

77613

T.C

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK KATKILI KALAY İÇERİKLİ BRONZ YATAKLARIN AŞINMA VE
YORULMA DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI**

Hüseyin TURHAN

DOKTORA TEZİ

METALURJİ EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

1998

ELAZIĞ

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK KATKILI KALAY İÇERİKLİ BRONZ YATAKLARIN AŞINMA VE
YORULMA DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI**

Hüseyin TURHAN

DOKTORA TEZİ

METALURJİ EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

**Bu tez...../..../ 199...Tarihinde Aşağıda Belirtilen Jüri Tarafından
Oybirliği / Oyçokluğu ile Başarılı / Başarısız olarak
değerlendirilmiştir.**

(İmza)
Danışman
Prof.Dr. M.M.YILDIRIM

(İmza)

(İmza)

ÖZET**DOKTORA TEZİ****DÜŞÜK KATKILI KALAY İÇERİKLİ BRONZ YATAKLARIN AŞINMA VE
YORULMA DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI****Hüseyin TURHAN**

**Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı
1998, Sayfa; 100**

% 5-6 Zn içeren ve maliyeti ucuz olan az katkılı kalay bronzlarına; değişik oranlarda artırılarak ilave edilen P, Fe ve Mn elementlerinin, yüzey sertliği, enerji kapasitesi, çekme gerilmesi, özellikle aşınma direnci ve yorulma ömrü üzerine, etkileri araştırılmıştır. Ayrıca ilave edilen elementlerin etkileri birbirleri ile mukeyeseli bir şekilde incelenmiştir. Bu amaçla hazırlanan numunelere SEM, X- Işınları Difraksiyonu, yüzey sertliği, çekme gerilmesi, döner eğme yüklenmesi altında yorulma ömrü ve kuru sürtünmeli adhesiv aşınma testleri uygulanmıştır.

Bu çalışmanın birinci ve ikinci kısmında , bronzların temel elementlerine dair bilgiler sunulmuştur. Üçüncü ve dördüncü kısımda kalay bronzu türleri, Sn esaslı yatak alaşımları ve Pb katkılı yatak bronzları ile ilgili bilgiler verilmiştir. Beş ve altıncı kısımlarda; sürtünme, yapışma, ve aşınma ile ilgili yüzey davranışları, temas eden yüzeylere ve adhesiv aşınmaya dair açıklamalar sunulmuştur. Yedinci kısımda yorulma türleri, yorulma mekanizmaları, yorulmaya tesir eden faktörlerle ilgili açıklamalar

yapılmıştır. Bundan sonra deneysel çalışmalara yer verilerek; son kısımda ise, deney sonuçları ve tartışılmasına geçilerek, genel bir değerlendirme yapılmış ve öneriler sunulmuştur.

Ulaşılan sonuçlara göre; numunelerde bulunan P elementinin aşınma direncini olumsuz etkilemediği, diğer numunelerde ise, Fe ve Mn içeriğinin artışına bağlı olarak, aşınma direncinin olumsuz etkilendiği, buna karşılık yorulma dayanımının iyileştiği görülmüştür. Metaller arası bileşikler oluşturan bu elementler, matris içine ve dendrit kolları arasındaki bölgelere çökelerek, alaşımların çekme mukavemeti yüzey sertliği ve yorulma ömrünü artırmıştır. P elementinin dışında, diğer elementler alaşımın adhesiv aşınma direncini kısmen düşürmüştür.

Adhesiv aşınma olayında, çok sert intermetalik fazlar içeren numunelerde, aşınma direnci ile yüzey sertliği arasında bir ilişkinin varlığı tespit edilmiştir. Fe ve Mn elementinin artan miktarlarına bağlı olarak, dendrit kolları arasındaki bölgelerde çok miktarda metaller arası bileşikler oluşmuştur. Fe ve Mn' nin yeterince intermetalik fazlar oluşturması, gevrek bir faz olan (Zn,Cu)S fazının oluşmasını büyük oranda engellemiştir. Bu oluşum yüzey sertliğini, çekme dayanımını artırmış ve buna paralel olarak da yorulma dayanımını yükseltmiştir. Ancak, intermetalik fazların çokluğu nispetinde, aşınma dayanımının da kısmen düşüş görülmüştür.

Eğer uygulama alanı aşınma dayanımı açısından çok önem arzetmiyor ise, bu elementlerin oluşturduğu, metaller arası bileşikler bulunan alaşımlar, tercih edilebilir. Çünkü intermetalik fazlar, yorulma direncinin yükselmesinde oldukça etkili olmaktadır.

Alaşım elementlerinden P' nin ilavesi; yorulma direncinde kademeli olarak bir yükselmeye neden olmuştur. Aşınma direnci ise, Fe ve Mn içeren numunelerde olduğu gibi meydana gelen, örneğin; $\text{SnCu}_2\text{FeS}_4$, FeSn_2 gibi sert fazlar, çok miktarda bulunmadığından, olumsuz etkilenmemiştir. Fakat Fe ve Mn ilavesi, yorulma direncini etkili bir şekilde artırmış, buna karşılık aşınma direncini kısmen düşürmüştür.

En iyi aşınma direncine sahip alaşımın, iyi miktarda yorulma ve mekanik özellikler sergileyen, aynı zamanda düşük oranda yani % 0.224 P alaşım elementi içeren numune olduğu anlaşılmıştır. Bundan sonra en iyi aşınma dirençlerine sahip numunelerin % 0,226 Mn ve % 1,08 Fe içeren numuneler olduğu anlaşılmıştır. Ancak bu alaşımların yorulma dayanımlarının önceki alaşıma göre biraz yüksek olduğu tesbit edilmiştir.

ABSTRACT

PhD. THESIS

**INVESTIGATION OF WEAR AND FATIGUE BEHAVIOUR OF BRONZE
BEARINGS WITH LOW ALLOY LOW SN CONTENT**

Hüseyin TURHAN

**Firat University
Faculty of Technical Education
Department of Metallurgy
1998, Pages: 100**

In this study, the effect of P, Fe and Mn which are added into Sn-bronzes with 5 - 6 % Zn, in increasing amounts, on surface hardness, energy capacity, tension, wear resistance and fatigue life of these materials were investigated comperatively. The specimens prepared were applied SEM, X-Ray diffraction analysis and hardness,tension bending fatigue and dry- friction adhesive wear tests.

At the first and second chapters of the study, bronzes and their alloying elements were introduced. At the third and fourth chapters Sn - brozes, Sn - based bearing materials and Pb- additive bearing bronzeswere discussed. At the fifth and sixth chapters information about surfacial behaviours in friction, adhesion wear, contacting surfaces and adhesive wear were presented.

At the seventh chapter, fatigue mechanisms, fatigue types, and the factors affecting fatigue behaviours of materials were defined. The following chapter deals with experimental studies. At the final chapter, the experimental results were given and discussed. Finally some recommendations were presented.

From the results, it was seen that, P did not effected the wear resistance negatively. In the P - free specimens, the wear resistance decreased with the increase of Fe and Mn content whereas these elements improved the fatigue strength. They also increased the tension strength, surface hardness and fatigue life of the alloys bei forming intermetallic compounds and precipitating among the dendrite arms. Except P the other alloying elements decreased the wear resistance relatively.

In the specimens including very hard intermetallic phases, a relationship between wear resistance and surface hardness was determined for adhesive wear. Depending on the increase in Fe and Mn content, a big amount of intermetallic compounds formed among the dendrite arms. Formation of intermetallic phases prevented the formation of brittle (Zn,Cu)S phase. This occurance increased surface hardness and tension strength and thus increasing fatigue life. But after a certain extent of intermetallic phases, the wear resistance decreased relatively.

The alloys including intermetallic compounds are preferable for fatigue strength unlike wear resistance. Addition of P caused an increase in fatigue life. Wear resistance however was not influenced very much by the hard phases like $\text{SnCu}_2\text{FeS}_4$ and FeSn_2 . Fe and Mn decreased the wear resistance relatively while increasing fatigue life considerably.

It was understood that the specimen having the best wear resistance, good fatigue life and mechanical properties was the one with 0,224 % P. With respect to the wear resistance, the specimens having 0,226 % Mn and 1,08 % Fe followed this respectively. But the fatigue strengths of these alloys increased compared with the other alloys.

TEŞEKKÜR

Bu tezin önerilmesinde, yönlendirilmesinde ve çalışmalarım esnasında sağladığı katkılarından dolayı Metalurji Eğitimi Bölümü Öğretim Üyesi, Malzeme Bilimi Eğitimi Anabilim Dalı Başkanı ve Muş Meslek Yüksek Okulu Müdürü danışman hocam sayın Prof. Dr. M. Mustafa Yıldırım'a; çalışmalarım sırasında her konuda destek olup yol göstererek hiç bir fedakarlıktan kaçınmayan Metalurji Müh. Bölümü Başkanı hocam sayın Yrd. Doç. Dr. M. Aksoy'a, X-RAY Diraktromu ve EDS incelemelerinde yardımlarını esirgemeyerek destek veren Doç. Dr. V. Kuzucu'ya sonsuz teşekkürler sunmayı bir borç bilirim.

Ayrıca projenin başarılı ve verimli olması için mali destek sağlayan Rektörümüz sayın Prof. Dr. E. G. İsbir, FÜNAF Müdürleri Prof. Dr. F. Tümen ve Prof. Dr. V. Tanyıldızı olmak üzere tüm FÜNAF çalışanlarına teşekkürlerimi arz ederim.

Deneylerde kullanılan numunelerin SEM, X - RAY Difraktromu ve EDS yapılması esnasında her türlü kolaylığı sağlayan O. D. T. Ü. Metalurji Müh. Böl. Başkanı Prof. Dr. M. Doruk, Öğr. Üyesi Doç. Dr. B. Ögel ve Teknisyenlerine, ayrıca deney numunelerinin işlenerek hazır hale getirilmesinde katkıları olan Tekn. Bil. M. Y. O. Öğr. Gör. M. Yaz'a ve Tekn. Eğt. Fak. Metal Eğitimi Bölümü Teknisyenlerinden C. Bakır ve Z. Karaaslan'a ayrı ayrı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
Özet.....	I
Abstract.....	III
Teşekkür.....	V
İçindekiler.....	VI
Semboller.....	IX
Şekiller.....	XI
Tablolar.....	XII
1.GİRİŞ.....	1
2. BRONZLARIN TEMEL ELEMENTLERİ.....	5
2.1. Bakır.....	5
2.1.1. İletkenliği.....	7
2.1.2. Korozyon dayanımı.....	8
2. 1. 3. Mekanik özellikleri.....	8
2.1.4. Akma dayanımı.....	9
2.1.5. Yorulma dayanımı.....	9
2.1.6. Alaşım elementlerinin etkileri.....	9
2.2. Kalay ve Genel Özellikleri.....	11
2.3. Çinko ve Genel Özellikleri.....	12
2.4. Kalay-Bakır Alaşımları.....	13
2.5. Kalay - Çinko Alaşımları.....	13
2.6. Kalay - Kurşun Alaşımları.....	13
2.7. Bakır - Kalay - Çinko Alaşımları.....	13
3. BRONZLAR.....	14
3.1. Giriş.....	14
3.2. Kalay Bronzları.....	14
3.3. Kalay Bronzu Türleri.....	17
3.3.1. Yalın kalay bronzları.....	17
3.3.2. Fosfor bronzları.....	18

3.3.2.1. İşlenik fosfor bronzları.....	20
3.3.3. Çinko İçeren Bronzlar.....	20
3.3.4. Nikel İçeren Bronzlar.....	21
4. YATAK ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ.....	22
4.1. Kalay Temelli Yatak Alaşımları.....	23
4.2. Kurşunlu - Yatak Bronzları.....	25
5. SÜRTÜNME.....	26
5.1. Yapışma.....	27
6. AŞINMA.....	29
6.1. Katı Cisimlerin Teması.....	29
6.2. İdeal Olarak Pürüzsüz Yüzeylerin Teması.....	29
6.3. Makine Parçalarının Yüzey Durumu.....	30
6.3.1. Dulong ve petit kanunu.....	30
6.3.2. Yüzey tabakaları durumları.....	30
6.3.3. Yüzey geometrisi durumu.....	31
6.4. Gerçek ve Çevre Temas Alanı.....	32
6.5. Adhesiv Aşınma.....	33
6.5.1. Gerçek temas yüzeyinin büyüklüğü.....	33
6.5.2. Adhesiv bağ kuvvetleri.....	34
6.5.3. Adhesiv taşınma.....	38
6.5.4. Adhesiv koşullu yenme.....	41
6.6. Yüzey Yorulma Aşınması.....	41
7. YORULMA.....	44
7.1. Yorulma Türleri.....	44
7.2. Yorulma Mekanizması.....	45
7.2.1. Çatlak büyüme mekanizması.....	46
7.2.2. Yorulma kırılmasının nedeni.....	48
7.2.3. Kuru yorulmanın mekanizması.....	49
7.2.4. Yorulma Zorlamalarında Hasar Durumu.....	50
7.3. Kırıkların Mikroskobik Görünüm ve Oluşumları.....	50
7.3.1. Yorulma Kırılmalarının Oluşum Şekilleri.....	50

7.4. Yorulmaya Tesir Eden Faktörler.....	51
7.4.1. Yüzey Tesirleri.....	52
7.4.2. Gerilme Yoğunluğu.....	52
7.4.3. Yükleme Oranı.....	53
7.4.4. Metalurjik Faktörler.....	54
7.4.5. Sıcaklık Etkileri.....	54
7.4.6. Isıl Yorulma.....	55
8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	56
8.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler.....	56
8.2 . Metalografik Çalışmalar.....	57
8.3. SEM Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemeleri.....	57
8.4. EDS(Energy Dispersive Spectroğraf) Noktasal Analiz Çalışmaları...	57
8.5. X-Işınları Difraksiyonu (X-Ray Diffraction) Çalışmaları.....	57
8.6. Sertlik Deneyleri	58
8.7 Aşınma Deneyleri.....	58
8.8. Yorulma Deneyleri.....	59
8.9.Çekme Deneyler.....	60
9. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	61
9.1. Fe İlaveli Numunelerin Mikroyapı Sonuçları.....	61
9.2. Fe İlaveli Numunelerin Mekanik Sonuçları.....	68
9.3. P İlaveli Numunelerin Mikroyapı Sonuçları.....	72
9.4. P İlaveli Numunelerin Mekanik Sonuçları.....	76
9.5.Mn İlaveli Numunelerin Mikroyapı Sonuçları.....	81
9.6. Mn İlaveli Numunelerin Mekanik Sonuçları.....	84
9.7.P ve Fe İçerikli Numunelerin Mekanik İlişkileri Sonuçları	87
9.8. P ve Fe İçerikli Numunel. Yorulma -Ağırlık Kaybı İlişkileri Sonuçl.	88
9.9. P ve Mn İçerikli Numunelerin Mekanik İlişkileri Sonuçları.	89
9.10 P ve Mn İçerikli Numunel. Yorulma- Ağırlık Kaybı İlişkileri Sonuçl..	90
10. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	91
11. KAYNAKLAR.....	94

SEMBOLLER

fcc	: Kübik Yüzey Merkezli
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	: Noktasal Analiz
X-RAY	: X-Işınları Difraksiyonu
Δl_p	: p düzeyinde profilin referans (taşıma) uzunluğu
A_p	: p düzeyinde doruk kesitlerinin alanı
t_m	: Ortalama �izgi düzeyinde profilin izafi taşıma uzunluğu
A_c	: Temasın �evre alanı
V	: 2.0 (yataklar için) yüzey pürüzlülük klasieęi
Hb	: Dalga açıklığı (dalga uzunluğu)
R_p	: Dalga tepelerinin eğrilme yarıçapıdır
V	: Hız
d	: Yatak �apı
n	: Milin devir sayısı
b	: Yatak ve milin �evre temas yüzeyi uzunluğu

ŞEKİLLER

- Şekil 2.1. Oksijensiz Bakırın Elektrik İletkenliği Üzerine Eriyiklerin Etkileri.
- Şekil 2. 2. Yapıya İlave Edilen Elementlerin Bakırın Elektrik İletkenliği Üzerine Etkisi
- Şekil 2. 3. Fosforun Kalay Bronzundaki Oksijene Etkisi.
- Şekil 3.1. Cu-Sn Denge Diyagramı
- Şekil 3. 2. Kalay Bronzlarında Gaz Gözenekleri
- Şekil 3. 3. SEM Mikrografından Alınan Dendrit ve İnterdendritik Bölgelerde P Çökelti.
- Şekil 3. 4. Cu-Zn Denge Diyagramı.
- Şekil 4.1. Çeşitli Yatak Malzemelerinin Aşınma Katsayısı ve Sertlik İlişkileri.
- Şekil 4. 2. Sn-Sb Üçlüsünün Kalay Köşesi. Taranan Kısım Babbit Vileşimlerini Kapsar.
- Şekil 4. 3. Sn-30Zn; Ötektik Matriste Zn Partikülleri (a) ve Sn-28Zn-2Cu; Sn Matrisinde Cu_6Sn_5 ve Cu_5Zn_8 (b).
- Şekil 4. 4. Cu_6Sn_5 ve Cu_5Zn_8 Fazlarının Birbirleri İçinde Çökmesi ve Çevresinde oluşan Zn.
- Şekil 5. 1. Bir Cismin Meyilli Düzlem Üzerinde Denge Diyagramı.
- Şekil 5. 2. Bir Çıkıntının Bir Meyilli Sürtünmesiz Düzlem Üzerinde Kaymasının Diyagramı.
- Şekil 5. 3. İki Pürüzlü Yüzeyin Şematik Görünüşü.
- Şekil 5. 4. Yapışmanın Şematik Gösterilişi.
- Şekil 6.1. Bir Katının Yüzey Geometrisinin Diyagramı.
- Şekil 6. 2. Yüzey Pürüzlülük Parametreleri.
- Şekil 6. 3. Birbirine Sürtünen İki Yüzeyde Görünür ve Gerçek Temas Alanları.
- Şekil 6. 4. Saf Metallerden Çiftlerin Adhezyon Katsayıları.
- Şekil 6. 5. Kübik Yüzey Merkezli Metal Çiftlerden Adhezyon Katsayıları.
- Şekil 6. 6. Bakırla Yüksek Sertliğe Haiz Maddelerin Adhezyonu.
- Şekil 6.7. Farklı Malzeme Çiftlerinin Adhezyonu.
- Şekil 6. 8. Fazla Aşınma Mekanizmalarının Birbiri Üzerine Yığılması.
- Şekil 6. 9. Homojen ve Heterojen Dokulu Malzemelerden emas Durumunun Şematik Tasarısı.
- Şekil 6. 10. Metalik Malzemelerin Yüzey Yapısı.

