaması yapılmış SEM görüntüleri (10 μm), (c) T6 SEM görüntüleri (50 μm), (d) çözeltiye alma tavlaması yapılmış SEM görüntüleri (50 μm).....	56
6.5. Numunelerin sertlik ölçümleri.....	57

1. GİRİŞ

Alüminyum gümüş renkte sünek bir metaldir. Doğada genellikle boksit cevheri halinde bulunur ve oksidasyona karşı üstün direnci ile tanınır. Endüstrinin pek çok kolunda milyonlarca farklı ürünün yapımında kullanılmakta olup dünya ekonomisi içinde çok önemli bir yeri vardır. Günümüzde imalat sektöründe bakır ve bakır alaşımları, kurşun, kalay ve çinko gibi diğer demir dışı metallerin toplamından daha fazla kullanılmaktadır [1, 2, 22].

Alüminyum, yumuşak ve hafif bir metal olup mat gümüşümsü renktedir. Bu renk, havaya maruz kaldığında üzerinde oluşan ince oksit tabakasından ileri gelir. Alüminyum, zehirleyici ve manyetik değildir. Kıvılcım çıkarmaz. Saf alüminyumun çekme dayanımı yaklaşık 49 MPa iken alaşımlandırıldığında bu değer 700 MPa'ya kadar çıkartılabilir. Yoğunluğu, çeliğin veya bakırın yaklaşık üçte biri kadardır. Kolaylıkla dövülebilir, makinede işlenebilir ve dökülebilir. Çok üstün korozyon özelliklerine sahip olması, üzerinde oluşan oksit tabakasının koruyucu olmasındandır. Elektrik iletkenliği % 64,94'dür (saf Al, 2 °C'de). Bu özellikleri nedeniyle uzay ve havacılık, uçak, otomotiv, silah, inşaat, eşya, ısıtma-soğutma gibi sektörlerde tercih edilmektedir [1, 3, 4, 5]. Alüminyumun bu avantajları onu endüstriyel kullanımda demir esaslı malzemelerle yarışır hale getirmiştir. Alüminyum kolay soğuyup ısıyı emen bir metal olması nedeniyle soğutma sanayinde geniş bir yer bulur. Bakırdan

daha ucuz olması ve daha çok bulunması, işlenmesinin kolay olması ve yumuşak olması nedeniyle birçok sektörde kullanılan bir metaldir [1, 6, 22].

Alüminyum genel manada soğutucu yapımında, spot ışıklarda, mutfak gereçleri yapımında, hafiflik esas olan araçların yapımında (uçak, bisiklet, otomobil motorları, motosikletler vb.) kullanılır.

Bu alaşımların kullanıldıkları sektörlerde (uçak, otomotiv, enerji santralleri vb.) çalışma sırasında çoğunlukla tekrarlı gerilmelere maruz kaldıkları bilinmektedir [7, 8, 22].

Çalışma şartları olarak tekrarlı yüklere maruz kalan metalik malzemelerde, uygulanan yükler malzemenin akma dayanımından düşük olsa dahi, belirli bir tekrar periyodu sonunda parça yüzeyinde bir çatlama ve bunu takip eden kopma olayı meydana gelebilir. Yorulma kırılması olarak tanımlanan bu olay gevrek karakterli olduğu için nerede ve ne zaman olacağını kestirmek zordur. Yorulma kırılmaları, parça içerisindeki hesaplanan gerilmeler elastik bölge içinde kalmasına rağmen meydana gelebilmektedir. Ancak bu olay genellikle düzensiz bir gerilme dağılımı var iken görülür. Yorulma kırılması olayının sıklıkla görüldüğü parçalara örnek olarak miller, bağlantı çubukları ve dişli çarklar gibi hareketli parçalar verilebilir. Makinelerdeki kopmaların yaklaşık % 80'inin yorulma kopmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir [1, 7, 23].

Yorulma olayı, uyarı vermeden elastik bölgenin altındaki gerilmelerde malzemenin ani olarak kopması nedeniyle tehlikelidir. Bu tip gevrek kırılma

olaylarına elik köprülerde, kötü yol Şartlarında kullanılan arabalarda ve uçak kanatlarında rastlanabilir. Bu nedenle çok sıkı nlem alınmalıdır. Malzemelerin yorulma özelliklerinin belirlenmesinde genellikle S–N diyagramları (Wöhler eğrileri) kullanılmaktadır [2, 23].

Bu alıŐmada; AA 6082 alüminyum alaşımının yorulma davranışı ısııl işlem uygulanmadan ve uygulanarak incelenmiştir. Bu sayede, alaşıma uygulanan farklı ısııl işlem Şartlarının yorulma özellikleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yorulma testlerinde INSTRON 8801 servo-hidrolik yorulma test cihazı kullanılmıştır. Numunelerin ısııl işlemleri ise Protherm PLF 130/25 kamara fırınında gerçekleştirilmiştir.

2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

Alüminyum doğada boksit halinde bulunur. Boksit yataklarından çıkarılan alüminyum işlenerek saf olarak üretilmektedir. Çizelge 2.1’ de saf alüminyumun özellikleri verilmektedir. Diğer metallerin katılması ile yoğunluğu önemli ölçüde değişmemekle birlikte, mukavemeti önemli ölçüde artmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı alüminyum mukavemetinin ağırlığına oranı çok yüksektir ve bu onun en önemli özelliğidir [24]. Doğada en çok bulunan alüminyum bileşikler feldspatlar, mikalar ve killerdir. Alüminyumun, üretimde kullanılan en önemli filizi, boksit ($Al_2O_3 \cdot H_2O$)’ tir [9]. Boksitin içinde, alüminyum oksit ile birlikte silis, demir oksit ve bazı elementler bulunur [1].

Çizelge 2.1. Saf alüminyumun özellikleri [9, 24]

Atom numarası	13
Atom ağırlığı	26,98 g/mol
Kafes yapısı	Yüzey Merkezli Kübik (YMK)
Yoğunluğu (20 °C’de)	2,7gr/cm ³
Ergime sıcaklığı	660,2 °C
Yeniden kristalleşme sıcaklığı	150–300 °C
Buharlaşma noktası	2450 °C
Özgül ısı	0,224 cal/gr (100 °C)
Elastisite modülü, E	70 x 10 ³ MPa
Kayma modülü, G	26 x 10 ³ MPa
Çekme mukavemeti	40–90 MPa
Akma mukavemeti	10–30 MPa
Kopma uzaması	% 30–40
Isı iletkenliği, λ	0,55 cal/cm.s. °C

Alüminyum ve alaşımlarının bu kadar geniş bir kullanım alanına sahip olmasının nedenlerini şu şekilde sıralayabiliriz [25]:

- Alüminyum doğal, yenilenebilir enerji ile üretilebilirken, aynı zamanda geri dönüşüm ile tekrar geri kazanılabilir. Alüminyum, hammaddeden üretim için gerekli enerjinin sadece %5'i kadar bir enerji ile tekrar ergitilebilir ve yepyeni ürünler için kullanılabilir. Konstrüksiyon parçalarının %70'i, işlem ve işleme hurdalarının %100'ü tekrar geri kazanılabilir.
- Alüminyumun hammaddesi Boksitin tüketim ve geri kazanım döngüsü içerisinde insanoğlunun mevcudiyeti boyunca var olacağı düşünülmektedir.
- Alüminyum hammaddesi olan boksit madenciliğinin %12'si yağmur ormanlarında yapılmakta, madencilik sonrası bu alanların %80'i doğal ormanlara dönüşmektedir. Bu durum ekolojik dengenin kurulmasına olanak sağlamaktadır.
- Yüksek ısı iletkenliğinin yanı sıra, parlama ve alev almazlık özelliğine sahiptir.
- Kolay şekillendirilebilir, farklı yöntemlerle yüzey işlenebilme özelliğine sahiptir.

2.1. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımlar, üretim yöntemlerine göre sınıflandırılabilir. Alüminyum alaşımlar üretim yöntemlerine göre dövme ve döküm alüminyum alaşımları olarak iki ana grupta incelenebilir. Plastik deformasyon ile şekillendirilen dövme alüminyum alaşımlarının mikro yapısı ve kimyasal

içeriği döküm alaşımlarına göre oldukça farklıdır. Her ana grup içindeki alaşımlar, ısıtılabilir ve ısıtılmaz alaşımlar olmak üzere, iki alt grupta incelenmektedir. Saf alüminyuma katılan en yaygın alaşım elementleri; magnezyum, silisyum, bakır, çinko, kurşun ve nikeldir [1, 11, 26].

2.1.1. Dövme Alüminyum Alaşımları

Dövme alüminyum alaşımları içinde bulundurdıkları alaşım elementinin kimyasal kompozisyonundaki ağırlığına göre isimlendirilir. Amerikan alüminyum birliğinin koyduğu standartlara göre, alüminyum dövme alaşımları dört harfle sembolize edilmektedir. Çizelge 2.2' de dövme alüminyum alaşımlarının gösterimi verilmektedir.

Farklı serilerdeki alüminyum alaşımların ısıtılabilir mekanizmalarına bakıldığında 1xxx, 3xxx ve 5xxx serileri ısıtılabilir uygulanmasına elverişli değildir. 2xxx, 6xxx, 7xxx ve 8xxx serileri ise ısıtılabilir uygulanmasına elverişlidir. 4xxx serisi alaşımlarının ısıtılabilirliği magnezyum elementine bağlıdır. Eğer kimyasal kompozisyonunda magnezyum varsa ısıtılabilir uygulanabilir. Magnezyum eklenmezse ısıtılabilirliği ortadan kalkar. ısıtılabilir uygulanabilen serilerde, en yüksek mekanik özellikler çözeltiye alma ısıtılabilir işlemi ile elde edilir. ısıtılabilir uygulanamayan alaşımlar ise en yüksek mekanik özelliklerini, soğuk şekil değiştirme işlemi ile kazanmaktadırlar.

Çizelge 2.2. Dövme alüminyum alaşımlarının gösterimi (alaşım bilgileri ve yaşlandırma kabiliyetleri) [25]

Dövme Alüminyum Alaşımları		
1xxx	Saf alüminyum	Yaşlandırılmaz
2xxx	Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3xxx	Al-Mn	Yaşlandırılmaz
4xxx	Si ve Cu veya Mg ana alaşım elementidir	Eğer Mg varsa Yaşlandırılabilir
5xxx	Al-Mg	Yaşlandırılmaz
6xxx	Al-Mg-Si	Yaşlandırılabilir
7xxx	Al-Zn	Yaşlandırılabilir
8xxx	Al-Li	Yaşlandırılabilir

Alüminyuma ilave edilen alaşım elementlerinin mukavemeti artırma mekanizması iki şekilde gerçekleşir:

- Katı eriyik olarak çözünürler ve deformasyon ile sertlik arttırılır. (deformasyon sertleşmesi sonucunda oluşan alaşımlar)
 - Yüksek sıcaklıkta katı eriyik çözünüp ve düşük sıcaklıkta ince parçacık halinde çökelirler (yaşlanma sonucunda mukavemeti artan alaşımlar)
- [11].

2.1.1.1. 1xxx (Saf) alüminyum

1xxx serisi ticari olarak saf alüminyumunu ifade eder ve en az % 99 alüminyum içerir. Bu malzemelerin, şekillendirilmesi, elektrik iletkenlikleri ve korozyon dirençleri oldukça yüksektir. 1xxx serisinin son iki rakam ise, % 99 değerinden sonraki kısmı belirlemede kullanılır. Örneğin 1100 malzemesinin % 99.00 oranında, 1050 malzemesinin % 99.50 oranında ve 1060 malzemesinin ise % 99.60 oranında saf alüminyum içerdiğini belirtir [27]. Kimya ve elektrik-elektronik endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir.

2.1.1.2. 2xxx serisi (Al-Cu) alaşımları

2xxx serisi alüminyum alaşımlarının temel elemanı bakırdır. En iyi mekanik davranışı çökelme sertleşmesi ısı işlemleri ile almaktadır. İyi işleme özelliklerinin gerektiği yerlerde, bağıl olarak artan sıcaklıklarda, sürünme dayanımının fazla olmasıyla birlikte oda sıcaklığında yüksek çekme mukavemetine ve çok düşük sıcaklıklarda yüksek dayanıma sahip olması istenen yerlerde, yaygın olarak kullanılmaktadır. Korozyona karşı direnci, diğer alaşım grupları kadar yüksek değildir ve kaynak edilebilme kabiliyeti sınırlıdır. Çoğunlukla araçların ve uçakların tekerlerinde, araçların süspansiyon parçalarında, uçak gövdelerinde ve 150 °C' ye kadar olan sıcaklıklara dayanım gerektiren parçaların üretiminde kullanılır [7].

2.1.1.3. 3xxx serisi (Al-Mn) alaşımları

Alüminyum 3xxx serisinin en önemli alaşım elementi manganezdır. Bu serideki, 3003, 3004 ve 3105 alaşımlarının, korozyon direnci ve işlenebilirliğı yüksektir. 3xxx serisi alaşımlar, çeşitli konstrüksiyonlar, çatı sistemleri ve çatı kaplamaları gibi mimari alanlarda kullanılır [26].

2.1.1.4. 4xxx serisi (Al-Si) alaşımları

Alüminyum 4XXX serisindeki alaşımlara, silisyum ilave edilerek, kaynak ve lehimleme işlemlerinde ergime noktası düşürölmekte, böylece alaşımın kaynak ve lehimleme kabiliyeti iyileştirilmektedir. Silisyumun alaşımın akıcılık özelliğini arttırması nedeni ile özellikle döküm teknolojisinde, geometrisi karmaşık şekillerin üretilmesine imkan vermektedir. Kaynaklı yapılarda, levha üretiminde, otomobil parçaları üretiminde kullanılırlar. [24, 27].