Şekil 6. 11. Başlangıç Safhalarında Yüzey Yorulma Kırılmalarının Görünümü.

Şekil 6. 12. Küre ve Düzlemin Elastik Temasında Gerilme Maksimumunun Pozisyonu.

Şekil 7. 1. Titreşim Zorlamasında Çeşitli Gerilme Bölgelerinin Gösterilişi.

Şekil 7. 2. Wöhler Eğrisi ve Hasar Çizgisi.

Şekil 7. 3. Çatlak Oluşumu ve Büyüme Kademeleri.

Şekil 7. 4. Yorulma Çatlak Büyümesi Kademelerine Tekabül Eden Çatlak Açılma
Profilleri.

Şekil 7. 5. Başlama ve Gelişme Bileşenlerine Ayrılmış Şematik Bir (σ -N) Eğrisi.

Şekil 7.6. Korozyonsuz Ortamlarda Alternatif Gerilmeli Yorulmada Demir Esaslı ve

Demir Dışı Malzemelerin (σ -N) Eğrileri ile Gösterilen Yorulma Davranışları

Şekil 7. 7. Statik Kaymada Meydana Gelen Basamağın, Optik- Elektron Mikroskopunda
Görünüşleri ve Yorulmada Ortaya Çıkan Çentik ve Pik Profili.

Şekil 7. 8. Şematik Yorulma Çatlağı Büyüme Hızı Eğrisi.

Şekil 7. 9. Sabit Genlikli Sinüzoidal Gerilme Yükleme.

Şekil 8. 1. Aşınma Deney Aparatı Görünüş ve Boyutları.

Şekil 8. 2. Yorulma Deney Numunesi Görünüş ve Boyutları.

Şekil 8. 3. Çekme Deney Numunesi Görünüş ve Boyutları.

Şekil 9. 1. Demir İçeren Numunelerin Optik Fotoğrafları (a) ve (b).

Şekil 9. 2. F1 Numunesine Ait SEM Fotoğrafı.

Şekil 9. 3. F1 Numunesi Matrisine Ait EDS Kimyasal Analizi.

Şekil 9. 4. Şekil 2'deki Beyaz Fazın (Pb) EDS Analizi.

Şekil 9. 5. Şekil 2'deki Siyah Fazın ((Zn,Cu)S) EDS Analizi.

Şekil 9. 6. F2 Numunesine Ait SEM Fotoğrafı.

Şekil 9. 7. Şekil 9. 6' daki 3 Numara İle Gösterilen Yerin EDS Analizi.

Şekil 9. 8. Şekil 9. 6' daki 2 Numara İle Gösterilen Yerin EDS Analizi.

Şekil 9. 9. Şekil 9. 6' daki 1 Numara İle Gösterilen Yerin EDS Analizi.

Şekil 9. 10. F1 ve F2 Numunelerine Ait Optik Fotoğraflar.

Şekil 9. 11. F1 Numunesine Ait X-RAY Difraktomu.

Şekil 9. 12. F2 Numunesine Ait X-RAY Difraktomu.

Şekil 9. 13. F1 ve F2 Numunelerinin Aşınma Eğrileri.

Şekil 9. 14. F1 ve F2 Numunelerinin Gerilme-Çevrim Eğrileri.

Şekil 9. 15. F2 Numunesinin Yorulma Kırık Yüzeyleri SEM Fotoğrafları.

Şekil 9. 16. F2 Numunesine Ait Aşınma İzlerinin SEM Fotoğrafları.

Şekil 9. 17. R1 ve P1 Numuneleine Ait SEM Fotoğrafları.

Şekil 9. 18. P3 ve P4 Numuneleine Ait SEM Fotoğrafları.

Şekil 9. 19. P4 Numunesine Ait SEM Fotoğrafi.

Şekil 9. 20. P1 Numunesinin X-RAY Difraksiyonu.

Şekil 9. 21. R1 ve P4 Numunelerine Ait Gerilim-Çevrim Sayısı Diyagramları.

Şekil 9. 22. R1 ve P4 Numunelerine Ait Gerilim-% Uzama Diyagramları.

Şekil 9.23. P4 Numunesinin Yorulma Kırık Yüzeyinin SEM Fotoğrafi.

Şekil 9.24. R1 ve P4 Numunelerinin Aşınma Grafikleri.

Şekil 9.25. % P Değişimine Bağlı Numunelerin Çekme Dayanımı - Yüzey Sertliği İlişkileri.

Şekil 9.26. % P Değişimine Bağlı Numunelerin Ağırlık Kaybı - Yorulma Ömrü İlişkileri.

Şekil 9. 27. M Numunesine Ait Sem Fotoğrafi.

Şekil 9. 28. M Numunesi Matrisinin Kimyasal Kompozisyonunun EDS Analizi.

Şekil 9. 29. Şekil 9. 27' de 3 Numaralı Bölgenin Kimyasal Kompozisyonunun EDS Anal.

Şekil 9.30. Şekil 9. 27' de 2 Numaralı Bölgenin Kimyasal Kompozisyonunun EDS Anal.

Şekil 9.31. Şekil 9. 27' de Beyaz Fazın EDS Analizi.

Şekil 9.32. Şekil 9. 27' de Siyah Fazın EDS Analizi.

Şekil 9.33. R1 Numunesine Ait SEM Fotoğrafi.

Şekil 9.34. Şekil 9. 33' deki R1 Numunesine Ait (Zn,Cu)S Fazının EDS Analizi.

Şekil 9.35. M2 Numunesine Ait Yorulma Kırık Yüzeylerinin SEM Fotoğrafları.

Şekil 9. 36. R1 ve M Numunelerinin Aşınma Grafikleri.

Şekil 9. 37. R1 ve M Numunelerinin Aşınma Yüzeyleri SEM Fotoğrafları.

Şekil 9. 38. % Fe Değişimine Bağlı Sertlik - Çekme Dayanımı; Yorulma -Ağırlık Kaybı İlişkileri.

Şekil 9. 39. % P Değişimine Bağlı Sertlik - Çekme Dayanımı; Yorulma - Ağırlık Kaybı İlişkileri.

Şekil 9. 40. % Mn Değişimine Bağlı Sertlik-Ç. Dayanımı; Yorulma -A.Kaybı İlişkileri.

TABLÖLAR

Tablo 2. 1. Bakırın Fiziksel Özellikleri.

Tablo 2. 2. Bakırın Döküm Alaşımlarından Bazılarının Özellik ve Kullanım Alanları.

Tablo 2. 3. Bakırlı Döküm Alaşımlarının Sınıflandırılması.

Tablo 3. 1. Bazı Bronzların Bileşim ve Mekanik Özellikleri.

Tablo 3. 2. Kalay Bronzları Yoğurma Alaşımlarının Kimyasal Bileşim. ve Kullanım Yerleri.

Tablo 3. 3. Normlaştırılmış Kalay Bronzlarının Mukavemet Özellikleri.

Tablo 3. 4. Dökme - Kalay Bronzları.

Tablo 3. 5. Bazı Kalay Bronzlarının Fiziksel Özellikleri.

Tablo 3. 6. Bronz Alaşım Türünden P- Bronzunun Mekanik Özellikleri ve Kullanım Alanları.

Tablo 6. 1. İki Cismin Elastik Temas Alanı Üzerinde Basınç Dağılımı.

Tablo 6. 2. Archard, Rabinowicz ve Tabor' a Göre Adhesiv Aşınma veya Geçiş.

Tablo 6. 3. Archard ve Hirst' e Göre Farklı Malzeme Çiftlerinin Aşınması

Tablo 8. 1. Deneylerde Kullanılan Numunelerin Kimyasal Analizleri.

Tablo 9. 1. F1' de Oluşan Fazların X- Işını Piklerine Katkıda Bulunan Kristal Düzlemlerinin Miller İndisleri.

Tablo 9. 2. F2' de Oluşan Fazların X- Işını Piklerine Katkıda Bulunan Kristal Düzlemlerinin Miller İndisleri.

Tablo 9. 3. F1 ve F2 Numunelerinin Mekanik Özellikleri.

Tablo 9. 4. P1' de Oluşan Fazların X- Işını Piklerine Katkıda Bulunan Kristal Düzlemlerinin Miller İndisleri.

Tablo 9. 5. P İçeren Numunelerin Mekanik Özellikleri.

GİRİŞ

Bakırın kalayla oluşturduğu alaşımlara kalay bronzu veya kısaca bronz adı verilir. Bronzlar diğer bakır alaşımları olan pirinçlere göre daha yüksek mukavemet değerlerine, aşınma direncine, korozyona karşı dayanıma ve daha iyi kayma özelliklerine sahiptirler. Özel bronzların korozyon dayanımı, mekanik özellik ve mukavemetinin yanısıra iyi elektrik iletkenliğide vardır.

Bakırla, 520 °C ile 586 °C' ler arasında en çok %15,8 oranında Sn eriterek α -katı eriyiklerini oluşturur. Düşük sıcaklıklarda kalayın erime yeteneği gittikçe azalır. Oda sıcaklığında sıfıra kadar düşer. % 10 Sn içerikli bir bronz 1000°C ile 850°C' ler arasında katılaşır. % 15-40 arasında Sn içeren bronz alaşımlarının katılaşma durumları çok karmaşıktır, bugün için bile tamamen açıklığa kavuşturulamamıştır (Yıldırım,1984).

Kalay bronzları, yüksek kimyasal dayanıklılıkları nedeni ile kimya endüstrisinde ve gemi inşaatında büyük ölçüde kullanılır. Yatak malzemesi olarak da kullanılan kalay bronzları; deniz suyuna dayanıklı mil kaplamaları, elektro teknikte yaylar, saat endüstrisinde zemberekler, makina imalatında korozyona ve fazla yüke maruz kalan dişli çarklar, akslar, conta yuvaları, fleksibel borular ve yaylanma parçaları bu alaşımlardan imal edilir. Dökme kalay bronzları DIN 1705 ile normlaştırılmıştır. İçerdikleri Sn nedeni ile bronzlarda titreşim sönümü çok azdır. Bu özellikleri bakımından başka hiç bir metal kalay bronzlarından üstün değildir (Bargel vd., 1980).

Makina parçaları olarak yataklar, birbirine sürten metal parçalarından en önemli örnekleri oluştururlar. Yağlı yataklarda, devinen parçalar arasındaki yağ filmi yeterli ise yatak alaşımının ne olduğu, o kadar önemli değildir. Yüzeye sıkıca yapışan filmleri meydana getiren kimyasal reaksiyonlar yüzey aşınmasını önler. Fakat film kırılgan ve yüzeye gevşek bağlı ise, aşınma büyük miktarda hızlanır. Çünkü sürtünme hareketi sırasında filmler çatlar ve malzemeye bağlı oldukları yerden koparlar (Domke, 1987).

Cu-Sn alaşımından meydana gelen bronz yataklarda % 6-12 miktarda kalay vardır (Kurt vd.,1996). Makina ve otomobil endüstrisinde yüksek mekanik zorlamalara karşı koyabilen, aynı zamanda iyi kayma özelliği ve aşınma dayanımı ile birlikte korozyon dayanımını bir arada bulundurabilen malzemelere ihtiyaç doğmuştur.

Geleneksel olarak bu talepler Sn bronzu gibi CuSn_8 veya özel prinç gibi

$\text{CuZn}_{31}\text{Si}_1$ ve $\text{CuZn}_{40}\text{Al}_2$ gibi yataklarla karşılanmaktadır. Son zamanlarda bunların sunduğu olanakları aşan yüksek mekanik değerler için daha fazla eğilim ortaya çıkmıştır. Wieland-G66, Ni-Sn bronzu aşırı zorlamalı ortamlara uygun yatak malzemesi olarak takdim edilmektedir (Bögel vd., 1991).

Zn ve Pb destekli kalay bronzları aşırı yükleme ve aşınma dirençleri nedeni ile makina yapım ve yatak malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmıştır. Otomobil motorlarındaki birleşen çubukların küçük uç yatakları, krank mili yatakları, marş motoru burçları vb. bunların çoğunlukla kullanıldığı uygulama alanlarıdır. Günümüzde aşırı yük ve sıcaklıklar altında çalışan otomobil parçalarının; ileri teknoloji malzemelerinden, yüksek yüklenme kapasiteli ve iyi sürtünme direnci gösteren yatak malzemelerinden yapılması gereği doğmuştur. sahip yatak malzemelerini gerekli kılmıştır (Yamamoto vd., 1994).

Hareket halinde olan makina elemanlarında yatak gereksinimi, malzeme yönünden pahalı olan makina elemanını (mili) korumaktan kaynaklanır. Bu da milden az sertlikteki % 6-12 Sn içeren Cu-Sn alaşımları (ASTM.B.438) CuSn_8 , $\text{CuZn}_{31}\text{Si}_1$ ve $\text{CuZn}_{40}\text{Al}_2$ ya da sinterlenmiş grafit içeren Cu-Sn (ASTM.B.438,439) yataklarla karşılanmıştır (Feindt, 1991).

Bronz, prinç, grafit (Cu alaşımları) Zn-Al, Sn-Pb vb. esaslı yatak alaşımları üzerindeki araştırma ve geliştirme çalışmaları günümüzde büyük bir ilgi ile sürdürülmektedir. Bu alaşımlara gösterilen ilgi bunların ekonomik avantajları yanında üstün tribolojik ve mekanik özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Gervais, 1987).

Bununla birlikte makina ve otomobil endüstrisinde bu malzemelerin kalitelerinin çok yönlü olarak geliştirilmesi yönünde talepler gün geçtikçe artmaktadır. Bu taleplere cevap verebilmek amacı ile Avrupa ve USA'da Wieland G66, K62, K65, ayrıca L49 ve S23 gibi malzemeler de geliştirilmiştir (Puckert, 1987).

Sürtünme katsayısı arttıkça alaşımların aşınma miktarında artmaktadır. Sürtünme katsayısı ise devir sayısı ile doğru orantılı olarak arttığı için, yatak alaşımları olarak bronzlar; düşük, orta ve yüksek hızlardaki kaymalı yatak uygulamalarında, yüklenme ve hız durumuna göre; örneğin, Sn-Zn esaslı Sn-Pb esaslı vb. alaşımlar şeklinde kullanılabilir.

Bronz alaşımlar üzerine son yıllarda yapılan çalışmaların çoğu yatak malzemeleri ile ilgilidir. Yapılan bu çalışmalara bazı örnekler verilecek olursa, Aleksev

(1996) 20G çeliği ve OTsS 5-5-5 bronzunda yaptığı çalışmada deformasyon bölgesindeki dış yüzeylerin aşınma direncinde etkili olduğunu göstermektedir. Gnanaraj ve Raman (1992) sinterlenmiş bronz yatakların yağlı aşınması durumunda metal kayıplarının nelerden kaynaklandığını incelemişlerdir.

Bögel ve Feindt (1991) G66 ve Ni-Sn içeren kaymalı yatak bronzların korozyon dirençleri ve kayma özelliklerini araştırmışlardır. Sciammarella ve Narayanan (1987) aşırı yüklerin altında çalışan burç malzemelerinin sürtünme katsayılarını yatak için 0,1; bronzlar için 0,30 ve çelik için 0,33 olarak belirlemişlerdir.

Ochiai vd., (1988) Nb // 3 Sn bronzunda; titanyum ilavesinin, gerilmeye ve ısı işlemin, mukavemet ve tane boyutlarına etkilerini araştırmışlardır.

Anon (1987) metal kaplama tekniğinde; aşınan parçaların yeniden kullanılabilir malzemeler haline getirilmesi için; demir, nikel, kobalt esaslı bronz veya tungsten karbür bileşimlerinin bulunması gerektiğini belirlemiştir.

Shapoxalov vd., (1991); Cu - Sn alaşımlarında organik bileşiklerin adsorpsiyonu-nun, adsorbe edici ve adsorbentin elektron yapısı sayesinde belirlendiğini göstererek, bunun bronz kaplama elektrotları için önemli katkı maddelerini mümkün kılacağını kanıtlamıştır.

Rybakova vd., (1989); malzemenin yüzey tabakalarının yapısal durumu, hareket tipi ve yükün etkisine göre, aktarma sistemindeki sorunlara değinilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Çünkü sürtünen malzemelerin yüzey tabakalarında yapısal halde önemli değişmelere olanak sağlayan, yükleme parametrelerindeki değişmelerdir. Bu değişim düzenleri, kusurları ve özellikleriyle karakterize olan malzemenin yapısal parametreleriyle ifade edilebilir (Rybakova vd.,1989).

Ara sıra işleyen makinaların bir çoğu, işletme halinde olan ve sürekli çalışan makinalarla karşılaştırılmayacak kadar fazla aşınmaya maruz kalmaktadırlar. Kayma hareketleri nedeniyle zorlanan makina parçaları için kayma yolunun hızı ve zorlanma süresi belirlenmelidir. Çiftlerden biri peryodik olarak yüklenir ve yükten alınır, kayma çiftlerinden daha ziyade biri zorlanıyor demektir. Böylece her iki kayma çifti için farklı kayma yolu geçerli olmaktadır (Göttner,1966). Bu durumu mil yatak ikilisi ve piston silindir ikilisinde gözlemek olasıdır.

Yatak iç yüzeyi için kayma yolu şu denklemle açıklanır; $S = v.t$ veya $S = \pi d.n.t$

Mil için kayma yolu şu denklemle ifade edilir; $S_{eff} = S.b / \pi.d$ veya $S_{eff} = b.n.d$

Ancak aşınmaya dayanıklı malzemeleri elde etmek için yumuşak ana faz içerisine (matris) sert fazların takviyesi gerektiği bilinmektedir (Aksoy vd., 1996). Bu amaçla α -Cu fazı içerisine, intermetalik bileşikler yapan Mn, P ve Fe elementleri değişik oranlarda ilave edilerek; sert faz oluşturmak ve sert fazın aşınmaya karşı olan direncinden, yumuşak fazın da enerji absorbe etme özelliklerinden yararlanılmıştır.

Bu çalışmada Zn ve Pb içeren kalay bronzuna % 0,011- % 0,224 arası P elementi ilave edilerek, değişen P oranının alaşım elementlerinin mikroyapısı, aşınma ve yorulma davranışlarına etkisi incelenmiştir. Ayrıca Zn ve Pb içeren Bu bronz numunelere Mn ve Fe elementleri de ilave edilerek mikroyapı, mekanik özellikler, aşınma ve yorulma davranışları üzerine etkileri incelenmiştir.

Numuneler; aşınma davranışları adhesiv aşınmaya, yorulma davranışları tekrarlı eğme zorlanması altında yorulma testlerine tabi tutularak araştırılmıştır. Mikroyapıları; SEM, EDS, Optik Mikroskop, X-Işınları Difraksiyonu cihazlarında yapılmıştır. Ayrıca yüzey sertliği ölçümleri, çekme mukavemeti ve enerji kapasitesi değerleri de tespit edilmiştir.

2. BRONZLARIN TEMEL ELEMENTLERİ

2.1. Bakır

Bakır adı Aes Cyprium (Kıbrıs Metali) teriminden gelmektedir. Arı bakır; yumuşaktır, kolayca işlenebilir, ısı ve elektrik iletkenliği yüksektir, kolaylıkla lehimlenebilir, soğuk işlenebilir, kaynak edilebilir ve kaplanabilir. Bakırın diğer bir özelliği de korozyona karşı dirençli olmasıdır. Bu nedenle buhar kazanlarında, besin, petro-kimya gibi sanayilerde boru, tüp vb. uygulamalarda kullanılmaktadır. Fakat tüm dünyada bakırın % 60-70 kadarı yalnızca elektrik, otomotiv ve inşaat sanayiinde tüketilmektedir (Ellis, 1948).

Bakırın mekanik özellikleri aşağıda ve fiziksel özellikleri de Tablo 2.1' de verilmiştir.

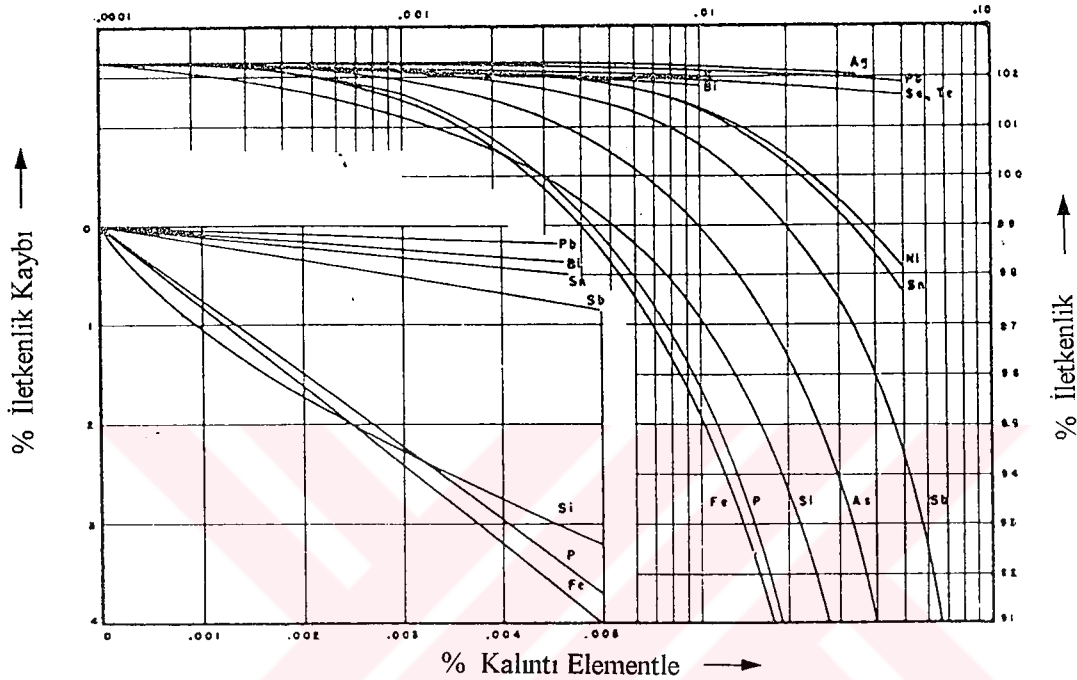
Akma dayanımı $\sigma_{0.2}$	70 N/mm ²
Çekme dayanımı σ_{ϵ}	200 N/mm ²
Sertlik, VHN	400
Uzama %	40
Young modülü, E	12000 N / mm ²
Özgül ağırlık	8,9 g/cm ³
Doğrusal genleşme katsayısı	17 x 10 ⁻⁶ m / m°C
Isıl iletkenlik	0,93 Cal cm / cm ² . ° C. Sc.

Bakırdaki oksijen, çelikteki eşdeğer biçimde davranır. Gaz boşlukları oluşturarak katılaşma çekmesine karşı çöküntüsüz düz bir kütle ortaya çıkarır. "Pitch" kelimesi dökümün bu çöküntüsüz oturmuşluğu için kullanılır. Ocakta artırılmış bakırda kalan % 0,04-0,05 düzeyinde oksijen bakırda çözünmediğinden, bakırın yapısında daima Cu₂O olarak bulunur. Bunu Cu-O denge diyagramından görebiliriz (Butts vd., 1954). Oksijen içeren bakırların döküm yapıları, Cu-Cu₂O ötektiklerini içerir. Cu-Cu₂O ötektik karışımı dallantılar arasına yayılır ve yüksek oranda büyütmede kolayca tanınan ötektik yapısını sergiler (Roast, 1953).

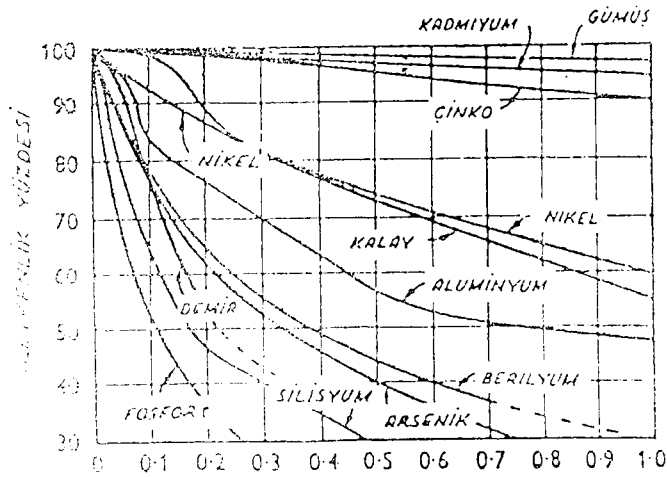
Tablo 2.1. Bakırın Fiziksel Özellikleri.

Atom Ağırlığı	63.57
Yoğunluk	8.93 gr/cm ³
Ergime sıcaklığı	1083 °C
Kaynama sıcaklığı	2325 °C
Özgül ısı	0.092 cal/g/ °C
Elektrik direnci	1.724 $\mu\Omega$ /c.c (20 °C' da)
Elastikiyet modülü	13100 kg/mm ²

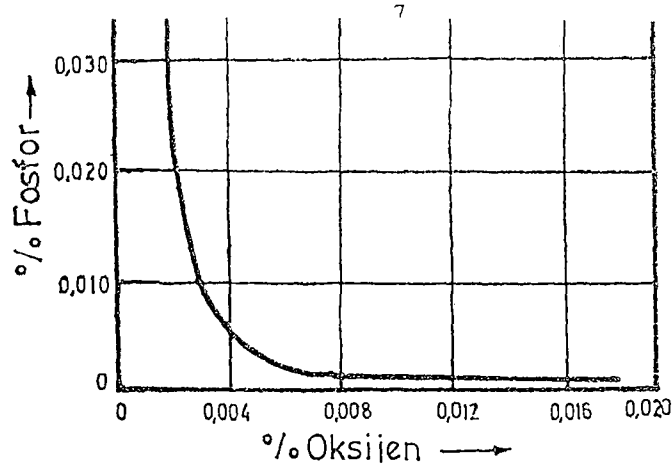
Bakırın içinde bulunan oksit, bakırın mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemez (Brooks,1990). Kaynaklama uygulamalarında kullanılacak bakırın gazlanmaya yatkınlığını önlemek için, fosfor, silisyum, lityum, magnezyum, berilyum, kalsiyum ve bor gibi oksijen giderici elementler kullanılır. Bunun sonucu oluşan oksitler curuf ile alınır. Bunların arasında en ucuzu fosfordur. Fosfor aynı zamanda iletkenliği de düşürür. Fosforlu bakırın sınıflandırılması için yapıda kalan mevcut bakırın miktarına göre yapılır (Brooks,1990).



Şekil 2.1. Oksijensiz Bakırın Elektrik İletkenliği Üzerine Eriyiklerin Etkileri. Alaşımların Saf Bakırda Bulunma Koşulları (Brooks, 1990).



Şekil 2.2. Yapıya Ilave Edilen Elementlerin Bakırın Elektrik İletkenliği Üzerine Etkisi.



Şekil 2.3. Fosforun Kalay Bronzundaki Oksijene Etkisi (ASM).

Fosforun iletkenliği düşürme etkisi, fosforun % 25'i oranında Fe katılımıyla azaltılabilir. Oluşan Fe_2O bileşiği, çözündürme ve çökelme, ısı işlemlerine uygun geldiğinden, dayanımı ve iletkenliği iyileştirebilir.

Çelikte Mn ve Si'nin gördüğü görevi bakırda fosfor görür. İletkenlik tüm saf metallerde olduğu gibi diğer elementlerin ilave edilmesi neticesinde büyük ölçüde etkilenir (Ersümer,1976).

Metalografik incelemelerde daha yüksek büyütme oranlarında Cu_3P çökeltileri çevrelerinde katlaşma olayı kolayca gözlemlenir. Bakırın yapısı içinde bulunan hidrojen ve oksijenin oranına göre bakırın yoğunluğu değişir. Katkısız arı bakırın kötü olan işlenebilirliğini artırmak amacıyla Pb, S, Se ve Te ilave edilir. Kurşun, çelikte olduğu gibi, bakırda da çözünmez ve dallantılararası yuvarlak çökeltiler oluşturur. Yumuşak ve zayıf olduğundan işleme sırasında kolayca kopup ayrılır. Cu-Pb ötekliği $326\text{ }^{\circ}C$ da eridiğinden sıcak işlemlere gelmez. Bakırın işlenebilirliği % 0,5 kadar kükürt katılımlarıyla yükseltilebilir. Çelikteki duruma eşdeğer biçimde bu kez de sülfür çökeltileri etkindir (Tekin,1984).

2.1.1. İletkenliği

Bakırın yapısında çözünen her element onun elektrik iletkenliğini düşürür. Oksijeni giderme sonucunda, % 0.04 kadar P bakırda çözünür, iletkenliğini çok düşürür ve kristal kafes sistemini bozar. Oluşan düzensizlik elektronların yayılmasını engelleyeceğinden, elektrik iletkenliğini olumsuz etkiler. Bakırın içinde eriyen elementler, çok küçük hacimlere dönüşerek ve bölgesel elastiki zorlanmalar meydana getirerek elektrik iletkenliğini azaltır (Brooks,1990).

2.1.2. Korozyon dayanımı

Bakır; atmosfer korozyonunun şiddetli koşulları altında meydana gelecek etkileri, demir esaslı metallerde teşekkül eden pasın aksine, havadaki rutubeti absorbe etmeyen bir oksit tabakasının teşekkülü sebebiyle, korozyona karşı çok iyi mukavemet gösterir. Oksit tabakası uzun zaman hava ve suyun etkisi altında kalırsa sülfür veya kompleks sülfat ve karbonatlar haline dönüşür. Kimyasal korozyon söz konusu olduğunda mükemmel bir dayanım gösterir. Bu özelliği, (bilhassa ısı transferinin söz konusu olduğu hallerde) bakırı kimyasal tesisler için uygun bir malzeme haline getirir (Dennis, 1987).

2.1.3. Mekanik özellikleri

Cr, Be, Ni, ve Si gibi alaşım elementlerini içeren bazı Cu alaşımlarının dayanımı ısıt işlemler ile artırılabilir. Isıt işlem ile artırılabilen üstün sertlik ve dayanıma sahip alaşımların bir üstünlüğü de, bunların yay üretimindeki gibi ısıt işlem öncesi daha yumuşak durumda iken biçimlenebilme kolaylıklarıdır (Tekin, 1984).

Bu alaşımların ısıt işlem uygulanabilenleri dışındakilerinin dayanımı, bileşim ayarlama-larıyla veya soğuk işlem ile artırılır. Al, S, Si, Fe ve Mn içeren Cu alaşımları diğer Cu alaşımları ile pirinçlerden daha serttir. Cu-Zn alaşımların da % Zn arttıkça dayanımı da artar. Bunların süneklik ve biçimlenebilirlik özellikleri de çok yüksektir. Cu ve alaşımları kolayca sıcak işlenebilirse bileşiminde Pb bulunan alaşımlar sıcak gevreklik gösterirler (Devis vd., 1956).

Sıcak işleme uygun gelen alaşımlar arasında % 85-63 Cu içeren pirinçler, Sn ve Al pirinçleri ve bronzları, Si-bronzu sayılabilir. İşlenebilirlik özelliği ön sıraya çıktığında en çok Pb katımlı alaşımlar tercih edilir. Kurşunun dışında S, Te gibi elementler de işlenebilirliği artırır. Bakırın döküm alaşımları arasında yaygın olarak kullanılanları; bronzlar, ya da kalay bronzu Cu-Sn alaşımlarıdır. % 4'e kadar Sn ve % 2' ye kadar Pb içerenleri asit, tuz çözeltileri ve yağ pompalarında kullanılırlar. % 8 ve daha yüksek Sn içerenleri dişli yapımında kullanılır. Yüksek kurşunlu kalay bronzları yatak malzemeleri yapımında kullanılır (Budingski, 1979).

Kızıl bronz, bir Cu, Sn, Pb, Zn alaşımıdır. Yüksek dayanımlı mangan bronzları Cu, Al, Mn, Fe ve Zn içeren alaşımlardır. Bunlar da kolayca dökülebilen yüksek dayanımlı alaşım lardır. Özel işlemler ile dayanımları yükseltilebilir. Örneğin Cu-Sn-P-Pb

grafit malzemesinin, şaft-metal teması durumunda yayılan grafitin katı yağlama etkisi ve yüksek sıcaklık altında aşırı yükleme karşısında, malzemenin; yapısal kararlılığına uygun konvensiyonel Pb bronzu ile kıyaslanması halinde daha iyi sürtünme ve aşınma özellikleri gösterdiği belirlenmiştir (Yamamoto vd.,1994).

2.1.4. Akma dayanımı

Cu alaşımlarında çoğunlukla % 0,5 kalıcı uzama değerindeki akma dayanımına yaklaşır. Duruma göre % 0,2 değerleri de kullanılır. Bakır alaşımlarında, soğuk işlemlerden sonra yapıda kalan gerilimler akma dayanımına yaklaşır ya da geçerse, gerilim korozyonu çatlaması olayı görülür. Bu gibi durumları önlemek için gerilme giderme tavı uygulanır. Bir parçanın gerilim giderme tarz öncesi veya sonrası gerilim korozyonu çatlaması yatkınlığı ASTM B 154 standardında verilen civa nitrat deneyi ile ölçülür (ASTM PART 6).

2.1.5. Yorulma dayanımı

Çoğunlukla sert alaşımların dayanımı yüksektir. Cu-Be; Cu-Ni-Si ve Cu-Si-P alaşımları şekil verildikten sonra ısıtma işlemiyle sertleştirilirler ve yorulma koşulları altında çalışan parçalar için kullanılırlar. Yorulma dayanımının temelinde bulunan; aşınma, dönme momenti, elektron fonksiyonu gibi sürtünmeli çalışan parçaların mikroskobik yapılarındaki periyodik değişikliklerin açıklanması gerekmektedir. Genelde ağır şartlar altında oluşan bu sürtünmeli prosesler, kuru kaymalı sürtünme durumunda, tabaka altı yorulmasının varlığını gösterirler (Zharin vd. 1993). Birçok Cu alaşımlarının, korozyon yorulmasına karşı göstermiş oldukları yüksek dayanım, bu alaşımların pompalama tesisi parçaları ve denizde kullanılan makineler gibi, metallerin aynı anda önemli derecede yorulmaya maruz kalan yerlerinde kullanılmasına imkan sağlar (Tulgar,1987).

2.1.6. Alaşım elementlerinin etkileri

Al, bakır içerisinde % 9,5 oranına kadar çözünebilir ve dayanımı yükseltici alaşım elementidir. Eğer Al alaşımda katkı olarak bulunmuyorsa, yüksek kurşunlu bronzlarda çok zararlıdır. Katılaşma sırasında Pb terlemesine yol açar (Tekin, 1984). Bu nedenle numunelerin alaşımlandırılmalarında Al özellikle kullanılmadı. Zn: pirinç ve bronzların

değişen oranlarda temel alaşım elementidir. Zn dayanımı sağlar ve kalay bronzlarında % 5-6' ya kadar kullanılır. Katkı olarak bulunduğu zararlı değildir. Yatak bronzlarında, genellikle % 5 oranında tutulur. Fe; silis ve mangan bronzlarına dayanımı artırmak için katılır ve Mn ile çok sert bileşikler oluşturur. Ana yapı içerisine gömülen bu bileşikler alaşıma aşınma direnci verirler. Ayrıca, Zhu' ya göre (1995) (ZA-35) alaşımının ısıl yayılma katsayısı diğer Zn -Al alaşımlarından daha düşük ve daha iyi bir aşınma direncine sahiptir. P; bakır ve alaşımlarına oksijen giderici olarak katılır. Bronzlarda sertliği artırmak amacıyla oksijen gidermek için gerekli miktarlardan daha fazla P katılabilir. Sn; bronzları oluşturmak için bakıra % 5-20 oranında katılır. Sn bakırı sertleştirir ve dayanımını artırır. Aşınma ve korozyon direncini yükseltir. Yüksek manganlı, mangan bronzu dışında Sn katkı olarak zararlı değildir. Pb otomotiv sanayinin kullandığı yataklar ile tarım ve uçak sanayiinde dişli pompaları için % 35'e kadar Pb-Cu alaşımlarında kullanılır. Bunun dışında düşük oranlarda (ca. % 1,5 Pb) dayancı etkilemeden işlenebilirliği artırır. Sn içeren alaşımlarda ise sürtünmeyi azaltıcı etkisi vardır (SAE Handbook, 1981).

Ni; bronzlara tane küçültücü ve tokluğu artırıcı alaşım elementi olarak katılır. Dayanımı ve korozyon direncini artırdığı gibi, aklık da verir. Pb' nin kalay içeren alaşımlarda sürtünmeyi azaltıcı etkisinin olduğu bilinen bir gerçektir.

ZA-35 alaşımının diğer Zn-Al alaşımlarında termal yayılma katsayısının daha düşük ve daha iyi bir aşınma direncine sahip olduğu görülmüştür (Zhu vd. 1995).

Tablo.2.2. Bakırın Döküm Alaşımlarından Kullanılan Bazılarının Özellik ve Kullanım Alanları (Tekin, 1984).