2.1.1.5. 5xxx serisi (Al-Mg) alaşımları

Alüminyum içerisinde temel alaşım elementi olan magnezyum % 0,8' den % 5' e kadar artan oranlarda çözünmektedir. Uzama oranları bağıl olarak oldukça yüksektir ve genel olarak % 25' ten fazla bir orana sahiptir. Korozyon ortamlarında gerilmeli korozyon çatlaması riski ve deformasyon işlemiyle sertleştirilmiş alaşımlarda yaşlanma yumuşaması olarak bilinen bir sorun oluşmaktadır. Al-Mg alaşımları genel olarak kaynaklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Damperli kamyon gövdelerinde, petrol, süt ve tahıl taşımak

için geniş tanklar ve özellikle düşük sıcaklıklarda depolamaya gerek duyulan basınçlı tanklarda oldukça sık kullanılmaktadır [7].

2.1.1.6. 6xxx serisi (Al-Mg-Si) alaşımları

Esas alaşım elementleri magnezyum ve silisyumdur. şekillendirilme kabiliyeti yüksek olan bu alaşımlar özellikle ekstrüzyon ile üretilen parçaların imalatında sıklıkla kullanılırlar. İyi derecede dayanım ve korozyon direncine sahiptir. AA6061 alaşımı ise, düşük karbon çelikleri ile kıyaslanabilecek akma dayanımına sahip, en yaygın kullanılan alaşımlardan biridir [27, 28] Ayrıca otomotiv sektöründe araç hafifletme çalışmaları kapsamında çarpışma traversi gibi enerji absorbe etmesi beklenen araç parçaları alüminyum 6xxx serisi malzemeden tasarlanmaktadır.

2.1.1.7. 7xxx serisi (Al-Zn) alaşımları

7xxx serisi alüminyum alaşımlarında çinko temel alaşım elementidir. Magnezyum ile birlikte kullanılırsa oldukça yüksek bir dayanıma sahip olur ve ısıı işlem kabiliyeti olan alaşım elde edilir. Çoğunlukla, az miktarda bakır ve krom gibi diğerk elementler de ilave edilebilir. 7xxx serisi alüminyum alaşımları uçakların gövde yapılarında, yüksek gerilme altında çalışan mekanik parçalarda kullanılmaktadır [7, 29, 24, 27].

2.1.1.8. 8xxx serisi (Al-Li) alaşımları

Esas alaşım elementi lityum olup, kalay ilavesi de yapılabilir. Özellikle uçak ve uzay sanayinde kullanılmaya başlanan bu malzeme, iyi yorulma direnci ve iyi tokluk özelliklerine sahiptir. Fakat diğeri Al alaşımları ile karşılaştırıldığında üretim maliyetleri yüksektir [29].

2.1.2. Döküm Alüminyum Alaşımları

Döküm alaşımlarının sınıflandırılması ve isimlendirilmesi kimyasal kompozisyonlarına göre yapılmaktadır. Alüminyum alaşımların sınıflandırılmasında uluslararası geçerliliğı olan gösterim “U.S. Aluminium Association” tarafından yapılmıştır. Döküm alüminyum alaşımlarının isimlendirilmesi, 3 tane rakam ve noktadan sonra 1 tane daha rakamla, yapılmaktadır. (The Aluminium Association [AA], 1988) [30].

Döküm alüminyum alaşımlarında 2xx.x, 3xx.x, 4xx.x ve 7xx.x serilerine ısıtılma işlemi uygulanabilmektedir. Sınıflandırma sisteminde 1xx.x grubunda noktanın solundaki iki rakam alaşım içerisindeki en az alüminyum içeriğini belirtmektedir. 2xx.x’den 8xx.x grubuna kadar olan aralıkta noktanın solundaki iki rakam sadece grup içerisindeki alaşımları ayırt etmek için kullanılmakta olup özel bir anlam taşımamaktadır. Aynı grupta noktadan sonraki hane ürün şeklini nitelendirmektedir. Bu dizilimde 0 dökümler için 1.ve 2. külçeler içindir [31].

Çizelge 2.3. Alüminyum döküm alaşımlarının ticari sınıflandırması [31]

Sınıflandırma	Temel Alaşım Elementi
1xx.x	Alaşımlandırılmamış Alüminyum (% 99,0 veya daha yüksek saflık)
2xx.x	Bakır
3xx.x	Silis ile Magnezyum ve/veya Bakır
4xx.x	Silisyum
5xx.x	Magnezyum
6xx.x	Kullanılmayan seri
7xx.x	Çinko
8xx.x	Kalay

2.1.3. AA 6082 Alüminyum Alaşımı

Bu tez çalışmasında kullanılan alüminyum alaşımı dövme alüminyum alaşımlarından 6xxx serisine ait olan AA 6082 alüminyum alaşımıdır. Çizelge 2.4'te 6082'ye ait kimyasal kompozisyon verilmektedir.

Çizelge 2.4. Ticari AA 6082 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi

Alaşım elementi	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Al
% Ağırlık	0.85	0.47	0.1	0.55	1.15	0.17	0.013	0.09	0.019	0.012	0.017	Kalan

AA 6082 alüminyum alaşımının fiziksel özellikleri ise Çizelge 2.5' te verilmektedir.

6082 özellikle ekstrüzyon ile üretilen parçaların imalatında sıklıkla kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe araç çarpışma traversinin bir parçası olan tamponlarda malzeme olarak hafiflik ve yüksek mukavemet özellikleri sebebiyle AA 6082-T6 tercih edilmektedir.

Çizelge 2.5. AA 6082 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri

Akma Gerilmesi	285 MPa
Kopma Gerilmesi	310 MPa
Uzama (%)	10
Sertlik $Hv_{0,2}$	115

3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARIN ISIL İŞLEM MEKANİZMALARI

Literatürde temel olarak 4 çeşit ısıt işleml gösterimi kullanılmaktadır. Bu gösterimlerden (F) mekanik veya ısıt işleml görmemiş hali, (O) tavllanmış hali, (H) soğuk şekillendirme işlemini, (W) çözeltiye alma işlemini, (T) yaşılandırma işlemini ifade etmektedir. Çizelge 3.1' de alüminyum alaşımlarında temper kodlaması verilmektedir.

Çizelge 3.1. Alüminyum alaşımlarında temper kodlaması [32]

Isıl İşlem Kodu	Uygulanan Isıl İşlem
F	Mekanik veya ısıt işleml görmemiş (döküm, dövülmüş vb.) halde
O	Tavllanmış ve yeniden kristalleşmiş
H1x	Soğuk işleml uygulanmış
H2x	Soğuk işlenmiş ve kısmen tavllanmış (x, farklı sertlikleri ifade etmektedir.)
H3x	Sadece soğuk işleml uygulanmış ve kararlı
H4x	Soğuk işleml uygulanmış ve malzeme yaşılanmaması için düşük sıcaklıkta ısıt işlemlle stabilize edilmiş (x, stabilizasyon sonrası sertleşme işlemini ifade eder.)
W	Çözeltiye alınmış
T	Yaşılandırılmış
T1	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş ve doğal olarak yaşılanmış

Çizelge 3.1. Devamı

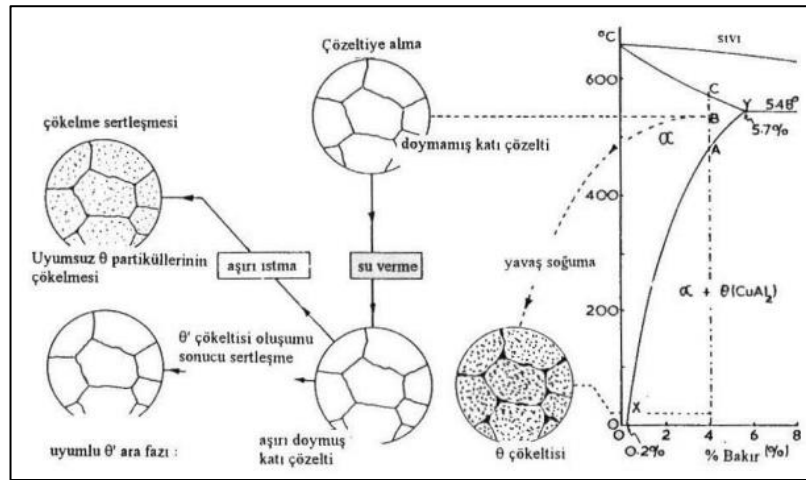
T2	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş, soğuk deformasyon uygulanmış, doğal olarak yaşlanmış
T3	Çözeltiliye alınmış, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırma uygulanmış
T4	Çözeltiliye alınmış ve doğal yaşlanmış
T5	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş ve yapay yaşlandırılmış
T6	Çözeltiliye alınmış ve yapay yaşlanmış
T7	Çözeltiliye alınmış ve stabilize edilmiş (aşırı yaşlanmış)
T8	Çözeltiliye alınmış, soğuk işlenmiş, yapay yaşlandırılmış
T9	Çözeltiliye alınmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlem uygulanmış
T10	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş, soğuk işlem uygulanmış yapay yaşlanmış

3.1. Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemi

Isıl işlem, genel olarak metal veya metal alaşımlarının mekanik ve fiziksel özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılan, katı halde kontrollü bir şekilde uygulanan ısıtma ve soğutma işlemleri olarak tanımlanmaktadır [13].

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıt işlemleri genel olarak şu şekilde sıralanabilir ve şekil 3.1.'de şematik olarak gözlemlenebilir [6, 37]:

- Döküm yoluyla üretilen yapılar da kimyasal segregasyonu azaltmak için ve işlenebilirlik özelliğini kolaylaştırmak için yapılan ön ısıtma veya homojenleştirme işlemleri,
- Deformasyon sertleşmesi (pekleşme) ve ısıt işlemleri görmüş alaşımlı yapıları yumuşatmak, gerilimleri ortadan kaldırmak, tanecikli yapının özelliklerini ve boyutlarını sabit hale getirmek için tavlama ısıt işlemleri,
- Alaşım elementlerinin katı çözeltilerini oluşturmak ve malzemenin mekanik özellikleri geliştirmek için çözelti oluşturma ısıt işlemleri,
- Katı çözeltiden tanelerin çökmesiyle sertleşme sağlamak için çökeltme ısıt işlemleri



şekil 3.1. Alüminyum alaşımlarının ısıt işlemlerinin esasları [37]

3.1.1. Homojenizasyon İşlemi

Şekil 3.2’de gösterilen alüminyum billetlere (ingot) yarı bitmiş şekillerde üretilmeden önce homojenizasyon işlemi uygulanır. Bu homojenizasyon işlemi pratikte 6xxx serisindeki alüminyum alaşımları için Çizelge 3.2’de gösterildiği gibidir [33].

Çizelge 3.2. 6xxx serisi homojenizasyon şartları

Alaşım	Sıcaklık	Süre
6005	565-582 °C	Minimum 4 saat
6060	579-585 °C	Minimum 2 saat
6061	565-582 °C	4 saat
6063	571-582 °C	Minimum 3 saat
6082	557-571 °C	Minimum 16 saat



Şekil 3.2. Alüminyum billet (ingot) [34]

Homojenizasyon işleminin yapılmasındaki amaçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Mikrosegregasyonun etkilerini azaltmak,
- Malzemenin gerilme altında çalışması sırasında çatlak oluşumuna neden olan, kararsız, düşük ergime noktasına sahip ola ötektik yapıyı ortadan kaldırmak için kaldırmak,
- Malzemenin katılaşması sırasında içerisinde çözünmüş olan elementlerin yüksek konsantrasyonlarının çökmesini kontrollü olarak sağlamak,

Homojenizasyon işlemi, alaşım elementlerinin tane sınırlarından ve diğer çözümler açısından zengin olan bölgelerden tanelerin merkezlerine difüzyon yolu ile gerçekleşir. Bu işlem tane boyutu (veya dentritlerin kol boşluğu) ve alaşım elementlerinin difüzyon hızına bağlı olarak değişen gerekli sürelerden etkilenmektedir [6,1].

3.1.2. Tavlama İşlemi

Tavlama, alüminyum alaşımlarda soğuk şekillendirmenin etkilerini yok etmek amacıyla 300-450 °C sıcaklıkları arasında uygulanan bir ısıtma işlemidir. Malzemenin yumuşama sıcaklığı, tavlama sıcaklığına bağlıdır. Malzemenin yumuşaması için gerekli olan süre; düşük tavlama sıcaklıklarında saatlerle, yüksek sıcaklıklarda dakikalarla ifade edilebilmektedir. Alüminyum alaşımlarına uygulanan tavlama işlemleri amaçlanan özelliklere göre

değişiklik gösterebilir. Bu tavlama türleri; homojenleştirme tavlama, rekristalizasyon tavlama, sertleştirme ve yaşlandırmadan sonra yumuşatma tavlama. Tavlama süresi ve tavlama sıcaklığı malzemenin ilk aşamada oluşan içyapısı ve uygulanan ısıtma işlemi göre değişebilir veya alaşımın çeşidine göre de farklılık göstermektedir [35, 6].