SAE Alaşım Simgesi	Kimyasal Bileşim	Döküm	Çekme Dayanım	Akma Dayanımı	Uzama %	Sertlik (BHN)	Kullanım Alanı
CA 836	85Cu, 5Sn, 5Zn, 5Pb	D	37	17	30	60	Vanalar Yataklar
CA 916	88Cu, 10Sn 2Ni	D	44	22	6	85	Dişliler
CA 937	80 Cu, 10Sn 10 Pb	D	37	18	20	60	Yataklar Pompalar
CA	89 Cu, 10Al 1Fe	D	75	27	25	140	Dişliler Yataklar

Tablo.2.3. Bakırlı Döküm Alaşımlarının Sınıflandırılması.

Sınıflar	İlave elemanlar	Düşünceler
Bakır	Toplamı %2 (max) olan arsenik , çinko, kadmiyum, silisyum, krom, gümüş ve diğer elemanlar.	İletken bakır dökümleri saf bakır, deokside bakır ve alaşımlı bakır.
Kurşunlu kırmızı pirinç	% 2-8 Zn,Sn % 6 (max) genellikle Zn'den az, Pb%0,5 (min)	Çoğunlukla döküm alaşımı olarak kullanılır; Ni eklenir (ASTM, B. 145)
Kurşunlu yarı kırmızı pirinç	% 8-17 Zn,% 6 Sn (max) Pb % 0,5 (min)	Genelde dök. alaşımları olarak kullanılır; bazen Ni ilave edilir (ASTM, B. 147).
Kurşunlu sarı pirinç	%17 Zn (min), % 6 Sn (max), Pb % 0,5 (min)	Döküm alaşımları olarak kullanılır. (ASTM,B. 146)
Kurşunlu kalay bronz	%20 Sn(max), Zn kalaydan az; %0.5 Pb' (min) ve %6 (max)dır.	Döküm alaşımlarına bazen Ni veya P ilave edilir.(ASTM, B. 143)
Yüksek kurşunlu kalay bronz	% 20 Sn (max), Zn Sn' den azdır; % 6 Pb (min)	Döküm alaşımlarına bazen Ni veya P ilave edilir.(ASTM, B. 144).
Kurşun bronz	% 30 Pb (min), Zn ise Ni' den azdır; % 10 Sn (max).	Özel taşıma veya yüklemeye tabi elemanlar için kullanılır.
Alüminyum bronz	% 5-15 Al,%10 Fe (max), Ni ve Mg ile beraber veya onlarsız olarak ; % 0,5 silisyum (max)	Umumiyetle döküm alaşımlarında kullanılır. Ni ve Sn eklenir. (ASTM, B. 149).
Silikon bronz	% 0,5 silisyum (min), % 5 Zn (max)	Döküm işlerinde alaşım olarak kullanılır, bazen ısıl işlemi yapılır. ASTM, b, B. 148.
Berilyum bronz	% 2 Be (min) veya Be-diğer elemanlar (Cu hariç)	Bu alaşımlarının çoğu ısıl işlemlidir
Mukavemetli mangan bronz	% 17 Zn (min), % 2 (min) toplamında: Al, Mg, Sn, Ni ve Fe kalay %5 (min), Pb %6 (min)	Çoğunlukla döküm alaşımları olarak "mangan bronz"adı ile ve diğer tica-ri adlar altında tanınır. ASTM,B.147
Kalay bronz	% 2-20 Sn,Zn Sn'den az miktardadır;% 0,5 Pb (max)	Döküm alaşımlarına bazen Ni veya P ilave edilir.ASTM,B.143
Nikel bronz	% 10 Ni (min), Zn Ni' den azdır; % 10 Sn (max); % 0,5 Pb (max).	Genelde dök. işleminde kullanılan bazen alman gümüşü de denir (ASTM, B 149).
Kurşunlu nikel bronz	% 10 Ni (min), Zn Ni' den azdır; % 10 Sn (max); % 0,5 Pb (min).	Genellikle döküm alaşımlar bazen Alman gümüşü de denir. (ASTM,B.149)
Kurşunlu Ni pirinci	% 10 Zn beyazlık verecek miktar Ni,% 0,5 Pb	Döküm alaşımları olarak kullanılır. ASTM, B. 149

2.2. Kalay ve Genel Özellikleri

Kalaya ait genel özellikler aşağıda sıralanmıştır.

Özgül ağırlık β -Sn	7.30 gr/cm ³	Erime sıcaklığı (°C)	232
Özgül ağırlık α -Sn	5.75 gr/cm ³	Isıl genleşme Kats.mm/mm°C.10 ⁶	20
Akma dayanımı Mpa	0.1	Elektrik öz direnci x 10 ² mm ² /m	11

Çekme dayanımı Mpa	1,5	Isıl iletkenlik cal/cm ⁰ C	0.159
% Uzama	5.0		

Kalayın erime noktası düşüktür. Oda sıcaklığında gerinim ya da işlem sertleşmesine uğramadan kolayca biçimlenebilir. Olağan ak kalay, tetragonal bir yapıya sahiptir. Kalayın bir eş özdeği olan ak kalay, β -kalayı adıyla anılır ve 13°C üzerindeki sıcaklıklarda kararlı durumdadır. 13°C altında ise elmas yapısına sahip ve çok gevrek olan α -kalay ya da gri kalay kararlıdır. β -kalay α -kalaya dönüştüğünde, özgül ağırlık 7,30'dan 5,75'e düşer. Bu değişim bir genleşmeyi ortaya çıkarır. β -kalay soğutulduğunda α -kalaya dönüşürse bunun sonucunda doğan genleşme, kalay ya da kalaydan yapılmış eşyaların toz olarak parçalanıp dağılmasına yol açar. Bu olay kalay belası ya da kalay hastalığı gibi adlarla bilinir. Sıcaklık yeniden 13°C üzerine çıkarıldığında α -kalay β -kalaya dönüşür. Fakat toz durumunu korur. Kalayın hacim merkezli tetragonal (hmt) yapısı, birçok kayma çizgisi içinde kayma ile bozunur. Bu bozunma aynı zamanda ikizlenme yoluyla da olur (SAE Handbook, 1981).

Kalayın en önemli özelliklerinden biri de yüksek korozyon direncidir. Hava korozyonuna dayanımı çok yüksektir. Sn tüketiminin % 15'ini lehim, % 8 ile % 10'unu yatak alaşımları tutar. Yüksek korozyon direncinden dolayı, bakır bronz ve alüminyum bronzu da bazı uygulamalarda Sn ile kaplanır (Budingski, 1979).

2.3. Çinko ve Genel Özellikler

Çinko'ya ait genel özellikler aşağıda verilmiştir.

Çekme Dayanımı σ_q	138 Mpa
Uzama %	50
Özgül ağırlık	7.14 gr/cm ³
Ergime sıcaklığı	420°C
Akma sınırı	-
Genleşme Katsayısı	Çok yüksektir

Zn oda sıcaklıkları altında bile gerinim sertleşmesine uğrayan birkaç metalden biridir. Oda sıcaklıklarında düşük gerilimler çinkonun yapısında kalıcı bozulma meydana getirir. Bu nedenle tekbaşına Zn metalinin bir yapı elemanı olarak kullanımı çok kısıtlıdır. Çinko metalinin temel kullanım nedeni, onun yüksek korozyon direncine dayanımıdır. Çinko tüketiminin yaklaşık % 25 kadarı bakır alaşımları üretimine girer. Çinko levhanın en çok kullanıldığı alan pil ve akü sanayiidir (Cast Zinc, 1972).

2.4. Kalay - Bakır Alaşımları

Sn-Cu denge diyagramının kalay ağırlıklı kısmında görülebileceği gibi Sn ve Cu % 0,7 değerinde bir ötektik oluştururlar. Ötektik yapı ince Cu_6Sn_5 katmanları ile yaklaşık % 100 aralaktaki kalaydan oluşur. Ötektik altı alaşımlarının yapıları primer Sn ile dallantılar arasına çökelen ötekiği içerir. Ötektik üstü alaşımlarda ise yapı, büyük iğnemsî görünümlü birincil Cu_6Sn_5 çökeltileri ile $\text{Sn}(\omega)+\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ötekiğinden oluşur. % 1-8 Cu içeren kalay alaşımlarında η çökeltileri oluşur. η ; Cu_6Sn_5 bileşiğidir. Hekzagonal kafesli olan ve ince uzun çubuklar biçiminde çökelen η fazı yatak alaşımlarından babbittlerin (babbitt) belirgin fazıdır. % 5 Cu-Sn alaşımında η çökmesi 350 °C' de başlar ve 227 °C' da tamamlanır (ASM, 1992).

2.5. Kalay - Çinko Alaşımları

Sn-Zn dizgesinde % 8,9 Zn bileşiminde bir ötektik vardır. Bu ötektik hemen hemen arı Zn ile çinkonun Sn içindeki katı çözeltisinden oluşur. İnce iğne biçimli Zn; Sn-Zn katı çözeltisinin anayapısı içinde dağılmış durumdadır. % 8,9'dan fazla Zn içeren alaşımlar aynı zamanda iğnemsî dallantılar biçiminde birincil Zn çökeltilerini de içerir (ASM, 1990).

2.6. Kalay - Kurşun Alaşımları

Sn-Pb denge diyagramını ve değişik bileşimdeki alaşımları yapı değişimlerini Şek. 4.17'de görmüştük. Ötektik bileşimli alaşımın (% 61, 9 Sn) yapısı, katılaşma sırasındaki soğuma hızına bağlı olarak katmanlı görünümlüdür. Birbirini izleyen katmanlar sırasıyla bir kalayca zengin α katı çözeltisi (% 2,5 Pb), bir Pb'ce zengin β katı çözeltisinden (% 19,5 Sn) oluşur. Soğuma hızı (katılaşma) arttıkça katmanlı ötektik yapı, yerini yuvarlak taneciklerden oluşan ötektik yapıya bırakır. Katmanlı ötektik yapıya ötektik sıcaklığının ($T_E = 183^\circ$) yakınında bir ısıtma işlemi uygulanırsa, katmanlı ötektik yuvarlak tanecikli ötekiğe dönüşür (ASM, 1990).

2.7. Bakır- Kalay - Çinko Alaşımları

% 30 Zn-Sn alaşımına az bakır katılırsa, ötektik yapı kabalaşır ve Zn büyük levhalar biçiminde oluşur. Bakır alaşımının yapısında Cu_6Sn_5 , Cu_5Zn_8 ve CuZn_3 bileşiklerini de oluşturur. Bu bileşikler yan yana ve birlikte çöklerler. Altıgen pirizmaya benzer biçimler doğururlar. Cu_6Sn_5 , çoğunlukla, Cu_5Zn_8 bileşikleri içine gömülü gibi gözlemlenir (Schumann, 1964).

3. BRONZLAR

3.1. Giriş

Bronz adının çağdaş kullanımı; pirinçler dışında kalan ve temel alaşım elementi olarak yaklaşık %12' ye kadar Sn içeren tüm bakır alaşımlarını kapsamaktadır. Bronz bileşimi ve yapısı gereği pirinçten daha yüksek dayanımlı alaşım türünü belirler (Bargel vd.,1984). Bronzlar genellikle Cu-Sn, Cu-Al, Cu-Si ve Cu-Be alaşımlarıdır ve herbiri ayrı ayrı temel alaşım elementinin adını alarak anılır. Örneğin Cu-Al alaşımları için alüminyum bronzları, Cu-Si alaşımları silisyum bronzları diye bilinir. Benzer biçimde Cu-Sn alaşımları da bronz genel adından çok kalay bronzları diye anılırlar. Tüm bronz türleri birincil alaşım elementlerine ek olarak P, Pb, Zn ve Ni elementlerini de içerebilirler (Yıldırım,1984). Değerilen türlerin bazıları Tablo 3.1' de görülmektedir.

Tablo 3.1 Bazı Bronzların Bileşim ve Mekanik Özellikleri

Alaşım	% Bileşim							Çek. Day. 10^7 N / m^2	Akma Day. 10^7 N / m^2	50 mm de % Uzama
	Cu,	Zn,	Sn,	Pb,	Mn,	P,	Fe			
Kızıl bronz	85	5	5	5				23	12	25
Mn-Bronzu	58	39,7	1Al		0,3			48	19	30
Kızıl pirinç	1							25	7	48
	85	15								

3.2. Kalay Bronzları

Kalay bronzları, yüksek kimyasal dayanıklılıkları dolayısıyla kimya endüstrisinde ve gemi inşaatında büyük ölçüde kullanılır. Yatak malzemesi olarak da kullanılan kalay bronzları, deniz suyuna dayanıklı mil kaplamaları; elektroteknikte yaylar; su pompalarından vanalara, küçük dişlilerden boru bağlantı parçalarına kadar yaygındır. Saat endüstrisinde zemberekler; makina imalatında korozyona ve fazla yüke maruz kalan dişli çarklar, akslar, conta, yuvaları, fleksibil borular ve yaylanma parçaları bu alaşımlardan imal edilir (Schumann,1965).

Cu-Sn denge diyagramının sanayide kullanılan bronzların bileşimlerini kapsayan bir bölümü Şekil 4' de görülmektedir. Kalayın α -katı eriyiği içinde 798°C de çözünürlüğü % 13,15 Sn dir. Bu çözünürlük oda sıcaklığında yaklaşık % 1 Sn değerine düşer. 798°C de peritektik sıcaklık bulunur.

Bu sıcaklıkta α +sıvı fazları karışımı peritektik dönüşüm sonucu β katı eriyiğini oluşturur (Eisenkolb, 1966).

586 °C' a kadar soğutmada β fazından, bileşime bağlı olarak, α yada γ çökebilir. 586 °C bir ötektoid sıcaklığıdır. Bu sıcaklıkta β fazı ötektoid tepkimeyle (α + γ) ötektoid karışımına dönüşür. 520°C diğer bir ötektoid sıcaklıktır. Bu sıcaklıkta γ fazı bir başka ötektoid karışımı olan (α + γ) fazlarına dönüşür. δ fazı, $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ bileşiğidir. Çok sert ve gevrekli. Mikroskop altında açık mavi renkte görünür. Bu δ fazı da bir diğer ötektoid tepkime ile 350 °C de (α + γ) faz karışımına dönüşür. ϵ fazı, Cu_3Sn bileşiğidir (Dews ve Pitman, 1956).

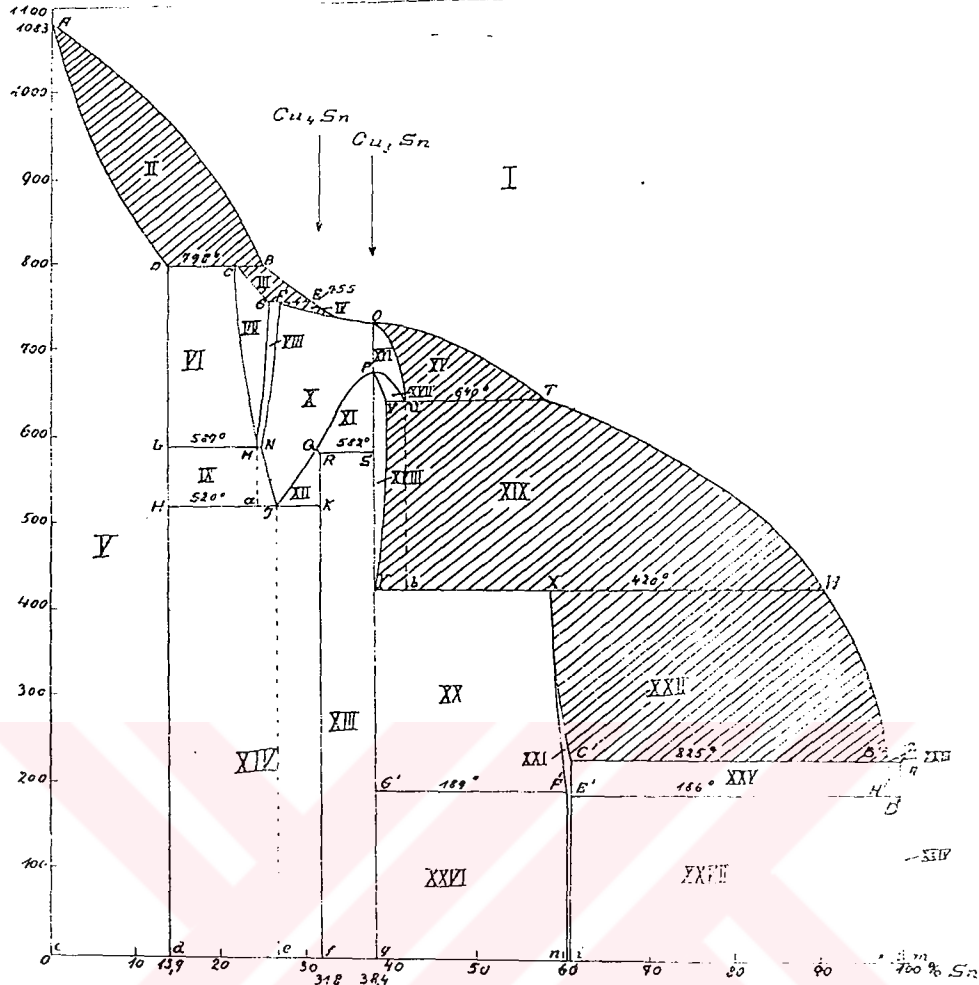
Kalay bronzlarının diğer farklı yanı da α pirinçleri benzer biçimde tok ve sünek oluşlarıdır. Bu nedenle soğuk işlem uygulanabilir. Yapıda δ fazı belirdikçe ve arttıkça bronzların yapısı gevrekleşir. Soğuk işlenecek alaşımların yapılarında δ fazı bulunmamalıdır (Bailey ve Samules, 1971).

Dökme kalay brozları DIN 1705 ile normlaştırılmıştır. İçerdikleri Sn nedeni ile bronzlarda titreşim sönümü çok azdır. Bu özellikleri bakımından başka hiçbir metal kalay bronzlarından üstün değildir. Normlaştırılmış kalay bronzlarının DIN 17 662' ye göre kimyasal bileşimleri ile kullanılma yerleri Tablo 3.2'de mukavemet özellikleri de Tablo 3.3' de, verilmiştir.

Tablo 3.2. Kalay Bronzları Yoğurma Alaşımlarının Kimyasal Bileşimleri ve Kullanılma Yerleri (DIN 17 662 ye göre)

Kısa İşaret	Kimyasal Bileşim					Müşade edilen gayri safiyetler, %			Kullanılma Yerleri
	% Sn	% Zn	%Pb	%P	Cu	Pb	Zn	Diğer.	
SnBz 2	1-2	-	-	0.1	Kalan	0.05	0.3	0.2	Kondenser-flexible borular, civata ve yaylar
SnBz 4	3-5	-	-	0.4	Kalan	0.05	0.3	0.2	Civatalar
SnBz 6	5-7	-	-	0.4	Kalan	0.05	0.3	0.2	yaylar, membranlar, tel dokuma
SnBz 8	7.5-9	-	-	0.4	Kalan	0.05	0.3	0.2	Sn Bz 6 gibi kayınlı elemanlar
MSnBz 4	3-5	3-5	-	0.1	Kalan	0.05	-	0.2	Sn Bz 6 gibi
MSnBz 6	5-7	5-7	-	0.1	Kalan	0.05	-	0.2	M Sn Bz 4 gibi yüksek mukavemetli
MSnBz 4 Pb	3-5	3-5	3-5	0.1	Kalan	-	-	0.2	Her cinsten kayınlı elemanlar, burçlar

Kalay bronzları yüksek dayanım, tokluk, yüksek korozyon direnci özellikleriyle düşük sürtünme katsayısı ve gerilim korozyonu çatlaması göstermemeleri nedeniyle seçilirler. Geniş biçimde diyafram, körük, pim, debriyaj balataları ve yay yapımında kullanılırlar (Böhm, 1968).



Şekil 3.1. Cu - Sn İkili Denge Diyagramı (Saunders, 1990)

Bronzlarda bir bölüm kalay yerine kalay fiyatının bakırınkinin dört katı olmaması dolayısı ile; bu mahzuru bir dereceye kadar gidermek için çok bileşenli kalay bronzlarında ve kızıl döküm alaşımlarında bir miktar kalayın yerine ucuz çinko konulur. Katı yağlayıcı kalay bronzunun tribolojik karakteristiklerinin sürtünme katsayımı önemli ölçüde azalttığı ve aşınma direncini artırdığı gözlenir. Sürtünme yüzeyinin % 30 'unu katı yağlayıcı teşkil ettiği zaman aşınma direnci artmaktadır. Katı yağlayıcıların başlıca aşınma mekanizması adhesif aşınma ve yorulma aşınmasıdır. Katı yağlayıcı yatağın yüzeyinde oluşan transfer filini bu yatakların performansını geliştirir başlıca faktördür. Kalay bronzları yüksek işlenebilirlik gerektirdiğinde bileşimlerine kurşun katılır. Hatta yüksek kurşunlu kalay bronzu % 25'e dek kurşun içerebilir. Bu alaşımı çoğunlukla yatak alaşımı olarak kullanılırlar (Forrester, 1960).

Tablo 3.3 Normlaştırılmış Kalay Bronzlarının Mukavemet Özellikleri (DIN 1705)

Alaşımanın Adı	Kısa İşaret	Durum	Çek. Muk. N/mm ²	Kopma Uzaması (%)	HB kg/mm ²
Kalay bronzları	SnBz 2	yumuşak	270	48	60
		yarı sert	320	23	90
		sert	80	10	105
		yay sertliği	480	3	120
	SnBz 4	yumuşak	330	54	75
		yarı sert	400	30	110
		sert	460	14	130
		yay sertliği	600	5	150
	SnBz 6	yumuşak	370	58	85
		yarı sert	440	34	130
		sert	520	16	155
		yay sertliği	660	6	175
	SnBz 8	yumuşak	400	60	85
		yarı sert	480	36	130
		sert	560	18	155
		yay sertliği	720	7	175
Çok bileşenli kalay bronzları	MSnBz 4	yumuşak	350	50	75
		yarı sert	420	22	110
		sert	490	11	140
		yay sertliği	630	6	165
	MSnBz 6	yumuşak	390	52	85
		yarı sert	470	23	125
		sert	550	13	160
		yay sertliği	700	7	185
	MSnBz 4 Pb	yumuşak	330	40	70
		yarı sert	400	18	105
		sert	460	8	135
		Akma Sınırı N/mm ²	Çekme Muk. N/mm ²	Kopma Uzaması (%)	HB kg/mm ²
Dökme kalay-bronzları	G-SnBz 20	140/200	150/220	0/1	170/200
	G-SnBz 14	140/170	200/250	3/5	85/115
	G-SnBz 12	130/160	240/280	8/20	80/95
	G-SnBz 12	150/170	280/320	8/15	95/110
	G-SnBz 10	120 /150	220/280	15/20	60/75

3.3. Kalay Bronzu Türleri

3.3.1. Yalın kalay bronzları

Bunlar hem işlenik hem de döküm olarak kullanılırlar. İşlenik alaşımlar en çok % 7 Sn ve döküm alaşımları ise % 18'e dek Sn içerebilirler. İşlenik alaşımlar soğuk biçimlendiklerinden yapılarında δ fazı bulunmamalıdır. Çoğunlukla haddelenmiş şerit çekilmiş çubuk ve türbin kanadı olarak kullanılırlar. Döküm alaşımları çoğunlukla yatak alaşımı olarak seçilirler. İşlenik alaşımlarda istenmeyen δ fazı bu uygulamalarda, sürtünme direncini artırması amacıyla, özellikle istenir. Bunların yapıları sünek α fazı içine yerleşmiş δ fazından oluşur. Bazı kalay bronzlarının fiziksel özellikleri ve dökme kalay bronzların kullanma yerleri Tablo 27 ve 25'de verilmiştir (Keller ve Eickhoff, 1969).

Tablo 3.4. Dökme - Kalay Bronzları (DIN 1705' e göre)

Kısa İşaret	Kim. Bileşim		Müsaade edilen gayri safiyetler %			Kullanılma yerleri
	% Sn	% Cu	Sb	Fe	Diğerleri	
G-SnBz 20	20-22	78-80	0.5	0.3	1.0 Pb, 0.2 Mn, 0.01 Bi, 0.01 Al, 0.01 Mg, 0.05 S, 0.15 As, 0.5 Ni	Çanlar, eksenel yataklar, aşınma levhaları
G-SnBz 14	13-15	85-87	0.2	0.2		Kaymalı yataklar, sonsuz vida çark çemberi, yük. basınç armatürleri
G-SnBz 12 GZ-SnBz 12 ¹	11-13	87-89	0.1	0.2		Sonsuz vida çarkları, vidalı mil somunu
G-SnBz 10	9-11	89-91	0.1	0.2		Türbin çarkları, mak. muhafazaları, armatürler, sonsuz vida ve dişli çarkları

Tablo 3.5. Bazı Kalay Bronzlarının Fiziksel Özellikleri (Krist, 1976).

Kısa işaret	Elektr. iletken m/Ohm.mm ²	Özgül ağırlık g/cm ³	Alt ergime noktası °C	üst ergime noktası °C
Sn Bz 2	18	8,9	1005	1070
Sn Bz 4	12	8,9	950	1055
Sn Bz 6	9	8,8	910	1040
Sn Bz 8	7	8,8	875	1025
G-Sn Bz 10	6	8,8	840	1005
G-Sn Bz 14	5	8,8	800	970
G-Sn Bz 20	5	8,9	800	885

3.3.2. Fosfor Bronzları

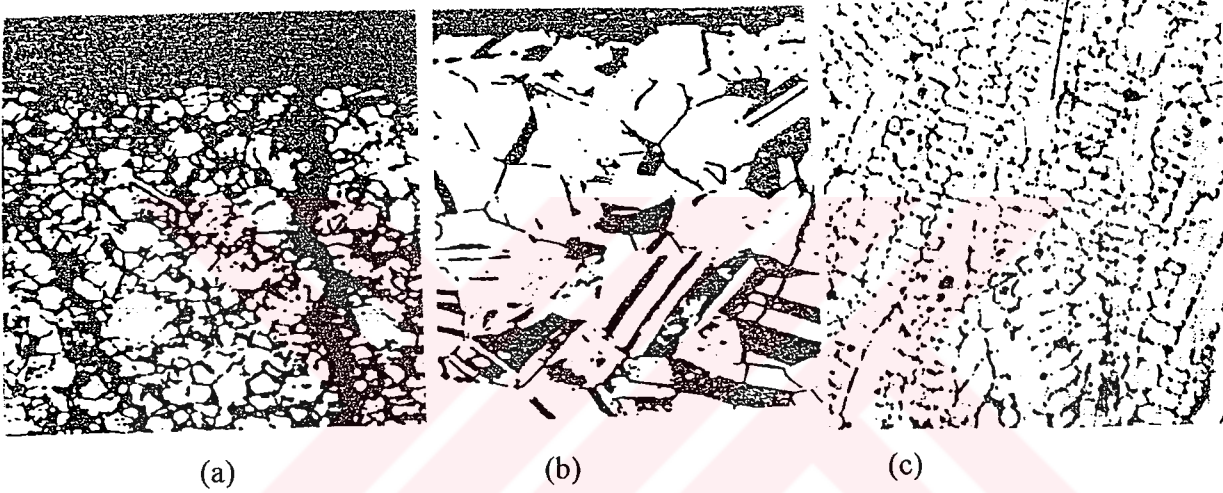
Bronzların eritme işlemleri sırasında Cu_2O oluşabilir. Erimiş metale kalay katıldığında, kalay, bakır oksiti indirger ve kendisi oksitini oluşturur. Kalay oksit ağırdır; eriyik alaşımda çözünmediğinden, kalay oksit parçacıkları katılaştıran yapıda sıkışıp kalırlar. Bileşiminde çinko bulunan bronz yapıları temizdir (Bargel ve Schulze, 1980). Zn içermeyen iki alaşım türünün mekanik özellikleri ve yaygın kullanım alanları Tablo 3.6 da görülmektedir.

Bakır alaşımlarında yenim çatlama çok rastlanan olgulardan biridir. Metalografik yapılarının incelenmesi ile çatlama nedenleri çıkarılabilir. Bunlar iki tür olarak görülebilir. Tanalar arası, gerilim korozyonu çatlama şeklinde ortaya çıkabilir.

Tablo 3.6. Bronz Alaşım Türünden P-Bronzunun Mekanik Özellikleri ve Kullanım Alanları.

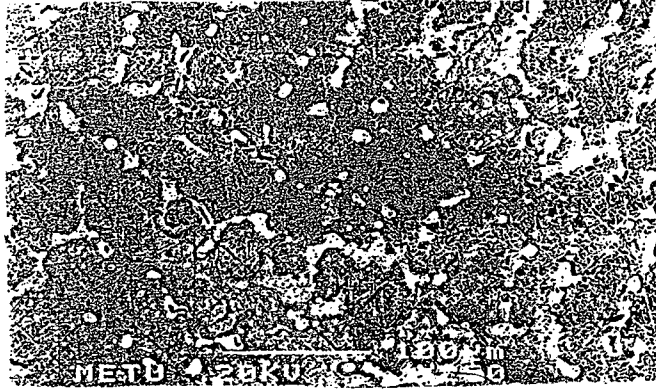
Alaşım	İşlem Durumu	% Bileşim Cu,Sn,Zn,Pb,P	Çekme Muk. 10^7 N/m^2	Akma Muk. 10^7 N/m^2	Uzama %	En Yaygın Kullanım Alanı
% 5 P Bronzu	İşlenik,soğuk işlenmiş	Kalay Bronzları 94.8,5,-,-0.2	63	61	5	Diyaframlaryaylar, elektrik düğmeleri
% 10 P Bronzu	işlenik,soğuk işlenmiş	89.8,10,-,-0.2	74	68	10	Elektrik parçaları Özel yaylar

Tanaler içinde ise korozyon yorulması çatlamları meydana gelebilir (Şekil 6 a ve b). Bakır alaşımlarının döküm yapılarında sık sık karşılaşılan yapı bozukluklarının biri de gaz gözenekleridir (Bargel vd.,1980). Bu durum ise Şekil 6 c' de görülmektedir.



Şekil 3.2 a, b,c Kalay Bronzlarında Gaz Gözenekleri (Siyah Noktacıklar Cu_2O Çökeltileri) (ASM, 1992).

Bu gaz gözenekleri kaynaklanmış bakır yapısında da kolaylıkla ayırt edilebilir. Bu tür yapılar hassas uygulamalar ve elektrik uygulamalarında kullanılan Cu ve alaşımlarında bulunmamalıdır. Ayrıca oksijensiz bakırın kaynak yapısı tüm gözenek ve bakır oksit çökeltilerinden uzak olmalıdır (Bargel vd.,1980). Bakır alaşımlarının yapısında oksitler gibi P kalıntıları da gözlemlenebilir (Şekil.3.3).



Şekil .3.3. SEM Mikrografından Alınan Dendrit ve Interdendritik Bölgelerde P Çökektileri.

Çinkodan daha da etkin bir oksijen giderici fosfordur. Fosfor, eriyiğe alaşım katımlarından önce katılır. Fakat % P arttıkça eriyik alaşımın gaz, özellikle hidrojen soğurması artar. Gazı almak için, eritme potası dibine mangan cevheri ve mermer kırıntıları yerleştirip CO gazı oluşturmak ya da azot gazı üfleme gerekir (ASTM Part 8).

Kalay bronzu diye anılan bronzların hemen hepsinin bileşiminde eser oranda (% 0,05 P), döküm öncesi oksijen giderme işleminden kaynaklanan P vardır. Bunlar zaman zaman yanlışlıkla fosfor bronzu diye adlandırılırlar (Yıldırım,1984). Teknik olarak fosfor bronzları bileşimlerine, alaşımlama amacıyla ve bilinçli olarak, % 0,1 - % 1,0 oranlarında P katılmış kalay bronzlarıdır. P özellikle çekme dayanımını çok artırır (Tekin, 1984).

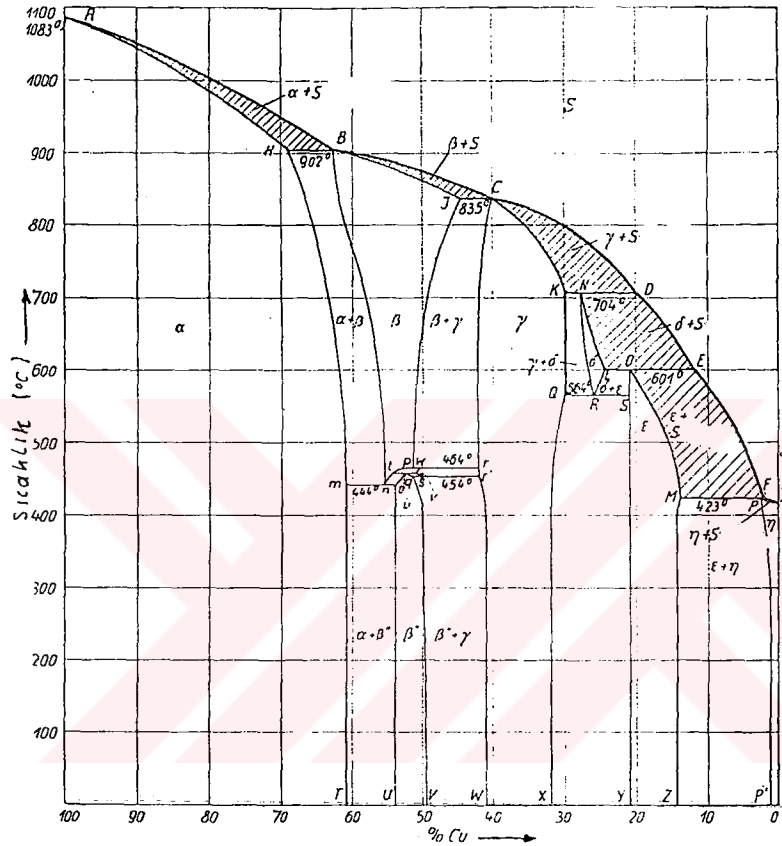
3.3.2.1. İşlenik fosfor bronzları

% 2,5 Sn ile % 8,5 Sn arasında kalay ve % 0,1 ile % 1,0 P ihtiva ederler. Yay alaşımı olarak kullanılan bir işlenik fosfor bronzunun bileşimi % 93-94 Cu, % 6 Sn, % 0,2 P dir. Fosfor bronzu döküm alaşımları ise; % 5 ile % 13 Sn arasında Kalay ve % 0,3 - % 1,0 P arasında fosfor içerirler. Bunlar özellikle düşük sürtünme katsayısı gerektiren makina parçaları için seçilir. Merkezkaç döküm yöntemiyle dökülen bu tür alaşımlardan en çok kullanılanlardan birisi de % 12 Sn, % 0,3 P içerir. Genellikle P % 0,3 oranını aştığında Cu_3P bileşiğini oluşturur. Bu bileşik α ve δ fazı ile birlikte bir üçlü ötektoid oluşturur (Bearing Metallograph, 1971).

3.3.3. Çinko içeren bronzlar

Bu alaşımların işlenik ve döküm türleri vardır. Zn içeren işlenik alaşımlar bileşimlerinde % 3'e kadar Sn ve % 2,5'a kadar Zn içerirler. En çok kullanılanların başında % 0,5 Sn, % 2,5 Zn içeren alaşım gelir. Ancak korozyon direncinin önemli olduğu uygulamalar

larda seçilir. Döküm yapısı oldukça yaygın katılaşıma gösterir ve $\alpha + \delta$ ötektoid karışımından oluşan bölgecikler de içerir. Bu yapı soğuk işlem için uygun değildir. Fakat 590 °C üzerindeki sıcaklıklarda sıcak biçimlendirilebilir (Cast Zink, 1972). Bu tür arasında 86 / 7 / 5 / 2 (Cu / Sn / Zn / Pb) bronzu yatak alaşımı 260 °C 'a kadar düşük buhar basıncı uygulamaları için kullanılır (Mathewson ve Arnold ,1960).



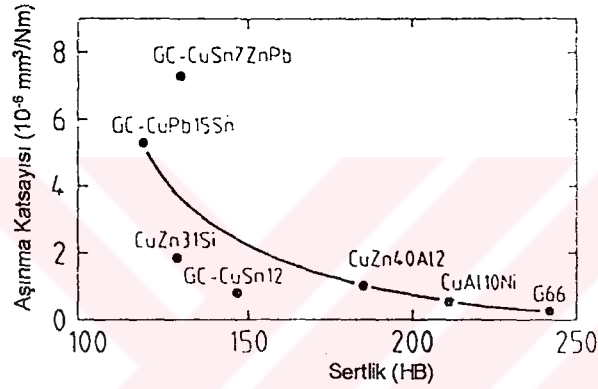
Şekil 3.4. Cu -Zn Denge Diyagramı (Miodownik, 1990)

3.3.4. Ni - İçeren bronzlar

Bu alaşımlar Cu-Sn-Ni-Zn dörtlü alaşımlardır. Bileşimlerindeki Pb en düşük düzeylerde tutulur. Yapıları diğer bronzlara benzer. Dallantılar arasında $Cu_{31} Sn_8$ bileşiği bulunan, Ni ve Sn içeren Cu katı çözeltisidir. Isıl işlemlerle sertleştirilebilirler (ASTM part 7) Cu ve Ni birbirleri içinde her oranda tam olarak çözünürler. Bu nedenle tüm alaşımlar tek fazlıdır. Ni oranı arttıkça alaşımların korozyon direnci, çekme dayanımı, akma dayanımı ve yorulma ömrü de artar. En çok kullanılan Cu-Ni alaşımları % 15 Ni - % 20 Ni ve % 30 Ni içeren alaşımlardır (Ault ve Wiley, 1963).