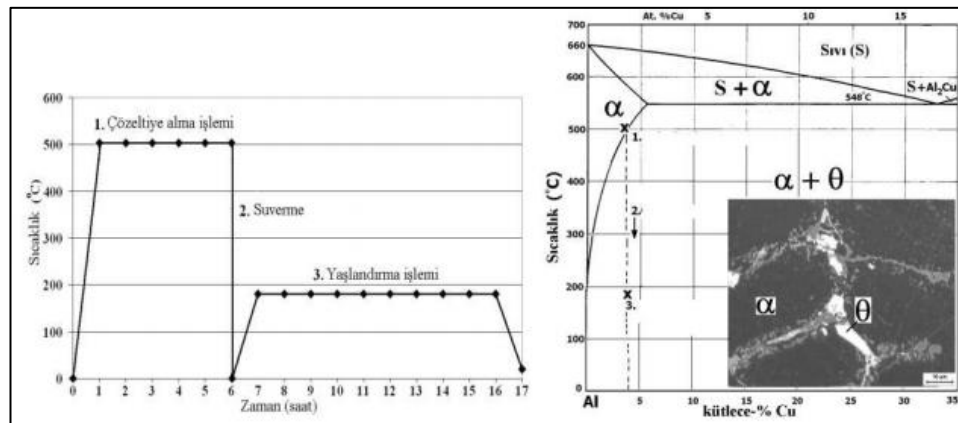
3.1.3. Gerilim Giderme Tavlama

Isıl işlem yapılabilen dövme alüminyum alaşımlarda deformasyon sertleşmesinin etkilerini yok etmek için gerilim giderme tavlama uygulanmaktadır. Gerilim giderme tavlama, tavlama sıcaklığı 350 °C' ye kadar çıkabilmektedir. Gerilim giderme tavlama ısıtma işlemi sonucunda sadece toparlanma, kısmi rekristalizasyon veya tamamen rekristalizasyon durumu gözlemlenebilmektedir [31].

3.2. Çökeltme Sertleşmesi Isıl İşlemi

Alüminyum alaşımlarında ısıtma işlem süresi boyunca meydana gelen yapı ve özellik değişimleri, çözünme ve belirli alaşım elementlerinin çökmesi ile oluşur. Şekil 3.3'te görülen çökeltme sertleşmesi, aşırı doymuş katı fazdan zaman ve sıcaklığın etkisiyle yeni bir fazın çökmesi sonucu malzemenin sertlik ve mukavemetinin artmasıdır. Çökeltme sertleşmesi, denge diyagramlarında doymuluk eğrisi içeren alaşım sistemlerinde ve sadece

doygunluk eğrisinin sınırladığı katı eriyik bileşimlerinde oluşabilir. Yani, alaşım elementinin çözünme miktarı sıcaklık arttıkça artmalıdır. Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımlarından 2xxx, 7xxx serisi alaşımlar ve bunlara son yıllarda rağbet gören Al–Li alaşımları (8xxx serisi) özellikle havacılık endüstrisinde kullanıldığı için 2xxx ve 7xxx alaşımların ısıl işlemi teknolojik olarak oldukça önemlidir. 2xxx ve 7xxx alaşımlarının kullanımında mukavemet, tokluk, yorulma gibi mekanik özellikleri ve gerilim korozyon dayanımı gibi özellikler ortaya çıkmaktadır [12,1].



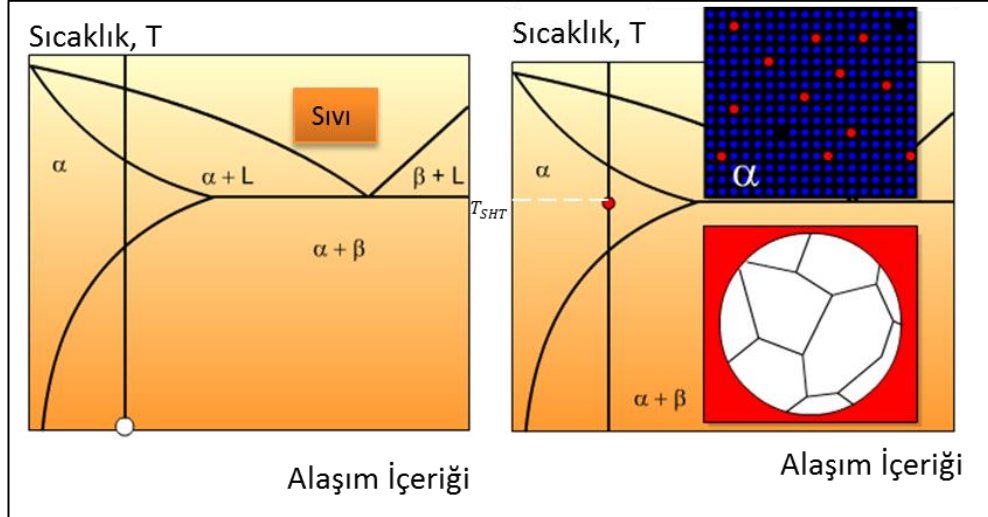
Şekil 3.3. Alüminyum alaşımlarda çökelme sertleşmesi mekanizması [37]

3.2.1. Çözeltiye Alma İşlemi

Çözeltiye alma işleminin amacı, tek fazlı katı çözelti elde etmektir. İlk sıcaklıkta β ve α fazı denge halinde değildir.

Alaşım solvüs eğrisinin üzerindeki sıcaklığı çıkarılır ve bu sıcaklıkta β fazı (şekil 3.4), α fazı (şekil 3.4) içerisinde tamamen çözününceye kadar işleme tabi tutulur [31, 39].

Yapının tümü tamamen α fazına dönüştükten sonra ani olarak soğutulur. Çözeltiye alma sıcaklığı, alaşımın ergimesine sebep olmayacak şekilde seçilmelidir. Alüminyum ergime sıcaklığı 560 °C civarında olması nedeni ile işlem sıcaklığı 525 – 545 °C arasında olmalıdır. Bu sıcaklık şekil 3.4 'te T_{SHT} ile ifade edilmektedir. T_{SHT} sıcaklığında bütün bileşenler katı çözeltide tek bir faz halindedir.



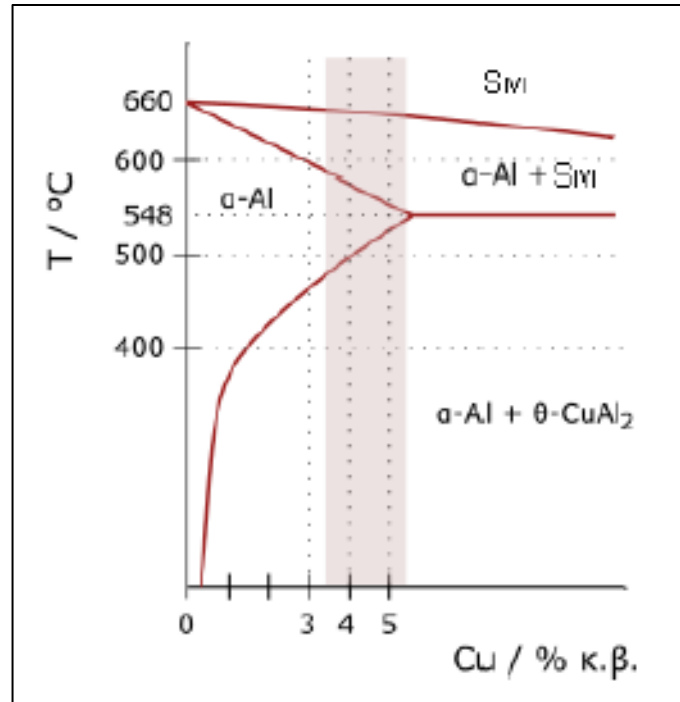
şekil 3.4. Çözeltiye alma işlemi [36]

Çözeltiye alma sıcaklığı ve süresi mikroyapıya, parçanın kalınlığına ve fırın kapasitesine/yüküne göre değişiklik göstermektedir. Bu süre ince levhalar

için, dakikalar ile ifade edilirken kesit kalınlığı arttıkça saatler ile ifade edilmektedir [31].

3.2.1.1. Önceden belirlenen bir sıcaklığa kadar ısıtma

Bu işlemin amacı, düşük sıcaklıklarda alüminyum içindeki etkisi az, buna karşılık yüksek sıcaklıklarda fazla olan alaşım elemanlarının etkisini, alaşımı yüksek sıcaklıklara çıkarmak suretiyle artırmaktadır. Bu işlemin yapıldığı sıcaklık hassasiyetle seçilmelidir. Çünkü çözünebilen elemanlar alüminyum içinde katı ergiyik halinde kalmalıdır. Çok düşük sıcaklıklarda yeterli mukavemet elde edilemeyeceği gibi çok yüksek sıcaklıklarda çözünebilen elemanların ergime tehlikesi mevcuttur [37, 24].



Şekil 3.5. Denge diyagramında solüsyona alma sıcaklığının belirlenmesi [38]

Şekil 3.5'ten de anlaşılacağı gibi bünyesinde yaklaşık olarak %5 bakır içeren bir alüminyum alaşımı için malzemenin solüsyona alma sıcaklığı yaklaşık olarak 548 °C'dir. Bu sıcaklıkta malzeme bünyesindeki θ tanecikleri eriyerek %100 α tanecikleri bulunduracaktır. Bu durum malzemenin yüksek sıcaklıklarda belirli bir süre bekletilerek elde edilir.

3.2.1.2. Belirli bir süre bekletme

Belirli bir sıcaklıkta bekletme süresi, malzemenin çıkarıldığı sıcaklığa, tavlama şekline, malzemenin cinsine ve benzer faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Bekletme süresi alaşımın kimyasal kompozisyonuna göre değişiklik göstermektedir. İnce kesitli parçalarda 10 dakikada olan bekletme süresi, kalın kesitli parçalarda 12 saate kadar çıkmaktadır. Bekletme süresi bütün çözünebilen elemanların katı ergiyik haline geçebilmelerini sağlayacak kadar uzun, oksidasyona sebep olmayacak kadar kısa seçilmelidir.

3.2.1.3. Su verme işlemi

Su verme işlemi, çökelme sertleşmesi ısıl işleminin en kritik aşaması olarak değerlendirilmektedir. Su verme işleminin amacı, çözeltiye alma aşamasında oluşan mikro yapının oda sıcaklığına getirilmesidir [10, 14, 1].

Literatürde üç farklı su verme işlemi tanımlanmaktadır. Bunlar soğuk suda su verme işlemi, sıcak suda su verme işlemi ve püskürterek su verme işlemi olarak sıralanabilmektedir.

Soğuk suda su verme işleminde, alaşımlara su verme işlemi soğuk su banyolarında gerçekleştirilmektedir. Sıcaklık değişimi 100 °C'yi geçmemelidir. Sıcak suda su verme işleminde ise, büyük ve kalın kesitli parçalara sıcak su verilir. Bu tip bir su verme işlemi distorsiyonu minimize ederek üniform olmayan sıcaklık dağılımının sebep olduğu çatlamları önlemektedir. Dövme alaşımlarda bu su verme işlemi uygulanmaktadır.

Diğer bir su verme yöntemi olan püskürterek su verme işlemi ise levha ve geniş yüzeyli parçalara uygulanmaktadır. Bazı 2xxx serisindeki alaşımlarda korozyon direncini azalttığı için kullanılmaz. Çatlak oluşumunu önler, distorsiyonu azaltır.

3.2.1.4. Suni (yapay) yaşlandırma

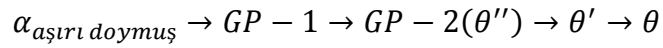
Aşırı doymuş katı çözelti içerisinde bulunan çözünmüş ikinci faz partikülleri, sıcaklık ve zamanın etkisiyle kararlı bir faz olarak çökelir ve bu dönüşüm;

$$\alpha_{aşırı\ doymuş} \rightarrow \alpha + \beta_{çökelti}$$

şeklinde gösterilir [47]. Bu dönüşümün oluşması için önce β fazının çekirdeklenmesi ve sonra difüzyon yolu ile büyümesi gerekmektedir. Eğer alaşım ani bir soğumadan sonra oda sıcaklığında tutulursa difüzyon hızı çok yavaş olduğu için β fazı genellikle oluşmaz veya oluşması uzun zaman gerekir. Bu olay doğal yaşlanma olarak bilinmektedir. Difüzyon hızını arttırmak amacı ile ani soğutulmuş olan alaşım, yüksek bir sıcaklıkta tutulursa

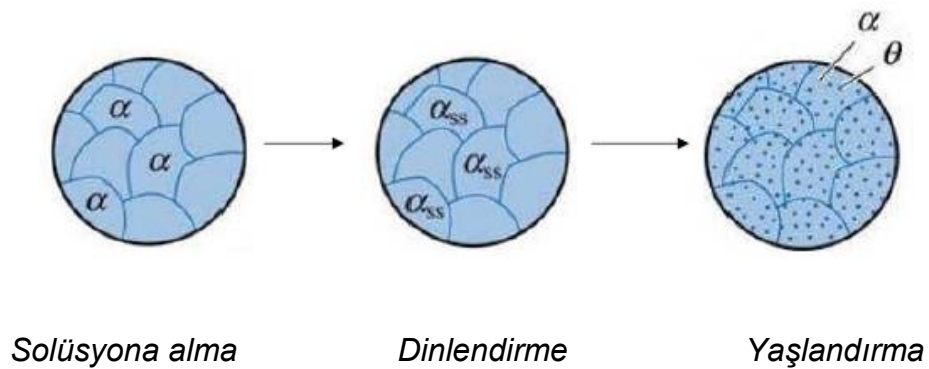
çökelme daha kısa bir zamanda oluşur. Bu olay yapay yaşlandırma olarak tanımlanmaktadır [13].

Çökelti fazının oluşumunun anlaşılabilmesi için, 1938'de Guinier ve Preston isimli iki araştırmacı tarafından keşfedilen ve isimlerinin baş harfleri ile adlandırılan GP bölgeleri incelenmelidir. Kompleks reaksiyonlar olan alüminyum alaşımlarındaki yer alan çökelme reaksiyonları ve GP bölgeleri dönüşümleri teorik olarak şu denklem ile ifade edilebilmektedir [31];



Bu teorik dönüşüm formülüne göre, yaşlanma sırasında aşırı doymuş katı çözeltiden çökelti fazının oluşum aşamaları özetlenecek olursa sırasıyla şu şekildedir;

Çekirdek → ara çökelti → kararlı çökelti

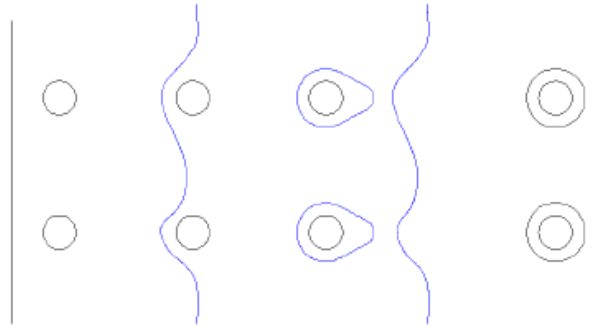


Şekil 3.6. Yaşlanma aşamalarının gösterimi [40]

Çökelti oluşumunun ara kademeleri temel olarak alaşımin bileşimine, su verme ve yaşlandırma koşullarına bağlıdır. Şekil 3.6'da yaşlandırma aşamaları gösterilmektedir.

3.2.2. Çökelme Sertleşmesi ile Mekanik Özelliklerde Meydana Gelen Değişim

Malzemenin içyapısında dislokasyon hareketine herhangi bir şekilde engel olduğunda malzemenin mukavemetinin arttığı bilinmektedir. Tane içerisindeki ince çökelti, genellikle matristen daha sert oldukları için deformasyon esnasında dislokasyon hareketine birer engel teşkil eder. Bu yüzden, çökelti arasında kalan dislokasyon parçası Şekil 3.7'de görüldüğü gibi kıvrımlaşır ve neticede çökelti etrafında bir dislokasyon halkası oluşur [41].



Şekil 3.7. Al-Cu alaşımında yaşlanma esnasında oluşan çökelti fazının kademeleri [41]

Dislokasyonlar her yönde hareket ettiğinden, artan halka sayısına bağlı olarak çökelti fazı etrafında bir dislokasyon yumağı oluşmaktadır. Bununla birlikte, malzemede dislokasyon yoğunluğu artar. Dolayısıyla, ince çökelti fazı içeren bir malzemede mukavemetin veya sertliğin artmasının başlıca nedeni;

- Dislokasyon yoğunluğunun artması
- Dislokasyon halkalarının oluşumu nedeniyle dislokasyon engelleri arasındaki mesafenin azalması sonucu dislokasyonların gittikçe daha zorlanarak hareket etme durumunda kalmasıdır [41, 26].

4. YORULMA

Uygulamada, tekrarlı yükler altında çalışan birçok makine parçası ve yapı elemanı bulunmaktadır. Değişken gerilmeler altında çalışan malzemelerde, gerilmelerin maksimum değeri yerine bunların tekrarı önemlidir. Tekrarlanan gerilmeler altında çalışan metalik parçalarda, maruz kalınan gerilmeler parçanın akma dayanımının altında kalmasına rağmen, belirli bir tekrarlanma sayısı sonunda yüzeyde bir çatlak oluşur ve bunu takiben Şekil 4.1’de görüldüğü gibi kırılma meydana gelir [15, 16]. Bu olaya yorulma denilmektedir.



Şekil 4.1. Yorulma sonucu malzemede meydana gelen kopma [42]

Malzemelerde yorulmaya neden olan tekrarlı gerilmeler aksenal, kayma, eğilme ve burulma yüklerinden birinin veya birkaçının birlikte etki etmesiyle oluşur. Yorulma kopmasına uğrayan parçalara miller, bağlantı çubukları, dişliler, yataklar, cıvatalar, yaylar, türbin kanatları, motor parçaları ve raylı

sistem tekerlekleri gibi hareketli parçalar örnek verilebilir. Bu nedenle bu elemanların tasarımında ve imalatında dikkat edilmesi gereken önemli özelliklerden birisi de yorulmadır. Dinamik yük altında çalışan parçaların yorulma özellikleri hakkında doğru bilgi alabilmek için bu parçaların ya gerçek kullanım şartlarında ya da bu şartlara yakın çalışma koşulları altında test edilmeleri gerekir. Ancak, bu yöntem zaman alıcı ve pahalı olduğu için belirli standartlara göre hazırlanan numunelerle basit laboratuvar testleri yapılarak malzemelerin yorulma davranışları hakkında bazı temel bilgiler elde edilebilir [1].

Yorulma olayı üç aşamada gerçekleşmektedir;

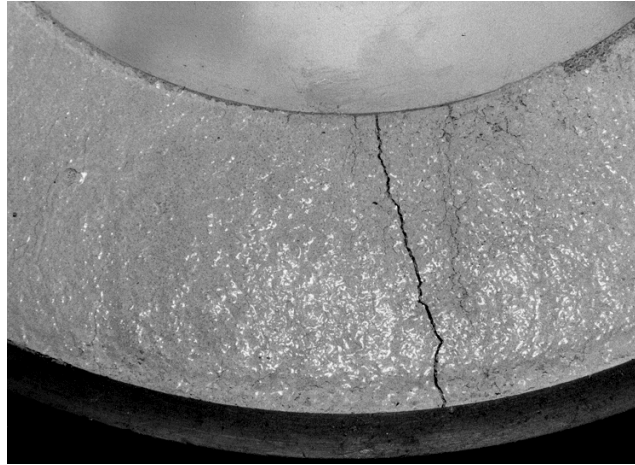
- Çatlak Başlangıcı
- Çatlak ilerlemesi
- Kırılma

Çatlak Başlangıcı; genel olarak yüksek gerilme yığılmalarının olduğu bölgelerde veya kristal yapıdaki noktasal hatalarda çatlak oluşumu başlamaktadır.

Çatlak ilerlemesi; çatlaklar genel olarak yüzeyden başlayarak, kayma hatları ile orta kısımlara doğru ilerler. Ayrıca, malzemenin içindeki mikro çatlaklar ve çatlak ucunda oluşan gerilme yığılması çatlak ilerletebilecek seviyede ise çatlak ilerler.

Uygulanan gerilme çatlağın ilerlemesi için yetersiz ise malzemede yorulma olmaz. Uygulanan gerilme, çatlağın ilerlemesine neden olacak kadar büyük ise çatlak malzemenin gevşek yerlerinden ilerlemeye başlar (Şekil 4.2.). Böylece yıpranma yavaş yavaş tüm kesite yayılır.

Kırılma; Yıpranma sebebiyle ayrışma işlemi yeterli derecede ilerledikten sonra kesitin geri kalan kısmı uygulanan yükü taşıyamaz hale gelir ve malzeme ani bir şekilde kopar [17].



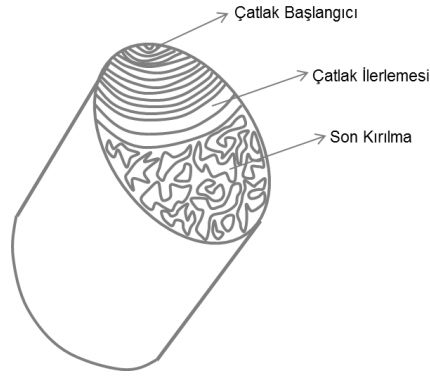
Şekil 4.2. Çatlak oluşumu ve ilerlemesi [50]

4.1. Malzemelerde Yorulma Olayı

Malzemelerde yorulma olayı, genellikle içyapı kusurlarından kaynaklanan yerel gerilme yığılmalarının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. İçyapıda bulunan çatlak, çentik, atomlar arası boşluk, sert parçacık ve ani kesit değişimleri etrafındaki gerilmeler ortalama gerilmelerden daha büyüktür. Bu

gerilmeler etkisinde lokal plastik şekil değiştirmeler meydana gelmekte ve parça akma dayanımının altındaki yüklemelerde bile kopmaktadır.

Başlangıçta hiçbir bozukluk içermeyen yüzeyi parlatılmış üniform kesitli bir metalde elastik sınır altında da dislokasyonlar yerel olarak hareket ederek kayma bantları oluştururlar. Bu bantlar da yüzeyde çıkıntılar ve çöküntülerin doğmasına dolayısıyla gerilme yığılmalarına neden olurlar. Bütün bu hallerde tekrarlı zorlamalar etkisiyle oluşan tersinir olmayan plastik şekil değiştirme sonucu malzeme pekleşir, gevrekliği artar ani yorulma kırılması meydana getirir [18].



Şekil 4.3. Malzemelerde yorulma olayı

4.1.1. Alüminyum Alaşımlarının Yorulma Özellikleri

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının yorulma dayanımlarının düşük olmasının nedeni, tane sınırlarının yakınındaki sertlik değerlerinin düşük olması, çökelti olmayan bölgelerin varlığı ve yarı kararlı parçacıkların çökmesidir.

Aşırı yaşlandırma ya da çözünme gibi sebeplerle, kayma bantları üzerinde parçacıkların kaybolması, bu bölgelerde gerilmelerin yoğunlaşmasına sebep olmaktadır. Bu da kırılma sürecini hızlandırıcı bir faktör olmaktadır. Bu sorunu önlemek için, kaymanın, diğer bileşenlerce yapı içinde homojen olarak dağıtılması önerilmiş ve bu öneri ışığında, metaller arası bileşik ya da impürite içeren ticari alüminyum alaşımlarının yorulma dayanımının, yüksek saflıktaki alaşımlardan daha yüksek olacağı belirlenmiştir. Şekil 4.4'te alüminyum bir parçada meydana gelen yorulma kopması gösterilmektedir [13].



Şekil 4.4. Bir alüminyum çubuğun çatlaması. Siyah alan zamanla büyüyen çatlaktır. Beyaz parlak alan ise bir anda kopma nedeniyle oluşmuş çatlaktır

[23]

Alüminyum alaşımların kimyasal kompozisyonuna % 0,5 oranında gümüş ilave edildiğinde yapı içerisinde çok ince çökelti ler oluşmakta ve o alaşımın çekme dayanımını artmaktadır. Ancak bu alaşımın yorulma dayanımını azalmaktadır. Bu alaşımın aynı sıcaklıkta yaşlandırma süresi artar ise, yapıda daha büyük ikinci faz parçacıklar oluşur ve çekme dayanımı bir miktar azalır. Ancak, kaba boyutlu bu ikinci faz parçacıklar, kaymayı yapı içerisine dağıtıcı bir rol üstlenir ve yorulma dayanımını artırır. Dolayısıyla, bu durumda, ince ve nispeten kaba yapı lı iki tip parçacık içeren bir yapının, hem çekme hem de yorulma dayanımının yüksek olacağını görülmektedir [12].

4.2. Yorulma Mukavemetine Etki Eden Faktörler

Bir malzemenin yorulma mukavemetine etki eden faktörler şu şekilde sıralanabilir;

- Sıcaklık
- Parçanın Yüzey İşleme Kalitesi
- Gerilme Türü
- Korozyon
- Çentik etkisi
- Malzemenin içyapısı

4.2.1. Sıcaklık

Sıcaklık artışı genellikle mukavemeti azaltıcı yönde etkili olduğundan yorulma

mukavemetinin de sıcaklık artışı ile azalması doğaldır [43]. Yaklaşık 200°C'a kadar sıcaklığın bir etkisi yoktur; ancak daha yükselirse, yorulma mukavemeti azalır. Metastabil içyapıya sahip alaşımlar, yüksek sıcaklıkta ayrışma yolu ile içyapı değişimine uğrarlar. Bu ayrışma olayı yorulma mukavemetine etki eder [44].

4.2.2. Parçanın Yüzey İşleme Kalitesi

Yorulma kopmalarının çoğu metal yüzeyinde başladığından, yüzeydeki her değişiklik, alaşımın yorulma ömrünü etkileyecektir. Yüzeydeki pürüzler, çentik etkisi yaparak çatlak oluşumunu kolaylaştırır. Yüzey işleme kalitesi azaldıkça yorulma mukavemeti de azalır. Metal yüzeyinde “artık basma gerilmesi” yaratan bir uygulama yorulma ömrünü artırmaktadır [45].

4.2.3. Gerilme Türü

Laboratuvar ortamında yorulma testleri gerilme genliği sabit tutularak yapılır. Fakat uygulamada çeşitli farklılıklar söz konusu olabilir. Çekme-basma gerilmeleri uygulayan yorulma cihazlarıyla yapılan yorulma testlerinde, çekme gerilmesinin yorulma direncini düşürdüğü, basma gerilmesinin ise arttırdığı tespit edilmiştir [16].

4.2.4. Korozyon

Değişken gerilme altında çevreden gelen kimyasal etki yorulma ömrünün kısılmasına sebep olmaktadır.

Korozif ortamın yorulma ömrüne etkisi genellikle çok barizdir. Yorulma çatlakları, korozif olmayan bir ortaminkine göre daha az sayıda tekrar sonucu oluşur. Yorulma çatlakları oluşuktan sonra, korozif ortam çatlak ilerleme hızını da arttırmaktadır [46].

4.2.5. Çentik Etkisi

Tekrarlı yükler etkisinde yorulma çatlakları, gerilmenin maksimum olduğu bölgelerde başlamaktadır. Yüzeyde oluşan herhangi bir pürüzlülük veya çentik gerilmeleri artırır ve yorulma çatlaklarının oluşmasına sebebiyet verir. Bu sebeple daha güvenilir yorulma kopması testleri yapmak için yüzey kalitesi iyileştirilmiş numuneler kullanılmalıdır.