4. YATAK ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ

Makina parçaları olarak yataklar, birbirine sürtünen metal parçalarından beklenen özelliklere en ilginç örnekleri oluştururlar. Herkesin bildiği yağlı yataklarda, devinen parçalar arasındaki yağ filmi yeterli ise yatak alaşımının ne olduğu pek o kadar önemli değildir. Fakat bazı makina aksamalarının ve motorların başlama, durma ve ağır koşullar altında çalışma gibi durumlarından, bu yağ filmi dayanıklılığını sürdürmeyebilir. Yağ kaybı, yüklemenin ve hızın attışı ile beraber artar. Yüzey pürüzlülüğünün etkisi ile istenmeyen durumlar ortaya çıkar (Grananaç ve Roman 1992).



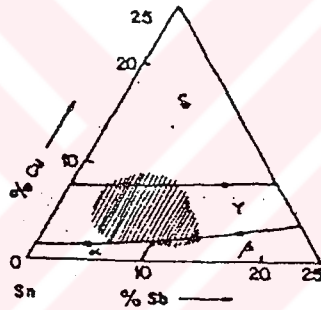
Şekil.4.1. Çeşitli Yatak Malzemelerinin Aşınma Katsayısı ve Sertlik İlişkileri (Bögel vd, 1991).

Yatak alaşımları yapıları açısından genellikle üç ana bölüme ayrılırlar:

1. Ak Metaller: Yumuşak bir anayapı içine gömülmüş sert parçacıkları içeren yatak alaşımlarıdır.
2. Kurşunlu bronz: Sert bir anayapı içine dağılmış yumuşak bir metalin parçacıklarını içeren tür olup; Bunlarda yumuşak metal kolayca, sıvama sonucu ince bir film oluşturulabilir.
3. Tek Metal ya da Tek Fazlı Alaşımlar: Yumuşak anayapı, aşın yükler altında kolaylıkla bozunabilmesi için istenir. Yüklerin hafif olduğu uygulamalar için Pb-Sn alaşımları, ağır yükler ve hafif hızların kullanıldığı uygulamalar için bronz ana yapı ve genel uygulamalar içinde kalay alaşımları kullanılır (Arslan vd., 1996)

4.1. Kalay Temelli Yatak Alaşımları

Ak metaller ya da ak yatak metalleri diye bilinen alaşımlar kalay temelli ve kurşun temelli yatak alaşımları diye ikiye ayrılırlar. Kalay temelli yatak alaşımları, genel adları olan babet metalleri ya da kısaca babetler diye bilinir. Sn - Sb - Cu alaşımları olan babetleri adlarını, onları ilk bulan Isaac Babitt'ten almışlardır. Babetler genellikle içten yanmalı motorlar için o denli başarılı sonuçlar verdiler ki ancak onların yapılarının yatak alaşımları için kullanılabileceği kanısı uzun yıllar yerleşti. Şimdilerde değişmiş bulunan bu kanıyla birlikte, bunlar hala çok kullanılan yatak alaşımları arasındadırlar. Babet metallerinin ana yapısı kalayca zengin bir üçlü katı çözeltisinden oluşur. Bu anayapı içerisine gömülmüş olarak da γ Cu_6Sn_5 ve β -Sb Sn fazlarının sert çökelti parçacıkları vardır. Genel bileşimleri ve olağan yapılarında beklenen fazlar Şekil 4.2'de görülmektedir (Bargel ve Schulze, 1980).

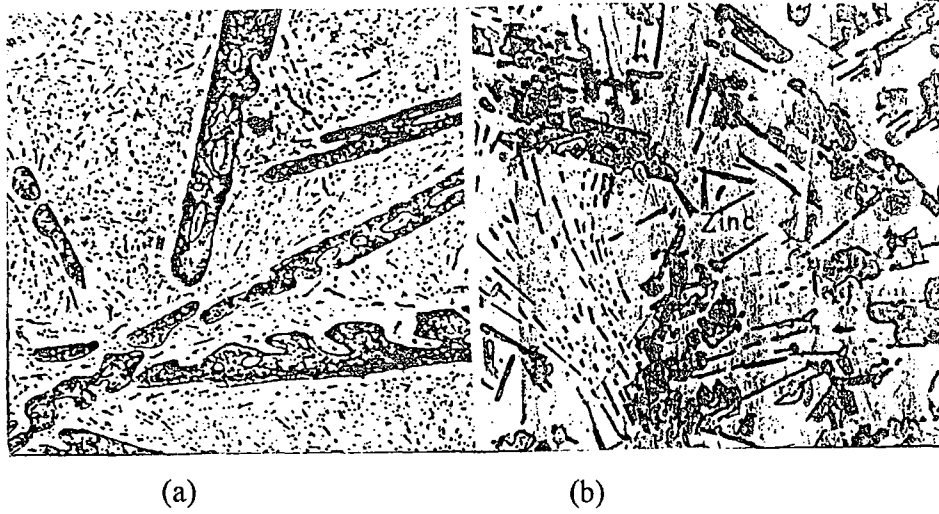


Şekil 4.2 Sn-Sb-Cu Üçlünün Sn Köşesi. Taranmış Bölge Babetlerin Bileşimlerini Kapsar.

1. Sb-Sn küpsüleri belirgin biçimleriyle tanınırlar. Bileşimlerinde % 8'den az Sb içeren alaşımlarda bu küpsüler oluşmaz.
2. Cu_6Sn_5 metallerarası bileşiğinin çubuksu çökeltileri; Sb-Sn küpsülerinden daha serttir.
3. Cu ve Sb'nin Sn içindeki birincil katı eriyiği sıcaklık düşmesiyle azalan çözünürlükten ötürü bu fazın içinde her zaman ince Sb-Sn ve Cu_6Sn_5 çökeltileri görülebilir.

Sn esaslı yatak alaşımlarına, ucuzluğundan ötürü Pb bilinçli olarak katılır. Kurşunun yüksek olan Sn esaslı yatak alaşımlarının dayanıcı düşük olduğundan uygulama yükleri de düşük olmaktadır. Pb kalayla kısıtlı çözünürlüklü katı eriyikler oluşturur. Ötektik yapıda katı eriyikleri içerir. Bazı uygulamalarda Zn katılarak oluşturulan yatak alaşımları kullanılır (Böhm, 1968). Bunların CuZn_3 veya Cu_3Zn_8 metallerarası bileşikleriyle yatakları

Zn çözeltilerinin içinde dağıldıkları bir Sn-Zn ötektik yapısı vardır (Şekil 4.3. ve 4.4.).



Şekil 4.3. a) Sn-30 Zn; Ötekti Matriste Zn Partikülleri (Beyazlar Sn) ve b) Sn-28 Zn-2 Cu; Kalay Matrisinde Cu_6Sn_5 ve Cu_5Zn_8 İğnemsî Yapıları (Thwaites vd, 1992).



Şekil 4.4. Cu_6Sn_5 ve Cu_5Zn_8 Fazlarının Birbirleri İçinde Çökmesi ve Çevrelerinde Oluşan Zn Fazı (Thwaites vd, 1992).

Kalay bronzlarının dayanımlarını artırmak için, kalay bronzunun yüzeyine iyon gönderilerek yüzeyin sertliği yaklaşık % 56 oranında artırılır. Bunun yanında aşınma direnci de % 37 oranında yükseltilir (Wang vd., 1992). Bronz üzerine kullanılan alkali metallerde bazen ağır çalışma koşulları sonucu, bir tür vorulma çatlakları görülür. Bunlar yatak alaşımının yüzeyinde önce ince çatlaklar olarak belirir ve ilerledikçe arınır. Kaldırımına benzer bir çatlak ağı oluştururlar. İlerledikçe yatak alaşımı bozulur, parçalanıp kopmağa başlar. Bu tehlikeyi önlemek için şunlara dikkat etmek gerekir:

1. Bu sorun özellikle Pb içeren yatak alaşımlarında görüldüğünden, bu tür uygulamalarda kullanılan Sn esaslı yatak alaşımlarının Pb ilavesi en az düzeyde tutulmalıdır.
2. Alt metal ile astar arasındaki bağ çok sıkı oluşturulmalıdır.
3. Astar kalınlığı olabildiğince ince olmalı, fakat bu durumda da sert metallerarası bileşiklerin tane büyüklükleri denetim altına alınmış olmalıdır.

Pb esaslı yatak alaşımlarının daha yaygın olarak kullanılanları, Pb - Sb - Sn üçlü alaşımlarıdır. Pb esaslı yatak alaşımı genellikle 0,25 mm - 1,58 mm kalınlıklarında, olağan yatakların çelik yüzeylerine kaplanır, ya da küçük yataklarda 0.05 mm - 0.12 mm kalınlıklarında kullanılır (Arslan vd.,1996).

4.2. Kurşunlu - Yatak Bronzları

Bunlar, özellikle Pb içeren Cu alaşımlarıdır. Özgün bileşimi % 80 Cu, % 10 Sn, % 10 Pb idi. Daha sonraları % 77 Cu, % 8 Sn, % 15 Pb bileşimindeki türü geliştirildi. Yüksek Pb' li yatak bronzları ilk uygulandıklarından beri yatak alaşımı olarak kullanılmaktadır. Bunların oksijenini gidermek için genellikle P katılır. Böylece hem SnO_2 miktarı azalır ve hem de dökülebilirlik özelliği gelişir. Yapı içinde kalan P çok düşük tutulur. % 0,1 - 0,5 P oranlarında aşırı gevreklik meydana getiren Cu_3P oluşur. Modern yüksek Pb' li yatak bronzları şu genel bileşim sınırları içinde kalırlar; % 70 - 80 Cu, % 5 - 10 Sn % 5 - 25 Pb, bazılarında Zn katılır (Schumann,1964).

Bunlar Cu-Sn alaşımlarının döküm yapılarına benzer ve yapısında fazladan çözünmemiş Pb damlacıkları bulunur. Bir çoğunda δ ikincil katı eriyiği $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ görülebilir.

Yüksek kurşunlu yatak bronzları; uçak, otomobil ve dizel motorlarının krank şaftlarının yatak alaşımları olarak kullanılır (Böhm,1968). Bunların aşınma dirençleri ve ısı iletkenlikleri yüksek olduğundan çalışma sırasında soğumaları daha kolay olur. Pb, bronz içinde çözünmediğinden, aşırı Pb birikimini önlemek amacıyla bu alaşımlar savurma döküm yöntemiyle dökülürler; ya da Ni katımlarıyla Pb birikimleri önlenir (Yıldırım, 1984).

5. SÜRTÜNME

Sürtünme, katı cismin, dokunduğu bir başkasının yüzeyine göre teğetsel olarak hareket ettiğinde veya böyle bir hareketi oluşturma etme eyleminde , bu harekete karşı mevcut olan dirençtir. Birbirinden çok farklı şeyleri içine alan üç tür sürtünme ayırt edilir;

- 1- Kuru sürtünme ;
- 2- Akıcı sürtünme;
- 3- Yarı akıcı, sınır ya da karma sürtünme.

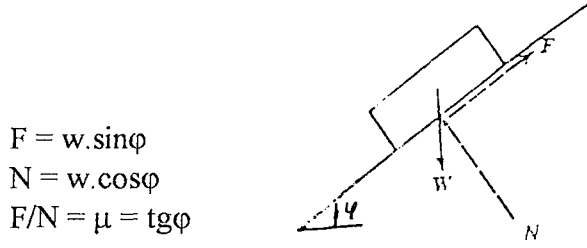
Kuru sürtünmede katı cisimlerin üst yüzeyleri, bir yağlayıcı aracının ara tabakası bulunmaksızın birbirlerine dokunurlar. Burada T yer değiştirme kuvveti, N dikey yükle orantılı olup $T = \mu.N$ dir. Dolayısıyla kuru sürtünmenin μ katsayısı, yüklemenin büyüklüğünden bağımsızdır ki, bunu ilk kez Coulomb (1779) saptamıştır. Ch. Jakob'un (1911) çelik üstünde pirinçte yüzey basıncının 0,009 at'dan 60 at'a yükseltilmesinde, yaptığı çalışmaları μ sürtünme katsayısında hata sınırının dışında bir değişme olmadığını doğrulamıştır. Kuru sürtünme esasta sadece pürüzlü yüzeylerin yapışması halinde önem kazanır. Bu durum, uzun süre hareketsiz kalmış kaymalı yataklarda da ortaya çıkar. Örneğin beyaz metal yataklar üzerindeki deneylerde yapışma sürtünmesi katsayısı 0,21 ile 0,24 olarak bulunmuşken, dökme zarflı Seller yataklarında bu sayı sadece 0,14 olarak saptanmıştır. Buradan da bunların her iki malzeme türüne bağlı oldukları anlaşılmaktadır. Mikroskobik ölçüde gözlenebilen başlıca değişkenlerin; yani uygulanan yük, temas bölgesinin boyutu ve kayma hızının fonksiyonu olarak sürtünme kuvvetinin büyüklüğünü ifade etmek için üç nicel ilişki gereklidir. Bu üç ilişki şu eşitlikle verilmektedir.

$$F = \mu.N;$$

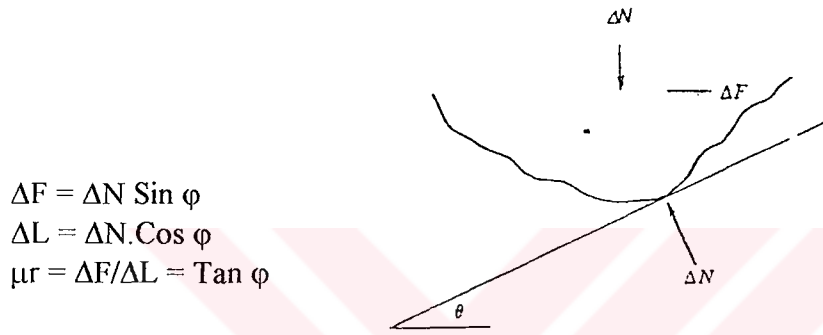
F sürtünme kuvveti ve N dikey yükle orantılıdır. Bu da, bir μ sürtünme katsayısının tanımlanmasına olanak sağlar. Alternatif olarak bu konuyu sabit sükunet açısı ile ifade etmek uygun olmaktadır. Bu ϕ açısı, ya da sürtünme açısı $\tan \phi = \mu$ şeklinde tanımlanır.

Pürüzlülük bileşeni; pürüzlü yüzeylerin kayması sırasında bir yüzeyi diğerinin üzerine kaldırmak gereğinden doğuyor. Çıkıntının bir ϕ eğimine sahip olması halinde, $\tan \phi$ sürtünme katsayısına eşit olacaktır (Şekil 5.1 ve 2). Bununla birlikte biraz sonra sürtünmenin bir negatif bileşeni olabilecektir. Şöyle ki ϕ , pozitif ve negatif değerler

almaya meyledecektir (Şekil 5.3).



Şekil 5.1 Bir Cismin Meyilli Düzlem Üzerinde Denge Diyagramı. Kayma başlamak üzeredir.



Şekil.5.2 Bir Çıkıntının Bir Meyilli Sürtünmesiz Düzlem Üzerinde Kaymasının Diyagramı. Sürtünmenin μ_r bileşeni $\tan \phi$ 'ye eşittir.



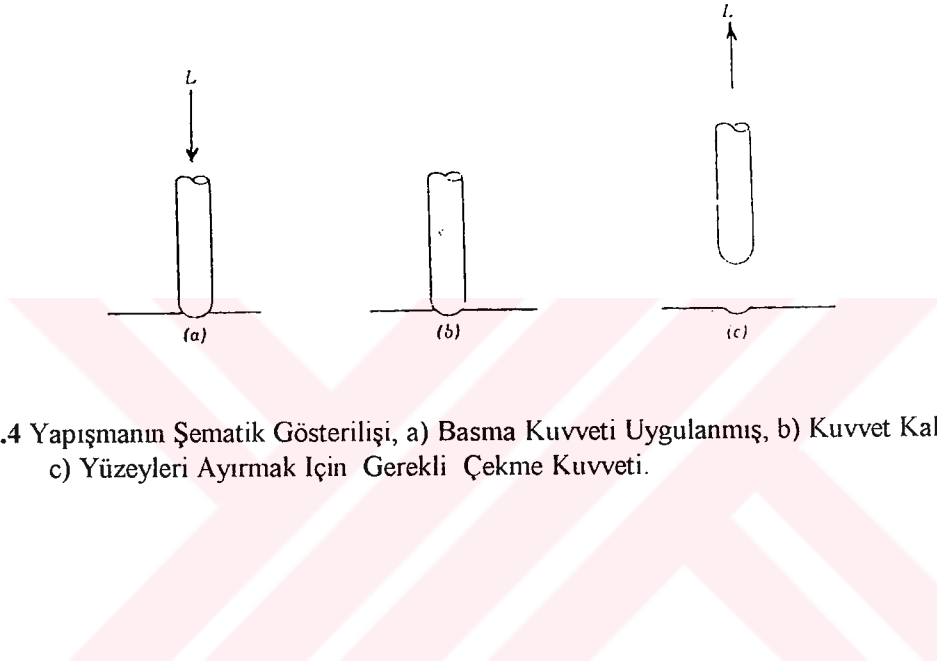
Şekil 5.3 İki Pürüzlü Yüzeyin Şematik Görünüşü; Bileşenlerin Bir Çoğu Aşağı Kaymaktadır.

5.1. Yapışma

İki yüzey birbirine bastırıldığında ortaya çıkar. Az incelenen bir konudur. Yapışmada batırma işi ve saf bir dikey, ve de bileşik bir dikey ve makaslama kuvvetleri vardır. Yüzeylerin ayrılması için dikey kuvvetin uygulanması gerekir (Şekil 5.4).