4.2.6. Malzemenin İç Yapısı

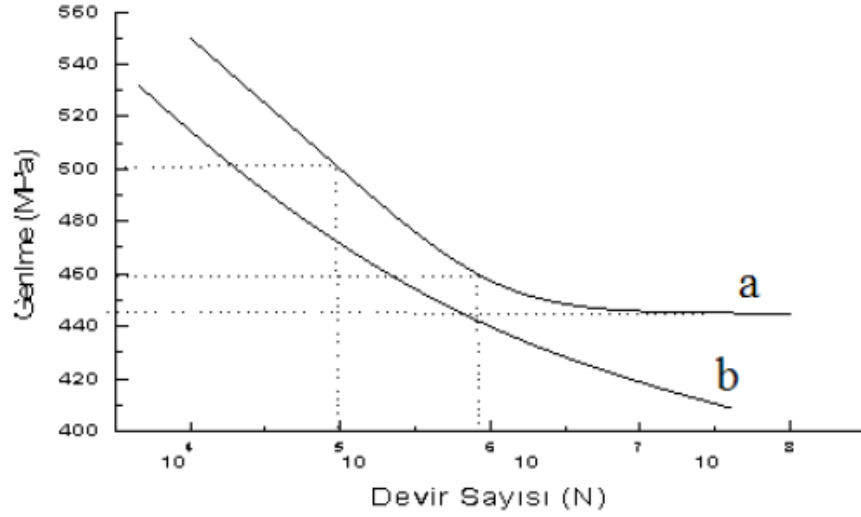
Ortalama tane boyutu, tane yapısı ve içyapı kusurları yorulma ömrünü etkileyen faktörlerdendir. Malzemenin döküm şekli, sıcak ve soğuk şekil verme fazların dağılımı farklı malzeme içyapılarının oluşmasına sebep olmaktadır. Tane büyüklüğünün uzun ömürlü yorulma koşullarını etkilemesinin değerlendirilmesi zordur. Çünkü tane boyutunu değiştirmek için uygulanacak işlemler malzemenin yorulma özelliklerinde olumsuz bir değişime neden olabilir [19]. Genellikle hata olarak bilinen malzeme içerisindeki kalıntılar ve boşluklar gerilme yığılmalarına sebep olarak malzemenin mukavemetini, bundan dolayı da yorulma dayanımını ve yorulma ömrünü azaltmaktadır. Bu kalıntılar malzemenin yapısına göre daha

kırılgan ve yüklemenin etkisi ile matris gibi kolay şekil değiştiremediğinden kalıntı sınırlarında veya içerisinde mikro boşluklar oluşmaktadır. Bu boşlukların başlaması, ilerleme ve birleşmesi [20].

4.3. Yorulma Testleri

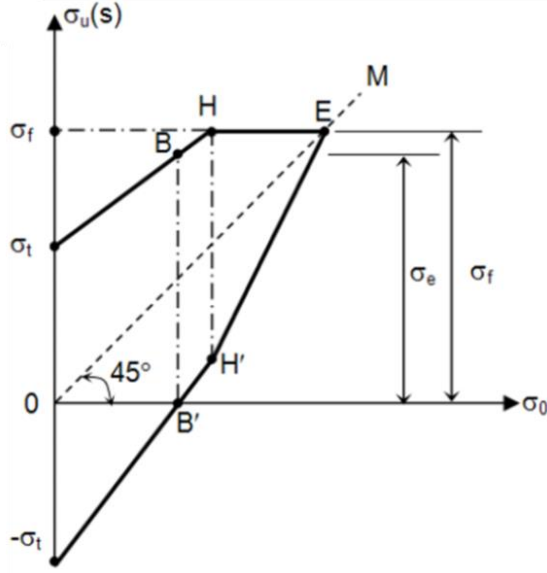
Bir malzemenin yorulma ömrünü ve yorulma sınırını tespit etmek yorulma testleri gerçekleştirilir. Yorulma testi için de diğer mekanik testlerde olduğu gibi standartlara göre hazırlanan test numuneleri kullanılmaktadır.

Numuneye uygulanan gerilmeye bağlı olarak numune kopuncaya kadar geçen devir sayısını gösteren diyagrama Wöhler diyagramı denilmektedir. Wöhler diyagramında, dikey eksen numuneye uygulanan gerilme değerini, yatay eksen ise malzemenin kırılıncaya kadar maruz kaldığı tekrar sayısını ifade eder. Wöhler diyagramı, farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda çatlayacağını veya kırılacağını gösterir. Ortalama gerilme tüm deneylerde sabit kalacak şekilde numunelerin her birine farklı periyodik gerilmeler uygulanarak numunenin kırılmasına kadar geçen tekrar sayısı tespit edilir. Şekil 4.6' de herhangi iki malzemeye ait Wöhler Diyagramı verilmektedir. Wöhler eğrisi demir esaslı malzemelerde $10^6 - 10^7$ tekrar sayılarında yatıklaşmaya başlar.



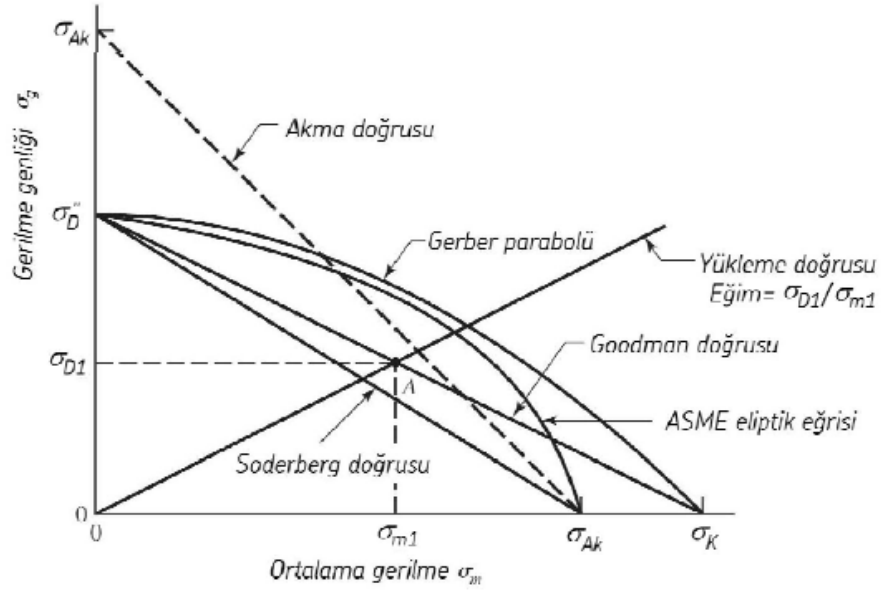
Şekil 4.5. Herhangi iki malzemeye ait Wöhler Diyagramı a) Demir ve alaşımları, b) Demir dışı metal ve alaşımları için [21]

Yorulma test sonuçları ve malzemelerin yorulma ömür hesapları, Wöhler (S-N) diyagramı dışında Smith diyagramı ile de yorumlanabilir. Batı Avrupa ülkelerinde Smith diagramı daha çok kullanılmaktadır. Tasarımcılar mevcut malzemelere ait Smith diyagramlarını, çeşitli zorlanma halleri için ilgili literatürden hazır olarak temin edebilirler [48]. Şekil 4.6'da Smith diyagramı gösterilmektedir. Smith diyagramında koyu renk ile sınırları çizilen bölge içinde kalan gerilme durumlarında malzeme sonsuz ömürlü kabul edilir.



Şekil 4.6. Smith Diyagramı [46]

Smith diyagramının yeniden düzenlenmesi ile malzemelerin yorulma dayanım sınırları farklı şekilde hesaplanabilmektedir. Burada üç tane yöntem vardır. Bunlar Şekil 4.7'de gösterilen gerber parabolü, Goodman doğrusu ve Soderberg doğrusudur. Bu yöntemlerde Smith diyagramından farklı olarak, tam değişken yorulma sınırı değişik faktörlerle çarpılarak düzeltilmiş yorulma dayanımı elde edilir.



Şekil 4.7. Gerber Parabolü, Goodman ve Soderberg Doğrusu [49]

Gerber kriteri; akma sınırını hasar olarak kabul ettiği için sünek malzemelerde sonsuz ömür hesabında kullanılmaz. Gevrek malzemeler ve süreli yorulma hesaplarında kullanılabilir [48]. Gerber eğrisi matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\sigma_{\text{değişken}}}{\sigma_{\text{dayanma sınırı}}} + \left(\frac{\sigma_{\text{ortalama}}}{\sigma_{\text{kopma gerilmesi}}} \right)^2 = 1 \quad (1)$$

Goodman kriteri; Gerber kriteri ile benzerlik göstermektedir. Dayanım bölgesinin bir kısmı ihmal edildiği için ömür hesabı daha emniyetlidir.

Goodman formülü aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$\frac{\sigma_{\text{değişken}}}{\sigma_{\text{dayanma sınırı}}} + \frac{\sigma_{\text{ortalama}}}{\sigma_{\text{kopma gerilmesi}}} = 1 \quad (2)$$

Soderberg kriteri; deney sonuçları ile korelasyonu düşüktür. Ancak sünek malzemelerin sonsuz dayanım hesapları için uygundur. Matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir [49].

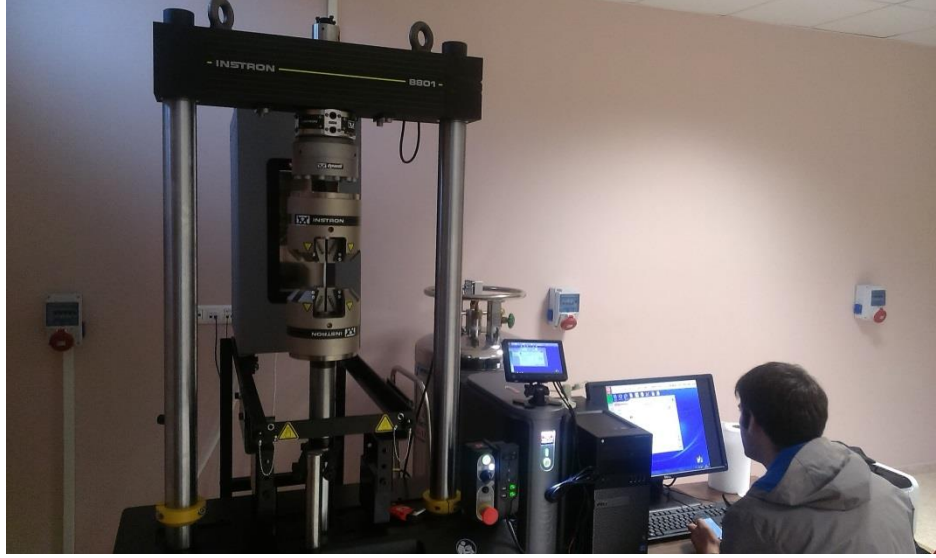
$$\frac{\sigma_{değişken}}{\sigma_{dayanma\ sınıırı}} + \frac{\sigma_{ortalama}}{\sigma_{akma\ gerilmesi}} = 1 \quad (3)$$

4.4. Yorulma Testlerinde Kullanılan Cihazlar

Yorulma testlerinin gerçekleştirildiği cihazlar, numuneye uyguladıkları gerilme türüne göre dörde ayrılabilir. Yorulma cihazlarının sınıflandırılması aşağıdaki şekilde yapılabilir:

- Eksenel çekme - basma uygulayan cihazlar
- Burulma gerilmesi uygulayan cihazları
- Bileşik gerilme uygulayan yorulma cihazlar
- Eğme gerilmesi uygulayan cihazlar
 - Düzlemsel eğme gerilmesi uygulayan cihazlar
 - Dönen eğme gerilmesi uygulayan cihazlar

Bu tez çalışması kapsamında yorulma testleri Şekil 4.8'de gösterilen INSTRON 8801 eksenel çekme-basma uygulayan yorulma test cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8. INSTRON 8801 (100 kN kapasiteli) servo-hidrolik yorulma test cihazı

5. MALZEME VE METOT

Yapılan testlerde, uygulanan ısıtıl işlemin AA 6082 alüminyum alaşımlının yorulma davranışına etkileri incelenmiştir. İki grup test gerçekleştirilmiştir. İlk grup testlerde imalatçıdan alındığında T6 şartında bulunan 6082 alüminyum alaşımlının yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra çözeltiye alma tavlı işlemlinden geçen numuneler yorulma testine tabi tutulmuşlardır. Numunelerin ısıtıl işleml, 430 °C’de 3 saat bekletme ve 1’er saatlik arayla sıcaklığı her saatte 30 °C düşecek şekilde 260 °C’ye kadar soğutma ve sonrasında oda sıcaklığında soğumaya bırakma şeklinde uygulanmıştır. Yorulma testlerindeki frekans değeri 10 Hz, gerilme oranı $r: 0,1$ ’dir.

5.1. Malzeme

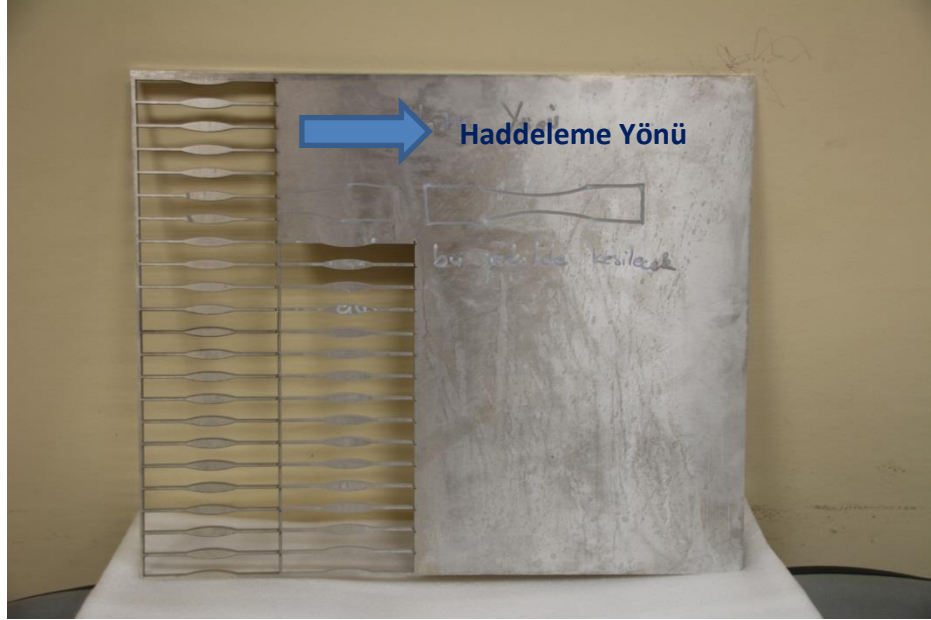
Yorulma numunelerini elde edeceğimiz AA 6082 malzemesi Pınar Metal Plastik Ltd. Şit.’den 5 mm kalınlığında alüminyum plaka olarak temin edilmiştir. Tüm kimyasal ve mekanik özellikleri belirli, sertifikalı bir malzemedir. Malzemeye ait kimyasal özellikler Çizelge 2.4’de verilmiş idi. Çizelge 5.1’de ise T6 şartlarındaki ve çözeltiye alma tavlama sonucundaki mekanik özellikler verilmektedir.