Ayrılma için gerekli F dikey kuvvetini başlangıçta uygulanan dikey L kuvvetine oranı çoğu kez F yapışma katsayısı olarak anılır. $F = L/L$

Genel olarak birbirine komşu iki katı cisim yapışır. Böylece de birbirine dokunan çok kristalli malzemelerde, çeşitli kristaller çok sıkı olarak birbirlerine yapışırlar; bunda sınır tanelerinin varlığı dolayısıyla çok nadir gevşeme görülür. Bu kuvvetli yapışma birbirine dokunan tanelerin bileşimleri farklı olan iki fazlı alaşımlarda olduğu gibi; komşu tanelerin aynı bileşime haiz tek fazlı malzemelerde de görülür (Rabinovicz, 1966; Kragelsky ve Alisin 1982).



Şekil 5.4 Yapışmanın Şematik Gösterilişi, a) Basma Kuvveti Uygulanmış, b) Kuvvet Kaldırılmış, c) Yüzeyleri Ayırmak İçin Gerekli Çekme Kuvveti.

6. AŞINMA

1930' larda yapışma ve plastik şekil değiştirme teorisi ileri sürülerek kabul görmüştür. Son yıllar, makine tasarımının bir üçüncü kısmının belirlenmesine tanık oluyor ki; bu yeni konu, (Yunanca “Sürtünme” anlamında tribos) triboloji olarak adlandırılıyor. Moore' e göre (1974) aşınma, kullanılan malzemelerin yüzeylerine gaz, sıvı ve katıların teması sonucunda çeşitli etkenlerle malzemenin yüzeyinden mikro taneciklerin kopmasından oluşan yüzey bozulmasıdır.

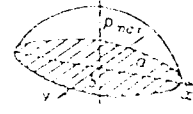
6.1. Katı Cisimlerin Teması

Sürtünme alanında görülen katı cisimlerin karşılıklı etkileri; karşı karşıya bulunan parçaların yüzey geometrilerinin hesaba katılmasıyla anlaşılabilir. Gerçek yüzey düzensizlikleri, makine parçalarında, çok değişik olup bunların nitelikleri ideal olmaktan uzaktır.

6.2. İdeal Olarak Pürüzsüz Yüzeylerin Teması

Temas alanında gerilme koşullarına bağlı olarak, iki katının teması ya elastik, ya da plastik olur. Hertz, temas alanının genellikle bir elips olup aşırı durumlarda bir daireye ya da paralel çizgilerle sınırlanmış bir şerite dönüşebileceğini göstermiştir. İlk aşırı hal iki küresel cismin ya da birbirlerine dikey eksenli iki eş silindirin temasına isabet eder. İkinci hal, temasın paralel eksenli iki silindir tarafından meydana getirilme durumudur.

Tablo 6.1 Eğri Çizgilerden Oluşan İki Cismin Elastik Temas Alanı Üzerinde Basınç Dağılımı.

Başlangıç temas ve dokunan cisimlerin şekli	Basınç dağılımı kanunu	Şekil
Nokta teması, çeşitli eğrilikte yüzeyler.	$p(x,y) = p_{max} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2}$ Temas alanı, yarı eksenleri a ve b olan bir elipstir.	
Nokta teması, küre ya da eş yarı çaplı ve birbirine dikey eksenli silindirlere.	$p(x,y) = p_{max} \sqrt{1 - \frac{p_{xy}}{\rho}}$ Temas alanı bir dairedir.	

Bu tabloda P (x,y) koordinatları x ve y olan bir noktadaki basınç; $P_{\max} = \text{Max}$ basınç $\rho = \text{temas alanı dairesinin yarı çapıdır}$. Eliptik ve dairesel temas alanları için ortalama ve maximum gerilmeler arasındaki ilişki ve plastik şekil değiştirmede, ortalama temas basıncı,

$$P_m = 2/3 P_{\max} \text{ ve } P_m = c \cdot \sigma_y$$

ile verilmiş olup; burada c, malzeme kısmının şekil bozulması sertleşmesi ve yüzey düzensizliğinin şekli ile ilgili bir katsayı, σ_y 'de akma sınırıdır (Oğuz, 1993).

6.3. Makine Parçalarının Yüzey Durumu

Bir metalin yüzeyi mutlak olarak oksit filmleriyle kaplı olup bunların oluşmaları yüksek sıcaklıklarda daha da şiddetlidir. Sürtünme ve aşınma sorunlarıyla doğrudan ilgili olayların derinliklerine inebilmek için kavramlar üzerinde durmak gerekir.

6.3.1. Dulong ve petit kanunu

Bir katı cismin c özgül sıcaklığı ile bunun p atomik ağırlığının p.c çarpanı, bütün elementler için aynı olup ortalama değeri 6,4' dür. Bu çarpana atomik ısı adı verilmiş olup bu, bahis konusu basit cismin atomik ağırlığının (gr) sıcaklığını 1 °C yükseltmek için, küçük kalori olarak, gerekli ısı miktarını ifade eder. Bundan hareketle "bütün katı elementlerin atomik ısısının az çok aynı değere sahip olduğu" sonucu çıkar.

6.3.2. Yüzey tabakaları durumları

Bir malzemenin yüzey tabakasının özellikleri onun talaş kaldırılarak işleme yöntemine ciddi şekilde bağlıdır. Malzeme tek uçlu bir kesici takım ile işlendiğinde, takım yüzünün hemen karşısında, içinde malzeme tanelerinin ezildiği bir plastik şekil değiştirme bölgesi oluşur. Bozulmuş dokunun tabakası içe doğru birkaç on mikron mertebesinde bir derinliğe gider; kaba işlemeden sonra bunun derinliği birkaç yüz mikron mertebesine erişir. Benzer olgu, taşlamada da ortaya çıkar.

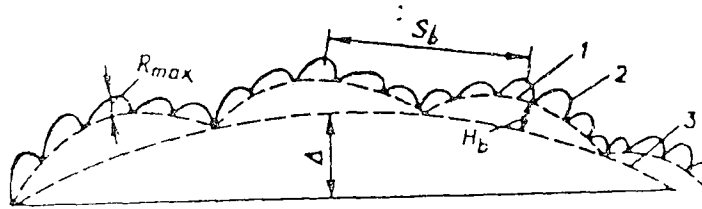
Sürtünmenin olduğu süreçler yüzey tabakalarının özelliklerini kuvvetlice etkiler. Yüzeyler birbirlerine göre teğetsel olarak hareket ettikleri sırada bu sürtüşen yüzeyler üzerindeki çıkıntıların uçları karşılıklı olarak birbirlerine girdiklerinden, yüzey tabakalarında plastik-elastik yeniden şekil değişmesi görülür.

Şekli değişmiş-bozulmuş tabakanın derinliği kayma hızına bağlıdır; şöyle ki artan hızla bu derinlikler azalır. Yüzeyde tekrarlanan elastik şekil değiştirme-bozulma, yorulma olgusuna yol açar. Yüzey tabakada plastik ve elastik şekil değiştirmeler bunun özelliklerinde değiştirmelere götürmekle kalmayıp belli sürtünme koşullarına özgü bir yeni mikroyüzey meydana getirir.

Yüzey tabakasının değişmiş (yapısı) dokusu onun mekanik özelliklerini önemli ölçüde değiştirir. Bu özellikler, yüzey tabakasının mikro sertliğini ölçerek değerlendirilebilir. Metallerin yüzey tabakaları, şekil bozulma sertleşmesi sonucu yüksek sertlik arz ederler (Aksoy, 1996).

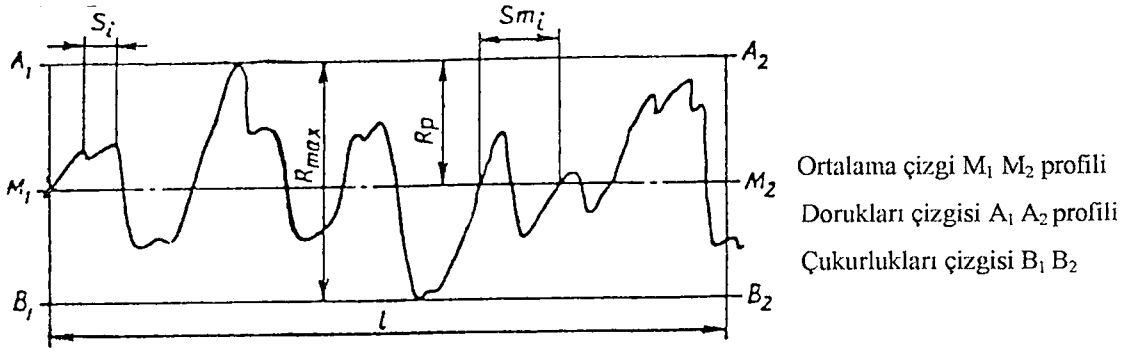
6.3.3 Yüzey geometrisinin durumu

Makine parçalarındaki yüzey düzensizlikleri, şekil hataları, dalgalılık ve pürüzlülük olarak sınıflandırılır. Şekil hataları; yüzeyin doğru şeklinden ayrı, düzensiz sapmalarıdır (İç bükeylik, dış bükeylik, koniklik vb.). Dalgalılık; zaman zaman tekrarlanan sivrilik ve çukurlukların bir modeli olup bunların her ikisi de aynı boyut mertebesinde, ama bunların arasındaki mesafe (dalga aralığı S_b), bunların H_b yüksekliğini çok aşar ($S_b \times H_b > 40$) yüzey pürüzlülüğünden, nispeten kısa aralıklı (2 ila 800 μ) ve yükseklikli (0,03 ila 400 μ) çok sayıda düzensizlikler anlaşılır. Şekil sapmaları, dalgalılık ve pürüzlülük, şematik olarak Şekil 6.1 ve 6.2' de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Bir katının Yüzey Geometrisinin Diyagramı

1) Dalgalılık, 2) Pürüzlülük, 3) Şekil Hataları



Şekil 6.2. Yüzey Pürüzlülük Parametreleri

Parametre	Tanımlama
<u>Pürüzlülük</u>	<u>Pürüzlülük</u>
Profilin maximum doruğunun R _p yüksekliği (ezme yüksekliği)	Profil dorukları A ₁ A ₂ çizgisiyle M ₁ M ₂ ortalama çizgi arasındaki mesafe Şekil 6.2
<u>Dalgalık</u>	<u>Dalgalık</u>
Dalgaların maximum yüksekliği H _b yüksekliği Şekil 6.1	Dalga şekli grafiğin numune uzunluğu içinde dalga tepeleri çizgisi ile dalga çukurları çizgisi arasındaki mesafe
Sb ortalama dalga uzunluğ Şekil 6. 1	lb numune uzunluğu içinde dalga tepeleri arasındaki ortalama mesafe lb ≥ 5.Sb

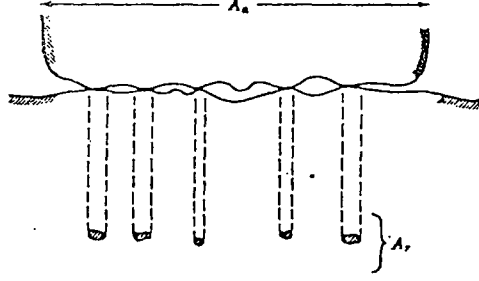
Taşıyıcı alan eğrisi genellikle izafi birimlere göre saptanmış olup bu durumda, belli bir düzeyde doruk kesitleri toplamının profil grafiği uzunluğuna oranı apsisde, a mesafesinin R_{max} (veya R_p) ye oranı da ordinatta gösterilmiştir. Bu takdirde taşıyıcı alan eğrisinin ilk bölümü ;

$$T_p = \frac{\sum \Delta p}{l} = \frac{Ap}{Ac} = b \cdot \left(\frac{a}{R_{max}} \right)^v = t_m \cdot \left(\frac{a}{R_p} \right)^v \text{ şeklinde gösterilebilir;}$$

6.4. Gerçek ve Çevre Temas Alanı

Dalgalık, dalgali şekilde tepelerde ayrı alanlarda toplanan temas noktalarından sonuçlanır. Bu alanların toplamı, çevre temas alanını A_c oluşturur. A_c gerçek temas alanı, içinde yüzey pürüzlülüğünü oluşturan düzensizliklerin temas halinde bulundukları alanı ifade etmektedir (Şekil 6.3). Gerçek temas alanı, büyüklük itibarı ile madde atom ve moleküllerinin birbirlerini etkiledikleri alana yaklaşıp. Gerçek temas alanı genellikle

küçüktür; görünür temas alanının % 0,01 ila 0,1'ni geçmez. Aynı düzensizliklerin şekil değiştirmesiyle meydana gelmiş fiili temas noktalarının çapı 3 ile 50 μm ' dir.



Şekil 6.3. Birbirine Sürten İki Yüzeyde Görünür ve Gerçek Temas Alanları.

6.5. Adhesiv Aşınma

Eğer destekleyici reaksiyon tabakaları ve adsorbsiyon tabakaları ya da ayırıcı bir yağ şeridinin varlığı olmaksızın, iki temas çifti birbirine vasıtasız dokunuyorsa, adhezyon etkili olmaktadır. Adhezyon davranışı çift özellikli olup; ana iki çiftin, yüzey pürüzlülüğünden dolayı, çok küçük mikro temas bölgelerinde dokunmaları mümkündür. Bu tür mikro temas bölgelerinin meydana gelişi atomik düzeyde adhezyon bağlarının oluşumu için, koşul oluşturmaktadır.

6.5.1. Gerçek temas yüzeyinin büyüklüğü

Gerçek temas yüzeyi ne kadar büyük olursa, adhezyonun o kadar kuvvetli olduğu görünür. Teknik açıdan sürtünmeli kaynama işlerinde, gerçek temas yüzeyini geometrik yüzeye eşit yapmaya gayret gösterilir. Çünkü bundan sonra kaynak bağlantısının dayanıklılığı özellikle büyük olur. Buna karşın, adhezyon yöntemleri sınırlandırılmak istendiğinde, gerçek temas yüzeyinin mümkün mertebe küçük tutulması sağlanmalıdır.

İki temas çifti normal F ile bastırıldığında, ilk önce, mikro temas yüzeyini oluşturan yüzey pürüzlülüğü çıkıntı yerleri, elastik şekil değişimine maruz kılar. Böyle olunca gerçek temas yüzeyinin büyüklüğü için şu formül verilir

$$E = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \quad 0 < n < 1$$

$$A_R = \text{Const} (F_N / E')^n \dots\dots\dots(1)$$

Burada μ_1 ve μ_2 enine büzülme ya da çekilme katsayısı E_1 ve E_2 temas çiftinin elastiklik modldrleri. Yüzey pürüzlülüğü tepeciğ ağırlıklı olarak plastik ekil değşimine maruz kalırsa, o zaman Bowden ve Tabor'a (1964) göre aşağıdaki bağıntı geçerlik kazanır.

$$A_R = \text{Sabit. } F_N / H \dots\dots\dots(2)$$

Burada H temas çiftinden yumuşak olan elemanın sertlik değeri. Yüzey pürüzlülüğü tepeciğinin, elastiklikten plastik ekil değşimine geçişi halinde, Greenwood ve Williamson'a (1966) göre, plastiklik indeksi ψ yardımıyla tahmin edilmelidir.

$$\psi = (E/H).(\sigma/\beta)^{1/2} \dots\dots\dots(3)$$

Bu bağıntıda, σ : Yüzey pürüzlülüğü tepesinin standart sapması, β : ise ortalama yarıçaptır. ψ için; temas deformasyonu, tam elastik olduğunda $\psi < 0,6$ oğnlukla plastik olduğ zaman $\psi > 1$ olmalıdır. Bu iki değeri arasında yüzey przllğnin elastik ekil değşiminden plastik ekil değşimine geçiş bölgesi bulunur. Bu bağıntıya göre, ekil değışimi, yumuşak olan temas çiftinin artan sertliğ nedeni ile elastik bölgeye kaymaktadır.

Temas yüzeyinde, normal kuvvetin yanı sıra teğetsel kuvvet de (F_T) etki ederse, bu durumda mikroskobik bir kayma başlamadan önce, gerçek temas yüzeyi devamlı mikro temas yüzeyinin plastik ekil değışimi sayesinde büyür (Cortney-Pratt ve Eisner 1957; Tabor 1959).

Bu durum gerçek temas yüzeyi A_R 'nin büyüklüğünü gösteren řu formül ile ifade edilir.

$$A_R = \text{Sabit. } F_N / H \sqrt{1} + \text{Sabit. } (F_T / F_N)^2 \dots\dots\dots(4)$$

Gerçek temas yüzeyi F_T/F_N oranı statik sürtünme katsayısı büyük bir gerçek temas yüzeyi ile i içedir. Sürtünme katsayısı ise, yalnız mikro temas yüzeylerinde güçlü adhezif bağ kuvvetleri etkili olduğ zaman büyük olur.

6.5.2. Adhezif bağ kuvvetleri

Sabit katı cisimlerin mikro temas yüzeylerinde etkili olan adhezif bağ kuvvetleri,

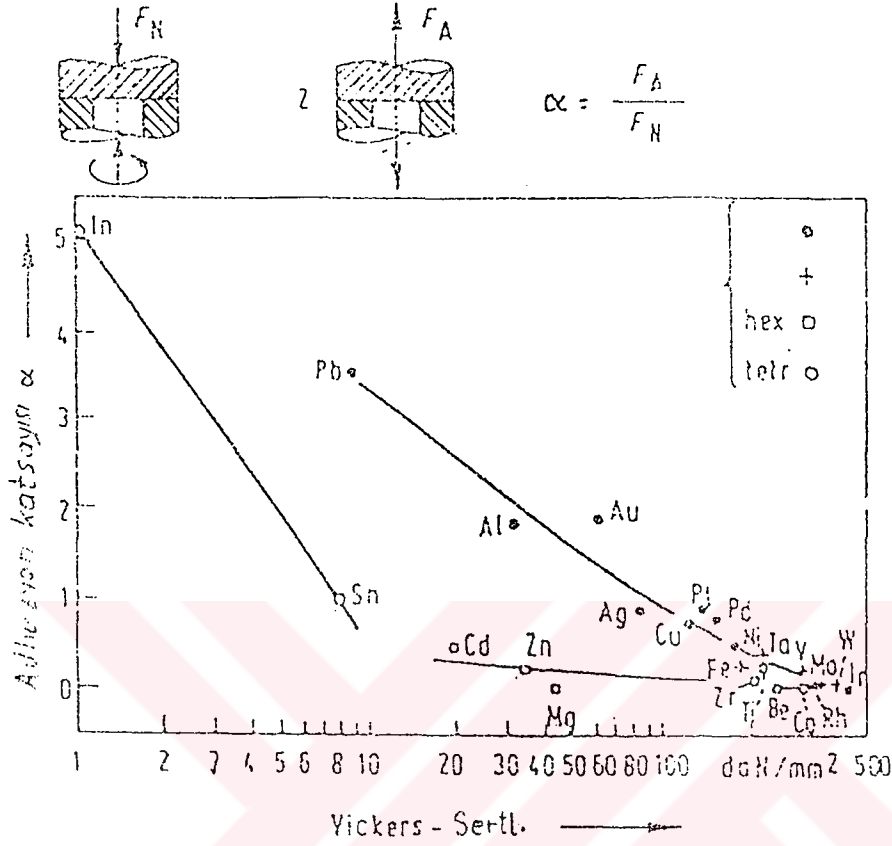
katı cisimlerde bulunan kristal kafeslerinin bağ kuvvetleri ile aynı türdendir. Bu bakımdan, metalik, kovalent, iyonik bağlar ve van der waals bağları diye ayırt edilebilirler. Öncelikle şu durum dikkate alınmalıdır. Adsorpsiyon ve reaksiyon tabakalarından bağımsız, fakat aynı cins metalden temas çiftleri bulunsun. Czichos'un (1969, 1972) düşüncelerine göre, adhezif bağ kuvvetlerinin şiddeti, serbest elektronların sıklığı ve çeşidine bağlıdır. Sorgent (1978), dış yörünge elektronlarının, elektron kayıplarının da fazla önemli olduğu düşüncesindedir. Bu düşünceden hareketle, B-Metallerinin soy metaller üzerindeki adhezyon şiddeti, geçiş metallerine kıyasla ve aynı yönde sertlikle birlikte azalır, şeklinde açıklanabilir.