Çizelge 5.1. AA 6082 alüminyum alaşıımının mekanik özellikleri (T6 ve çözeltiye alma tavlaması sonrasında)

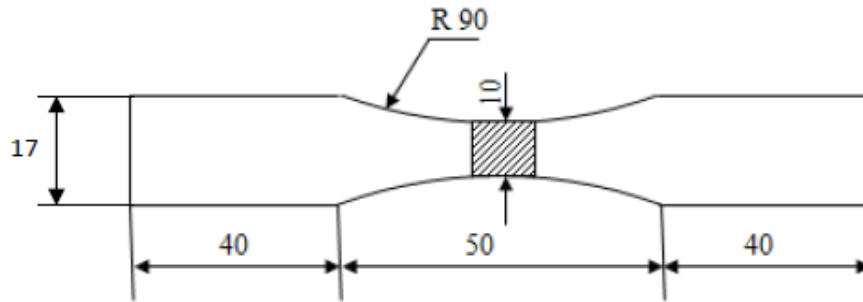
Akma Gerilmesi	285 MPa
Kopma Gerilmesi	310 MPa
Uzama (%)	10
Sertlik $Hv_{0,2}$	115
Çözeltiye alma tavlaması sonrasında akma gerilmesi	80 MPa

5.2. Yorulma Test Numunelerinin Hazırlanması

Şekil 5.1’de gösterilen plakadan haddeme yönüne paralel olacak şekilde yorulma numuneleri elde edilmiştir. Burada imalat yöntemi olarak su jeti ile kesme yöntemi kullanılmıştır. Haddeme yönüne paralel bir şekilde kesim yapılmasının amacı, hadde yönüne dik kesilmiş numunelerin akma, çekme ve yorulma ömürlerinin hadde yönünde kesilmiş numunelere nazaran düşük olmasıdır. Şekil 5.2’de elde edilen yorulma test numunesi ve ölçüleri görülmektedir.



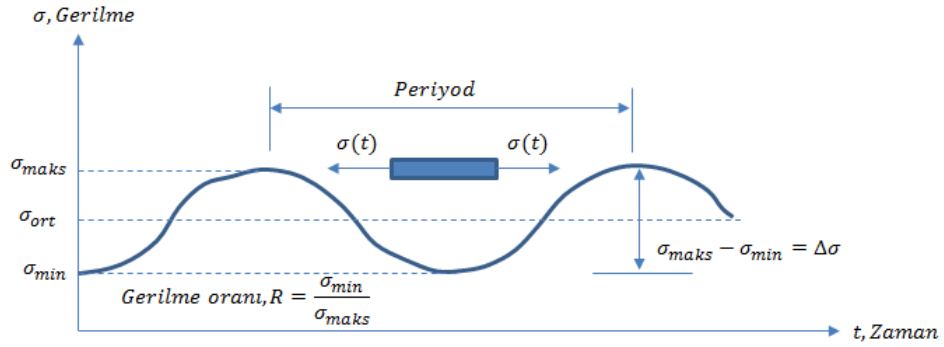
Şekil 5.1. Sac plakadan su jeti ile kesim ile numunelerin elde edilmesi



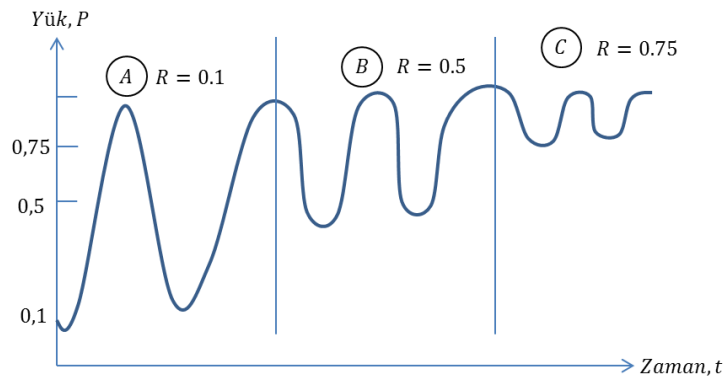
Şekil 5.2. Yorulma test numunesi ve ölçüleri

5.3. Isıl İşlem Uygulanmadan Yapılan Yorulma Testleri

Şekil 5.3'te cismi dinamik olarak zorlayan $\sigma = \sigma(t)$ gerilme fonksiyonu gösterilmektedir. Bu çalışmada yapılan deneylerde gerilme oranı Şekil 5.4'te gösterildiği gibi 0,1 olarak alınmıştır. AA 6082'nin akma değeri 285 MPa'dır. Isıl işlem uygulanmadan (imalatçıdan alınan malzeme, T6 şartlarında) yapılan ilk set deneylerde akma değerinin %90, %80, %70, %65, %60'ı maksimum gerilme olarak alınmıştır.



Şekil 5.3. Periyodik yükleme



Şekil 5.4. Yükleme profili

Yapılan 1. deneyde akma değeri 285 MPa'ın %90'ı alınarak $\sigma_{maks} = 256,5 \text{ MPa}$ olarak alınmıştır. Bu durumda $\sigma_{min} = 25,65 \text{ MPa}$ olacaktır. Numuneye bu aralıkta bir gerilme uygulanmıştır. Numune 82133 tekrar sayısı sonunda kırılmıştır.

Yapılan 2. deneyde akma değeri 285 MPa'ın %80'ı alınarak $\sigma_{maks} = 228 \text{ MPa}$ olarak alınmıştır. Bu durumda $\sigma_{min} = 22,8 \text{ MPa}$ olacaktır. Numuneye bu aralıkta bir gerilme uygulanmıştır. Numune 201363 tekrar sayısı sonunda kırılmıştır.

Yapılan 3. deneyde akma değeri 285 MPa'ın %70'ı alınarak $\sigma_{maks} = 199,5 \text{ MPa}$ olarak alınmıştır. Bu durumda $\sigma_{min} = 19,95 \text{ MPa}$ olacaktır. Numuneye bu aralıkta bir gerilme uygulanmıştır. Numune 371457 tekrar sayısı sonunda kırılmıştır.

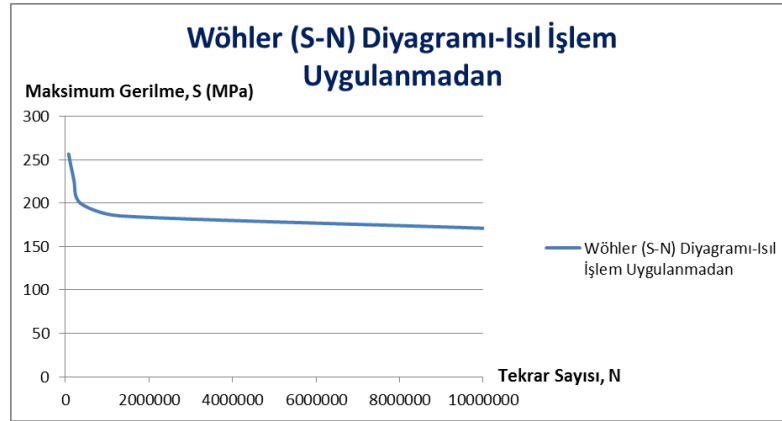
Yapılan 4. deneyde akma değeri 285 MPa'ın %65'ı alınarak $\sigma_{maks} = 185,25 \text{ MPa}$ olarak alınmıştır. Bu durumda $\sigma_{min} = 18,525 \text{ MPa}$ olacaktır. Numuneye bu aralıkta bir gerilme uygulanmıştır. Numune 1315516 tekrar sayısı sonunda kırılmıştır.

Yapılan 5. deneyde akma değeri 285 MPa'ın %60'ı alınarak $\sigma_{maks} = 171 \text{ MPa}$ olarak alınmıştır. Bu durumda $\sigma_{min} = 17,1 \text{ MPa}$ olacaktır. Numuneye bu aralıkta bir gerilme uygulanmıştır. Numune 10000000 tekrar sayısı sonunda kırılmamıştır.

Bu test sonuçları Çizelge 5.3'te verilmektedir.

Çizelge 5.2. Isıl işlem uygulanmadan yapılan yorulma test sonuçları

Numune Numarası	Maksimum Gerilme, S (MPa)	Tekrar Sayısı, N
1. Numune	256.5	82133
2. Numune	228	201363
3. Numune	199.5	371457
4. Numune	185.25	1315516
5. Numune	171	10000000



Şekil 5.5. Wöhler (S-N) diyagramı-Isıl işlem uygulanmadan

Şekil 5.5'te yapılan ilk set (ısıl işlem uygulanmamış) AA 6082 alaşımı için yorulma davranışını temsil eden Wöhler eğrisi gösterilmektedir. Hazırlanan numuneler akma değerinin %60'ında sonsuz ömürlü çıkmıştır.

5.4. Uygulanan Isıl İşlemler (Çözeltiye Alma Tavı)

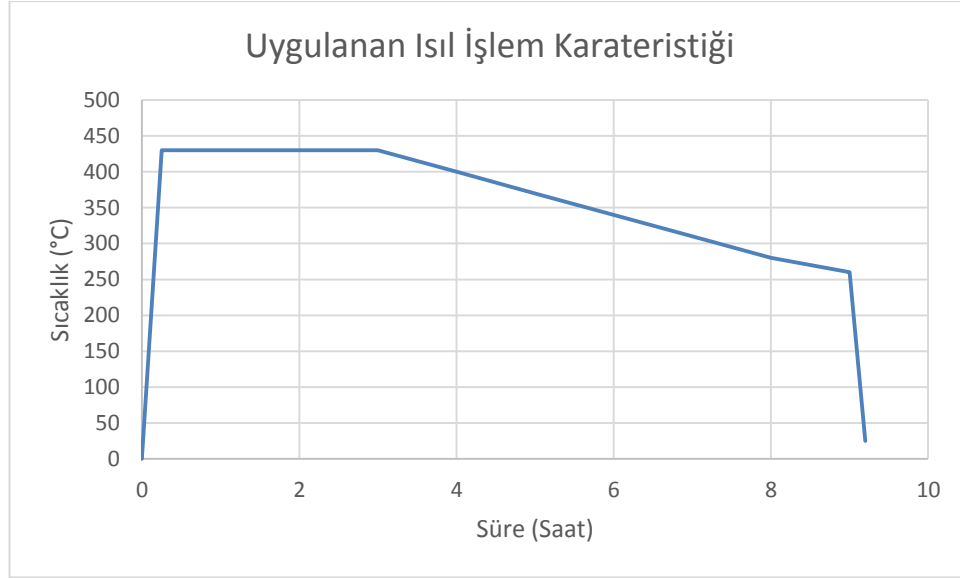
Numunelerin ısıl işlemleri Şekil 5.6'da gösterilen Protherm PLF 130/25 kamara fırınında gerçekleştirilmiştir. İmalatçıdan alındığında T6 şartlarında

bulunan numuneler Şekil 5.7’de gösterilen ısıtım işlem adımları ile çözeltiye alma tavlama yapılmıştır.



Şekil 5.6. Protherm PLF 130/25 kamara ısıtım işlem fırını

Hazırlanan numuneler ısıtım işlem fırınına yerleştirilir. 15 dakika içerisinde 430 °C sıcaklığa çıkarılan numuneler 3 saat bu sıcaklıkta tutulur. Daha sonra 1 saatlik aralarla sıcaklık saatte 30 °C azalacak şekilde 260 °C'ye kadar kontrollü olarak soğutulur. 260 °C sıcaklıkta fırından çıkartılan numuneler oda sıcaklığında beklemeye alınır.



Şekil 5.7. Numunelere uygulanan ısı işlemler

5.5. Çözeltiye Alma Tavlaması Sonrasında Yapılan Yorulma Testleri

AA 6082 alaşımının akma gerilmesi 285 MPa'dır. Yorulma numuneleri T6 şartlarından alınarak çözeltiye alma tavlaması uygulanmıştır. Daha sonra bu numunelere yapılan ikinci set deneylerde akma değerinin %40, %37.5, %35, %32.5, %30'u maksimum gerilme olarak alınmıştır. Deneylerdeki gerilme oranı, $R = 0.1$ 'dir.

Yapılan 1. deneyde akma değeri 285 MPa'ın % 40'ı alınarak $\sigma_{maks} = 114 \text{ MPa}$ olarak alınmıştır. Bu durumda $\sigma_{min} = 11,4 \text{ MPa}$ olacaktır. Numuneye bu aralıkta bir gerilme uygulanmıştır. Numune 310810 tekrar sayısı sonunda kırılmıştır.

Yapılan 2. deneyde akma değeri 285 MPa'ın % 37.5'ı alınarak $\sigma_{maks} = 106,875 \text{ MPa}$ olarak alınmıştır. Bu durumda $\sigma_{min} = 10,69 \text{ MPa}$ olacaktır. Numuneye bu aralıkta bir gerilme uygulanmıştır. Numune 524010 tekrar sayısı sonunda kırılmıştır.

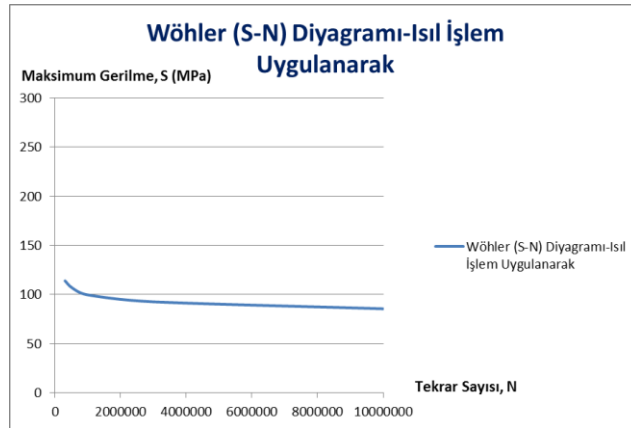
Yapılan 3. deneyde akma değeri 285 MPa'ın % 35'ı alınarak $\sigma_{maks} = 99,75 \text{ MPa}$ olarak alınmıştır. Bu durumda $\sigma_{min} = 9,975 \text{ MPa}$ olacaktır. Numuneye bu aralıkta bir gerilme uygulanmıştır. Numune 985375 tekrar sayısı sonunda kırılmıştır.

Yapılan 4. deneyde akma değeri 285 MPa'ın %32.5'ı alınarak $\sigma_{maks} = 92,625 \text{ MPa}$ olarak alınmıştır. Bu durumda $\sigma_{min} = 9,2625 \text{ MPa}$ olacaktır. Numuneye bu aralıkta bir gerilme uygulanmıştır. Numune 3000000 tekrar sayısı sonunda kırılmıştır.

Yapılan 5. deneyde akma değeri 285 MPa'ın %30'ı alınarak $\sigma_{maks} = 85,5 \text{ MPa}$ olarak alınmıştır. Bu durumda $\sigma_{min} = 8,55 \text{ MPa}$ olacaktır. Numuneye bu aralıkta bir gerilme uygulanmıştır. Numune 10000000 tekrar sayısı sonunda kırılmamıştır. Bu test sonuçları Çizelge 5.4'te verilmektedir.

Çizelge 5.3. Çözeltiye alma tavlaması sonrasında yapılan yorulma test sonuçları

Numune Numarası	Maksimum Gerilme, S (MPa)	Tekrar Sayısı, N
1. Numune	114	310810
2. Numune	106.875	524010
3. Numune	99.75	985375
4. Numune	92.625	3283320
5. Numune	85.5	10000000



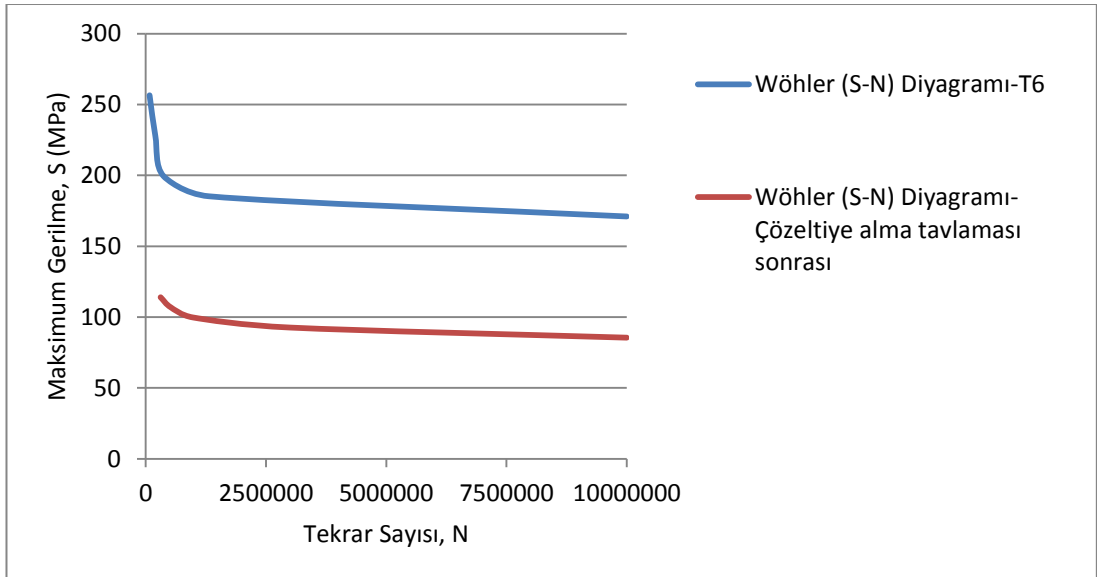
Şekil 5.8. Wöhler (S-N) diyagramı-Isıl işlem uygulanarak

Yapılan ikinci set (ısıtıl işlem uygulanmış) yorulma deneyleri sonucunda AA 6082 alaşımı için yorulma davranışını temsil eden Wöhler eğrisi Şekil 5.8’de gösterilmektedir. Hazırlanan numuneler akma değerinin % 30’unda sonsuz ömürlü çıkmıştır. Çözeltiye alma tavlama tabi tutulan numunenin akma değeri 80 MPa seviyelerine gelmiştir. Yani çözeltiye alma tavlama şartlarında düşündüğümüzde numuneler akma değerinin % 106’sında sonsuz ömürlü çıkmıştır.

6. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

6.1. Yorulma Test Sonuçları

Şekil 6.1’de üretici firmadan T651 şartlarında temin edilen AA 6082 malzemesinden elde edilen birinci grup yorulma numunesi ile gerçekleştirilen testlerin sonucunda elde edilen S-N diyagramı mavi renk ile gösterilmektedir. T651 şartlarından sonra çözeltiye alma tavlaması yapılmış ikinci grup yorulma numunesi ile gerçekleştirilen testlerin sonucunda ise kırmızı renk ile gösterilen S-N eğrisi elde edilmiştir. Gerçekleştirilen iki grup yorulma testinde, T6 şartlarında akma gerilmesinin % 60’ında sonsuz ömürlü çıkan AA 6082 yorulma numuneleri, çözeltiye alma tavlama işleminden sonra akma gerilmesinin %30’unda sonsuz ömürlü çıkmaktadır.



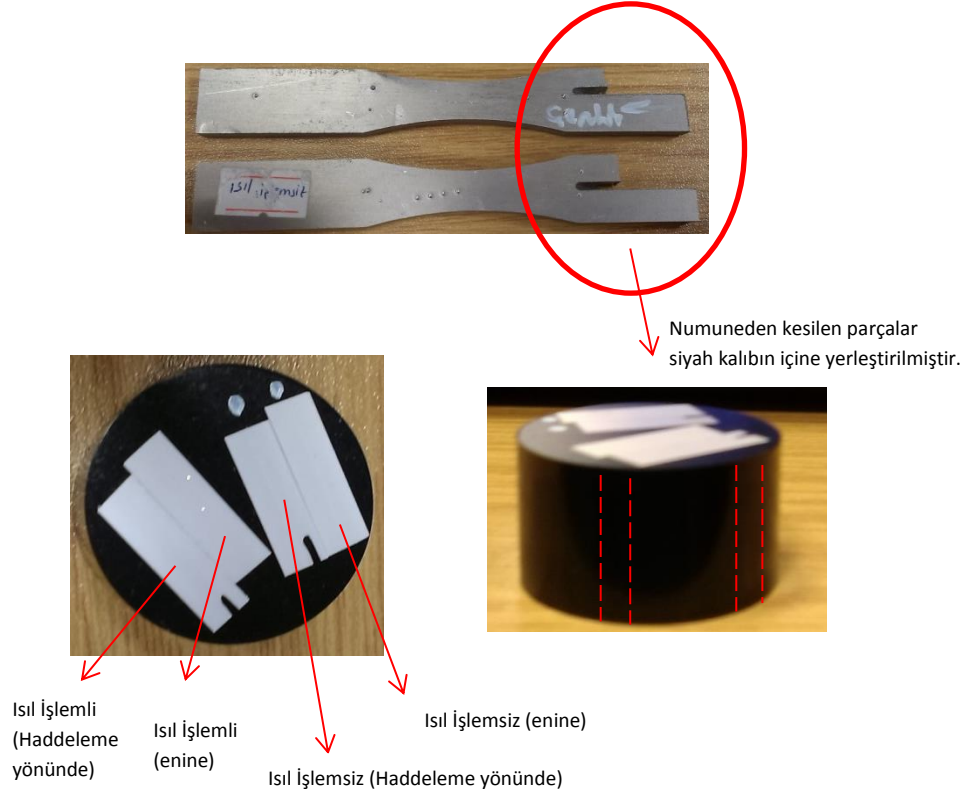
Şekil 6.1. T6 ve çözeltiye alma tavlaması yorulma ömürleri

6.2. SEM İncelemeleri

T6 ve çözeltiye alma tavlaması yapılmış yorulma numunelerinin mikro yapı görüntülemeleri gerçekleştirilmiştir. Bunun için Şekil 6.2’de gösterildiği gibi T6 ve çözeltiye alma tavlaması yapılmış numunelerden haddeme yönünde ve enine alınan parçalar bakalit kalıbın içerisine yerleştirilmiştir. Bu kesilen parçalara sırasıyla parlatma ve dağlama işlemleri uygulanmış, tane sınırlarının net olarak görülmesi amaçlanmıştır. Şekil 6.2’de gösterilen numuneler sırasıyla 120, 180, 600 kum tane büyüklüklü zımparalar ile parlatılmıştır. Sonrasında partikül büyüklüğü $3\mu m$ (elmas) olan parlatıcı sıvı ile solüsyona alınmıştır. Parlatma işlemi biten numuneler Keller’s dağlayıcısı ile dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Bu dağlayıcının içeriği şu şekildedir;

- 950 ml su (H_2O)
- 25 ml nitrik asit (HNO_3)
- 15 ml hidroklorik asit (HCl)
- 10 ml hidroflorik asit (HF)

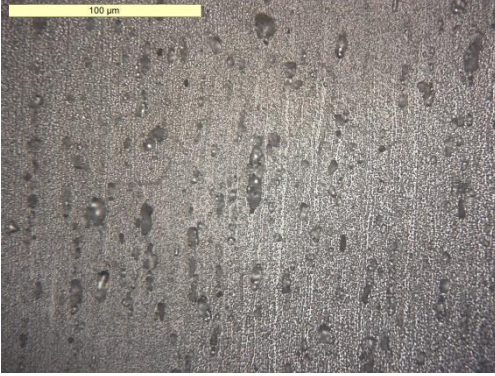
Hazırlanan numunelerin dağlama işlemi için bu karışım 10 s süre ile numunelere uygulanmıştır.



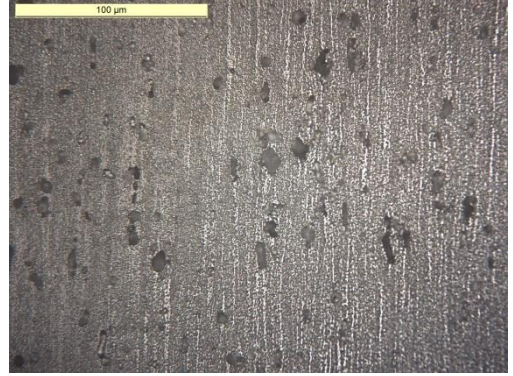
Şekil 6.2. SEM öncesi numune hazırlama işlemi

Parçaların mikro yapıları Şekil 6.3’de görüldüğü gibidir.

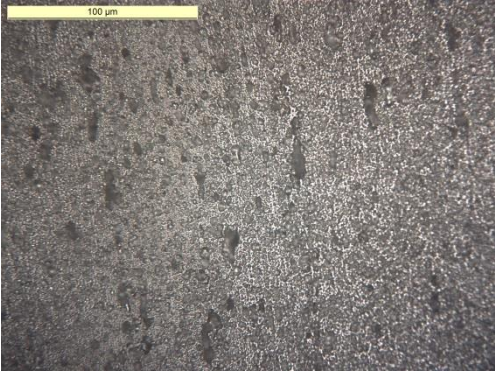
AA 6082-T6 (Haddeleme Yönü)



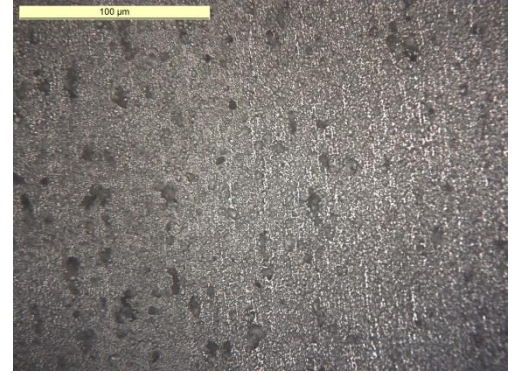
AA 6082-T6 (Enine)



AA 6082- çözeltiye alma tavlaması yapılmış
(Haddeleme Yönü)

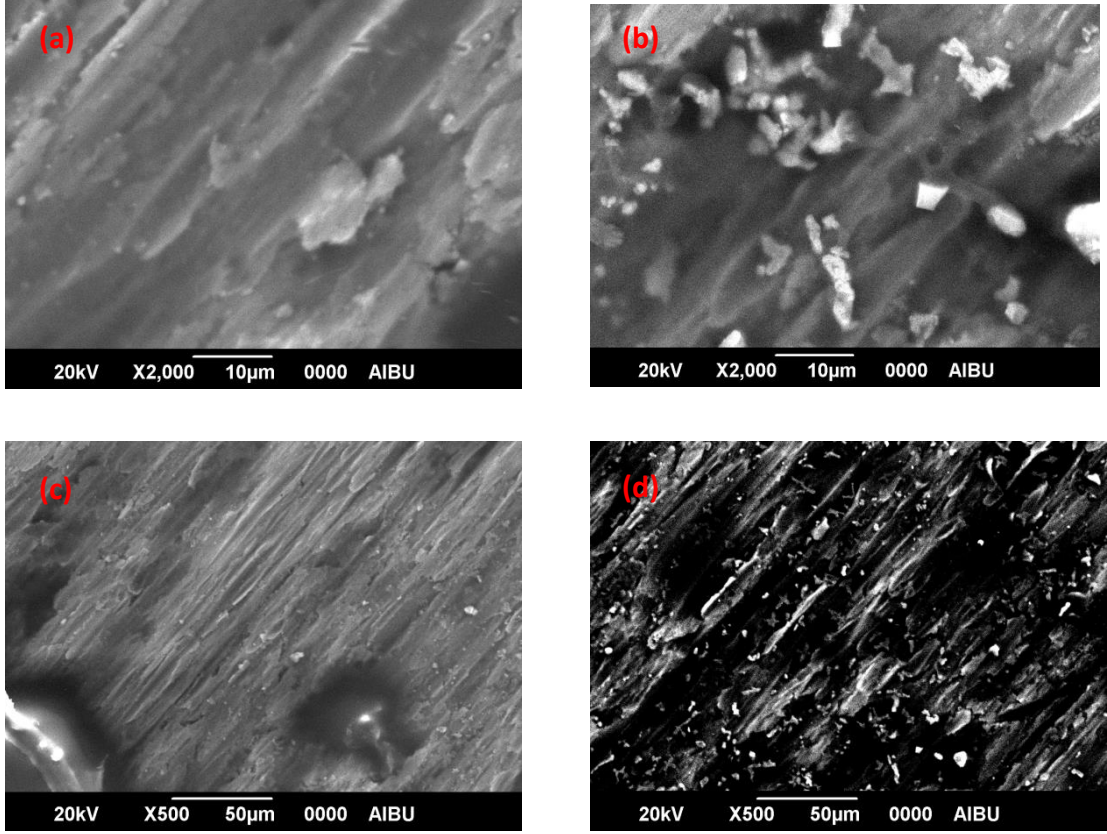


AA 6082- çözeltiye alma tavlaması
yapılmış (Enine)



Şekil 6.3. T6 ve çözeltiye alma tavlaması yapılmış optik mikroskop
görüntüleri

Mikro yapı görüntüleri SEM (Scanning Electron Microscopy)’de de incelenmiş
ve Şekil 6.4’teki sonuçlara ulaşılmıştır.



Şekil 6.4. (a) T6 SEM görüntüleri ($10\ \mu m$), (b) çözeltiye alma tavlaması yapılmış SEM görüntüleri ($10\ \mu m$), (c) T6 SEM görüntüleri ($50\ \mu m$), (d) çözeltiye alma tavlaması yapılmış SEM görüntüleri ($50\ \mu m$)

6.3. Sertlik Değişimi

Yorulma test numunelerinin ısıtıl işlem öncesinde ve sonrasında sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik cihazının ölçüm parametreleri; uygulanan kuvvet, 528,4 N, uygulanma süresi, 5 saniye, sertlik birimi HRB (Rockwell B) olarak ayarlanmıştır. Bu durumda numunelerin sertlik değerleri ısıtıl işlem uygulanmadan 64.9 iken, ısıtıl işlem sonrası 22,2'ye düşmüştür. Yani T6

řartlarından alınarak řözeltiye alma tavı iřlemine tabi tutulan numunelerin sertlik deęeri dūřmūřtır.



řekil 6.5. Numunelerin Sertlik Őlřūmleri

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, AA 6082 alüminyum alaşıminin yorulma davranışına temper durumlarının etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Isıl işlem uygulanmadan (T6) yapılan ilk set deneylerde akma değerinin %90, %80, %70, %65, %60'ı maksimum gerilme olarak alınmıştır. Akma değerinin % 60'ında, $\sigma_{maks} = 171 MPa$ ve $\sigma_{min} = 17,1 MPa$ gerilme aralığında, numune 10000000 tekrar sayısında kırılmamış ve sonsuz ömürlü çıkmıştır.
2. Numunelerin öncesinde çözeltiye alma tavlı işlemine tabi tutulduğu ikinci set deneylerde akma değerinin %40, %37.5, %35, %32.5, %30'ı maksimum gerilme olarak alınmıştır. Akma değerinin % 30'unda, $\sigma_{maks} = 85,5 MPa$ ve $\sigma_{min} = 8,55 MPa$ gerilme aralığında, numune 10000000 tekrar sayısında kırılmamış ve sonsuz ömürlü çıkmıştır.
3. T6 şartlarında akma değerinin % 60'ında sonsuz ömürlü çıkan numuneler, çözeltiye alma tavlı işleminden sonra T6'nın akma değerinin %30'unda, aynı zamanda çözeltiye alma tavlama işleminde oluşan 80 MPa'lık akma değerine göre ise % 106'sında sonsuz ömürlü çıkmaktadır. Bu durumda, malzemelerin kendi akma değerlerine göre kıyaslandığında çözeltiye alma tavlama yapılmış malzemelerin yorulma performansları T6 malzemelere göre daha yüksektir.

4. Numunelerin sertlik değeri T6 şartlarında 64.9 HRB iken uygulanan çözeltiye alma tavlı işlemi sonucunda 22,2 HRB olmuştur. Yani T6 şartlarından alınarak çözeltiye alma tavlı işlemine tabi tutulan numunelerin sertlik değeri düşmüştür.

Daha sonra yapılacak çalışmalar için öneriler:

1. AA 6082 alüminyum alaşımına uygulanacak farklı ısıtım işlem karakteristikleri ile mikro yapı içerisinde bulunan partiküllerin konumu, yapısı ve boyutu parametrik yapılarak yüksek sertlik ve yorulma dayanımı elde etmek mümkün olabilir.
2. Numunelere uygulanan çözeltiye alma tavlı işleminin mikro yapı üzerine etkilerinin daha net incelenmesi için TEM (Geçirgen Elektron Mikroskobu) kullanılabilir.
3. SEM/TEM görüntülemelerinden önce yapılan numune hazırlama işlemi klasik parlatma+dağlama yerine asit jeti ve ultrasonik parlatma ile yapılabilir.

KAYNAKLAR

- 1- Fakıoğlu, A., “Yaşlandırılan AA 7075 Alüminyum Alaşımlarının Yorulma Davranışlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 1-51 (2012).
- 2- Er, M., “Yüksek frekanslı, genlik ayarlı eğilme yorulması test cihazı tasarımı ve 1100-H14 alüminyum levhasının eğilme yorulması davranışının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 1-20 (2006).
- 3- Kıratlı, N., Yetgin, H. S. ve İnci, M., “The examination of metallurgical propertis of welded 6351 aluminum alloys with inert gas methods”, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, (11): 165-168 (2006).
- 4- Sakin, R. ve Er, M., “1100-H14 alüminyum alaşımının düzlemsel eğme gerilmeli yorulma davranışının incelenmesi”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 25 (2): 213–223, Ankara, (2010).
- 5- Hüseyinoğlu, M. ve Tosun, N., “Effect of minimum quantity coolant on surface roughness in milling of 7075 Al alloy”, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09), Karabük, 13-15, (2009).
- 6- Yılmaz, E., “Etial 180 alüminyum alaşımının işlenmesinde kesici takım geometrisi ve kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri”, Yüksek

Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 1-3 (2010).

7- Kumru, N., “Etial-141, 145 ve 160 tipi döküm alüminyum ile plaka tipi alüminyum malzemeler için yorulma makinası tasarımı ve eğilmeli yorulma davranışlarının incelenmesi”, Doktora tezi , Celal Bayar Üniversitesi ,Fen Bilimleri Enstitüsü,1-20 (2007).

8- Güteryüz, K. “Deformasyon yaşlanmasının AA7075 alaşımının mekanik özelliklerine ve aşınma davranışına etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, , Karabük 5-12 (2011).

9- Öz, Ö., “Yaşlandırma ısııl işleminin AA7075 malzemeli dikdörtgen plağın burkulma yükü üzerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Z.K.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Zonguldak, 22-31 (2007).

10- Eker, İ. ve Sevim, İ., ”6061 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15 (2): 137–141 (2009).

11- Akça, H., “Tig yöntemiyle kaynak edilen alüminyum ve alaşımlarının mikro yapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 16-40 (2006).

12- Cirik, E., “Anodik oksidasyon işleminin 7075-T6 alüminyum alaşımının yorulma davranışına olan etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, T.C. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 10-20 (2007).

- 13- Kaya, I., "Metalurji ve malzeme müh. Al 7075 alaşımasının şekillenme ve ısıtıl işlemle özelliklerinin iyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi ,Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 4-30 (2005).
- 14- Jenifer, S. W., Sang, S. K. and Richard, P. G. "Ionic inhibition of environmental fatigue crack growth in 7075-T6", . Key Engineering Materials, 989: 345-346, (2007).
- 15- Li, J., Peng, Z., Li, C., Jia, Z. Chen, W., and Zheng, Z., "Mechanical properties, corrosion behaviors and microstructures of 7075 aluminium alloy with various aging treatments", Trans. Nonferrous Met. Soc. China 18: 755-762 (2008).
- 16- Çimenoglu, H. ve Kayalı, "E. Sabri, Malzemelerin yapısı ve mekanik davranışları", İTÜ Metalürji Müh. Bölümü, İstanbul, 160-183 (1986).
- 17- Ün, H., "Malzeme bilgisi ders notları" Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli, (2007).
- 18- Önal, G. ve Avcı, A., "Yüzey çatlaklı 5086 al-mg alaşımasının eksenel yorulma çatlak ilerleme davranışı" Selçuk Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Teknik-Online Dergi 8 (3): 144-147 (2009).
- 19- Karıcı, A., "2024-T3 Al alaşımın tek aşırı yük altında yorulma davranışı", Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir 13-20 (2002).

- 20- Mitchell, I., “Residual stress reduction during quenching of wrought 7075 aluminum alloy”, Msc. Thesis, The Faculty Of Worcester Polytechnic Institute, 5-9 (2004).
- 21- İnternet: Gazi Üniversitesi, “Mekanik ders notlar”, <http://w3.gazi.edu.tr/~agural/Mekanik.doc.>, (2012)
- 22- <http://tr.wikipedia.org/wiki/Al%C3%BCminyum> (son erişim tarihi: 15.11.2014)
- 23- <http://tr.wikipedia.org/wiki/Yorulma> (son erişim tarihi: 15.11.2014)
- 24- Demirtaş, H., “6061 Alüminyum Alaşımlarında Ara Verilerek Yapılan Yaşlandırma İşleminin Malzeme Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 3-14 (2009).
- 25- Zeytin, H. K., Teymur, B., Arısoy, O., Alüminyum Alaşımları Otomotiv Endüstrisinde Uygulamaları ve Geleceği, Mam-Mktae/Osd, 2000.
- 26- Avşar, M., “Yaşlandırma Parametrelerinin AA 6061 Alüminyum Alaşımının Mekaniksel Özelliklerine ve Şekillendirmeye Olan Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 3-25 (2011).
- 27- Within by J.G. Kaufman and Dietrich G. Altenpohl Aluminum: Technology, Applications, and Environment, Hardcover (1998).

- 28- ASM Handbook, Volume IV Heat Treating, 1991.
- 29- <http://aaa.net.bd/> (son erişim tarihi: 15.11.2014)
- 30- The Aluminium Association, (1988). Aluminium Statistical Review
- 31- Demir E., "Alüminyum Alaşımlarda Isıl İşlem Etkilerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 4-30 (2008).
- 32- Geçkinli, L. F., Alüminyum ve alaşımlarının ısıtıl işlemleri, 2. Isıl işlem sempozyumu, İstanbul, Türkiye, Şubat 07 – 08, (2002).
- 33- Sanders, E. R., "Thermal Treatments During Processing of Aluminum Extrusion Alloys", AEC Webinar Presentation, Alcoa Technical Center, (2010).
- 34- <http://www.yavuzaluminum.com.tr/> (Son erişim tarihi: 15.11.14)
- 35- Demir Dışı Metallerin Kaynağı, Burhan Oğuz, OERLIKON Yayını, 1990.
- 36- <http://aluminium.matter.org.uk/> (Son erişim tarihi: 15.11.14)
- 37- Zeren, M., "Demir dışı düşük sıcaklık metal ve alaşımları", 2008.
- 38- <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Al-Cu-phase-diagram-partial-greek.svg>. (Son erişim tarihi: 15.11.14)
- 39- Askeland, D. R., The science and engineering of materials, 2. Edition, İstanbul, Chapman&Hall s.423, (1990).

- 40- Smith, F., W., Principles of Materials Science and Engineering, McGraw-Hill Inc., USA, (1996).
- 41- Callister, W., D., Materials Science and Engineering An Introduction, John Wiley&Sons, Inc., USA, (2007).
- 42- <http://www.reliasoft.com/newsletter/v8i2/fatigue.htm> (Son Erişim Tarihi: 22.11.2014)
- 43- Onaran, Kaşif “Malzeme Bilimi” Bilim Teknik Tayinevi, (1999).
- 44- Weissbach, Wolfgang (Anık, Selahaddin; Anık, E.Sabri; Vural,Murat)“Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, Birsen Yayınevi, (1998).
- 45- Kayalı, E. Sabri; Ensari, Cahit; Dikeç, Feridun “Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri” İ.T.Ü. Metalürji ve Malzeme Bölümü, (1978).
- 46- Eryürek, İ. Barlas “Hasar Analizi” İTÜ Makine Fakültesi Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Anabilim Dalı, (1993).
- 47- Laurito, F.D., Antunes, A.M.B., Baptista, C.A.R., Dias, J.C., Souza, A., “Low Cycle and Multiaxial Fatigue Behavior of Three Al-Mg-Si Alloys”, EEL-Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de Sao Paulo, (2010).
- 48- N. Özkan Özdemir, Sonlu elemanlar yöntemi ile yorulma mekaniğı ve uygulamaları, Bitirme Çalışması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Haziran, (2009).
- 49- Fatih C. Babalık, Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri, Dora Yayınları, Bursa, (2013).
- 50- <http://tx.technion.ac.il/~cvrkost/>