Yüksek kovalent bağlarına sahip olan geçiş metallerinde elektronlar giderek bölgeselleşirler. Böylece, bağ kuvvetleri yöne bağımlı duruma gelir. Burada adhezif bağlar ancak aktif enerjinin büyüklüğü ile meydana getirilebilir.

Temas çiftini oluşturan malzemelerin, karşılıklı çözünürlüğünün, adhezif bağların şiddetine bağlı olduğuna dair yapılan çalışma ve halen geçerliliği olan bu iddia onaylanmamıştır (Habig, 1970; Feller ve Matsahat, 1971). Çünkü birbiri içinde çözünmeyen metallerde çok kuvvetli adhezyon bağları teşekkül edebilmektedir.

Czichos (1969)'a göre şayet ortak eleman olan elektronegatif ve diğeri elektropozitif gibi etkileşebilirse, metal olan temas çiftleri arasındaki adhezyon bağıda daha kuvvetlidir. Sertlik ise bu konuda herhangi bir belirleyici değildir. Bir başka ifade ile sertlikten hareket ederek bir metalin elektronegatif mi yoksa elektropozitif mi olarak iş gördüğünün saptanması mümkün değildir. Plastik metal çiftlerinde de adhezyon için benzer mekanizma görülür. Burada metal, elektronları plastiklerden almaktadır. Yani elektronegatif akseptör (kabul edici) olarak etki etmektedir (Weaver, 1972).

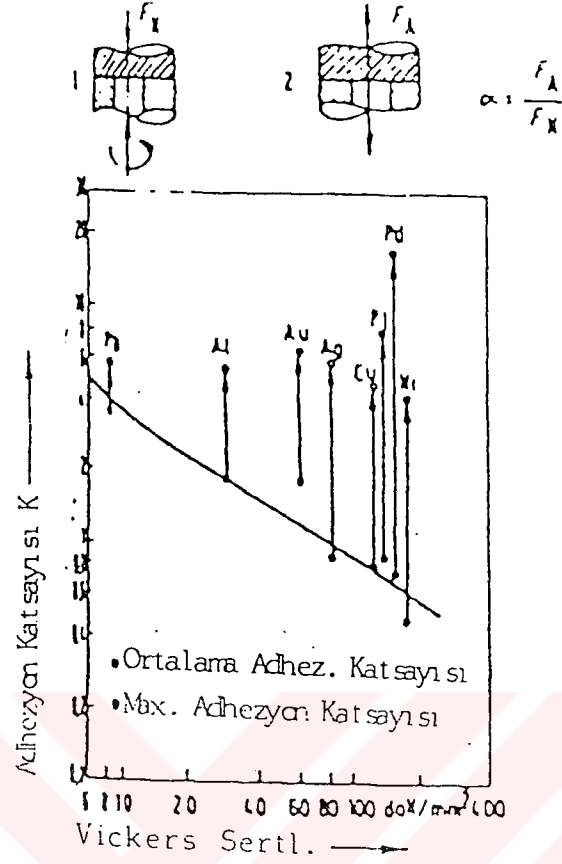
Temas çiftinin biri metalik diğeri seramik malzemeden ise, o zaman adhezyon özellikle kovalent bağlardan kaynaklanmaktadır. Adhezyon katsayısının deneysel olarak tespit edilebilmesine saf metallerden çiftler alınarak çok sayıda araştırmalar özellikle Sikorski (1963) tarafından yapılmıştır (Şekil 6.4).



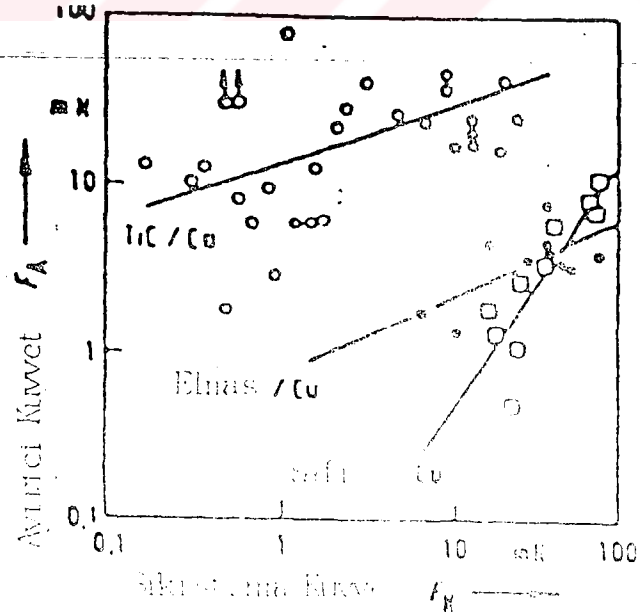
Şekil 6.4. Sikorski'ye (1963) Göre Saf Metallerden Çiftlerin Adhezyon Katsayıları.

Böylece hekzagonal ve kübik hacim merkezli metal çiftinin adhezyon katsayısının kübik-yüzey merkezli olan metallerden, bariz bir şekilde düşük olduğu görülür.

Aynı metallerden olan temas çiftinin adhezyon katsayısının, artan sertlikle birlikte azaldığı Hordon (1967) ve Gilbereath (1967) tarafından onaylanmıştır. Önceleri aynı eğilim (Fendens) saf metallerin soğuk pres kaynağında, Tylecate ve diğerleri tarafından gözlemlenmişti. Hekzagonal metallerin, kübik yüzey merkezli metallerden daha az adhezyona meyilli olduğu bulunmuştur. Bunun Hordon (1967), Johnson ve Buckler'in (1969, 1978) araştırmalarıyla uyum içerisinde olduğu görülmüştür.



Şekil 6.5. Sikorski'ye Göre Kübik Yüzey Merkezli Metal Çiftlerden Adhezyon Katsayıları.



Şekil 6.6 Bakır ile Yüksek Sertliğe Haiz Maddelerin Adhezyonu (Gane vd., 1974)

Bütün sonuçlar; gerçek temas yüzeyinin büyüklüğünü belirleyen, temas çiftinin plastik şekil değişimi, adhezyon katsayısının büyüklüğü için çok önemli anlam ifade ettiğini göstermiştir. Plastik şekil değişimi temas çiftinin artan sertliği ile zorlaşmaktadır. Böylece gerçek temas yüzeyinin büyüklüğü azalmaktadır. Aynı zamanda kafes yapısının da, plastik şekil değişimine etkisi vardır (Şekil 6.6 ve 6.7).

Böylece kübik yüzey merkezli metallerin mikro temas bölgeleri, çok sayıda hazır olan (12) kayma sistemlerinin varlığından dolayı, çoğunlukla üçlü kayma sistemi bulunan hegzagonal metallere, daha kolay plastik şekil değişikliğine uğrayarak büyürler (Habig, 1968).

Ayırma kuvveti F_A 'nın F_N 'ye oranından elde edilen adhezyon katsayıları Tablo 6.2'de gösterilmiştir.



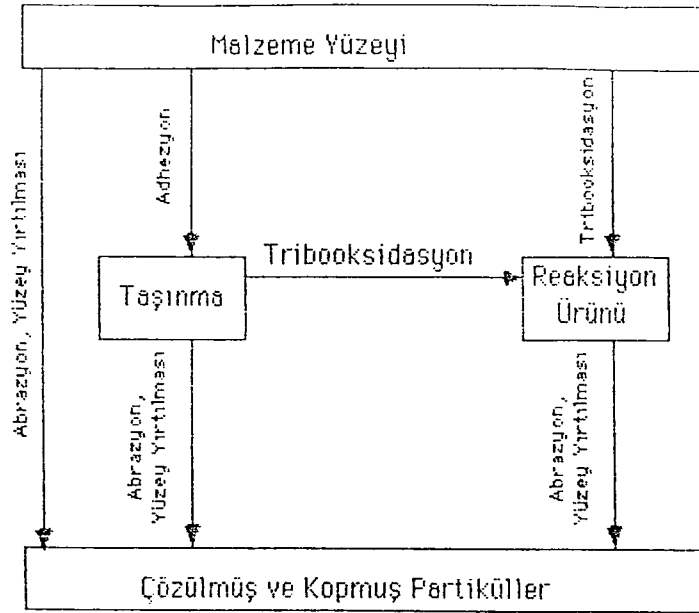
Şekil 6.7 Kellog'a Göre Farklı Malzeme Çiftlerinin Adhezyonu.

6.5.3. Adhezif taşınma

Adhezif aracılığıyla partiküller bir aşınma çiftinden diğerine taşınabilir. Aşınmanın primer derecede nedeni bu taşınmadır. Böyle olunca, kural gereği aşınma partiküllerinin oluşumunda, diğer aşınma mekanizmalarının da, katılımı olmasına rağmen, biz bunu adhezif aşınma diye tanımlıyoruz (Şekil 11).

Holm (1958), Burwell ve Strang (1952) ve Archard'a (1953) göre adhezif aşınmada volumetrik aşınma miktarının W büyüklüğü için aşağıdaki bağıntı geçerlidir:

$$W = K F_n / H S \quad (6.1)$$



Şekil 6.8. Fazla Aşınma Mekanizmalarının Birbiri Üzerine Yığılması

Normal kuvvet F_N , yumuşak olan elemanın sertliği H , kayma yolu S ve aşınma katsayısı K ile bu bağıntı bir ölçüt olarak kabul edilebilir. Burada yüzey pürüzlülüğü tepesinin teması halinde, ana veya karşı elemanın partikülü birinden diğerine taşınır. Adhezif bağ kuvvetleri ne kadar büyük olursa, açıklananlara göre, partiküllerin taşınması ve bunun neticesi olarak da toplam aşınma miktarı o nispette büyük olur.

Rabinowicz ve Tabor'un (1951) araştırmalarına göre bazı metalik kaymalı çiftler için, Archard tarafından, taşınma; autoradiographie yardımıyla tespit edilerek, bu taşınmaz miktarından da aşınma katsayısı K tahmin edilmektedir (Tablo 6.2).

:

Tablo 6.2 Adhezif Taşınma veya Geçiş (Archard, Rabinowicz ve Tabor, 1951-1953)

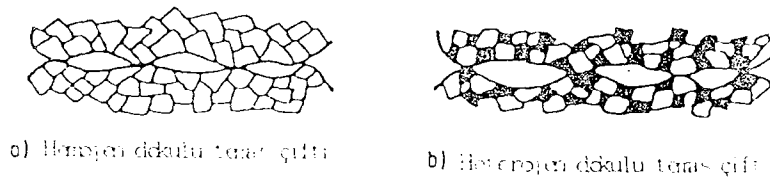
Çiftler		Sertlik (daN/mm^2)		1'den 2'ye Geçiş Miktarı ($\mu\text{g/cm}$)	Aşınma Katsayısı $10^{-3}K$
Eleman-1	Eleman-2	Eleman-1	Eleman-2		
Cd	Cd	20	20	50	1,7
Zn	Zn	38	38	200	16,0
Ag	Ag	43	43	20	1,2
Cu	Cu	95	95	20	2,2
Pt	Pt	138	138	40	3,9
Alaşımız çelik	Alaşımız çelik	158	158	15	4,5
Paslanmaz çelik	Paslanmaz çelik	217	217	5	2,1

Aşınma katsayısı Archard ve Hirst (1956) tarafından teknik bakımdan enteresan olan bir dizi malzeme çiftlerinden, aşınma davranışlarının karakterize edilmesi için kullanılmıştır (Tablo 6.3).

Tablo 6.3. Archard ve Hirst'e Göre (1965) Farklı Malzeme Çiftlerinin Aşınması.

Malzeme çiftleri	Yumuşak elemanın sertliği (daN/mm ²)	Aşınma miktarı (10 ⁻¹⁰ cm ³ /cm)	Aşınma Katsayısı K
Polietilen / Takım çeliği	1,7	0,3	1,3. 10 ⁻⁷
Teflon / Takım çeliği	5	200	2,5. 10 ⁻⁵
Perspekx / Takım çeliği	20	14,5	7. 10 ⁻⁶
Dökme bakalit / Takım çeliği	25	12	7,5. 10 ⁻⁶
Lamelli bakalit / Takım çeliği	33	1,8	1,5. 10 ⁻⁶
Pirinç (% 30 Zn) / Takım çeliği	68	100	1,7. 10 ⁻⁴
Pirinç (% 40 Zn) / Takım çeliği	95	240	6.10 ⁻⁴
Yumuşak çelik / Takım çeliği	186	1570	7.10 ⁻³
Ferritik Asal Çelik / Takım Çeliği	250	2,7	1,7.10 ⁻⁵
Gümüş / Takım Çeliği	320	7,5	6.10 ⁻⁵
Stellit / Takım Çeliği	690	3,2	5,5.10 ⁻⁵
Takım Çeliği / Takım Çeliği	850	6,0	1,3.10 ⁻⁴
Sinterlenmiş Wolfram Karpit / Sinterlenmiş Wolfram Karpit	1300	0,03	1.10 ⁻⁶

Buna göre de sertliğin ne aşınma katsayısına, ne de aşınma miktarına etkisi olmadığı görülür. Homojen ve tek fazlı dokulara haiz iki eleman karşılıklı dokundukları zaman, mikro temas bölgelerin de daima aynı cins kristaller buluşurlar. Eğer temas çifti, örneğin; perlitik-sementitik dokulardaki gibi heterojen yapılyısa, o zaman diğer durumun tam aksine yabancı (aynı olmayan) kristaller karşılıklı birbirleriyle temas haline geçerler (Şekil 6.9).



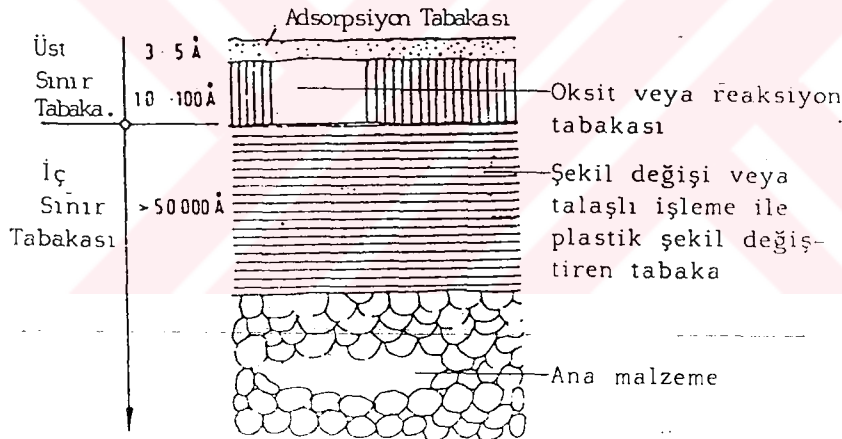
Şekil 6.9 Homojen ve Heterojen Dokulu Malzemelerden Temas Durumunun Şematik Tasarısı

6.5.4. Adhezif koşullu yenme

Ana ve karşı eleman arasında, normal kuvvet ve izafi hız gibi kritik zorlama büyüklükleri veya sıcaklık, öngörülen değerlerin üzerine çıkarsa sürtünme katsayısı ve aşınma miktarının, alt konumdan üst konuma yükselmesi söz konusu olur. Buna yenme denir. Hatta bazı durumlar da izafi hareketi kaymalı ve yuvarlanmalı çiftler de imkansız hale getiren, katı yenme dahil meydana gelmektedir.

Ayrıca yağ film veya destekleyici adsorbsiyon ve reaksiyon tabakaları koptuğunda, kuvvetlendirilmiş bir şekilde etkili olan adhezyonun neticesi, yenme veya katı yenme olur. Böylece temas çiftleri ve iç sınır tabakaları birbirine değmeye başlar ve adhezif bağ kuvvetleri etkili olurlar (Şekil 6.10).

Sertliğin yenme üzerine etkisini adhezif koşullu işlememe diye gösterebilir. Rogolski ve Senatorski'nin (1969) araştırmaları sonuçlarında verilen kayma hızı ve çıkış sıcaklığının mahiyetinde bir dizi çiftler için işlememe yükü F_N (Krit.) tespit edilmiştir.



Şekil 6.10. Metalik Malzemelerin Yüzey Yapısı

6.6. Yüzey Yorulma Aşınması

Yuvarlama uygulamalarında, çarklar ve rulman yataklarında yuvarlanma ya da kayma halinde gevrek, seramik malzemelerde kırılma aşınması görülür. Yuvarlanma teması elementlerinin başlıca kırılma türünü oluşturur. Bu aşınma şekli, malzemelerin genel yorulma olgusuna yakından bağlıdır. Zira temas eden malzemelerde gerilmelerle kırılmayı meydana getirmek için gerekli çevrim arasında bir karakteristik karşılıklı ilişki mevcuttur.

Bu tipik uygulamada, uygulanan dikey yükleme altında deformasyon plastikten çok elastik olur. Mekanizma çalıştığında, yüzey arasındaki etkileşim başlıca bir yuvarlanma hareketinden ibarettir. Buna çoğu kez bir küçük ($\cong \% 1$) kayma komponenti biner. Sıcaklık ılımlı olup yağlama sağlanır. Bu koşullar altında yapışkan abrasiv ve korozif aşınma yok sayılır ve hareket uzun süreler, yüzey görünümünde belirgin bir değişme olmadan devam eder.

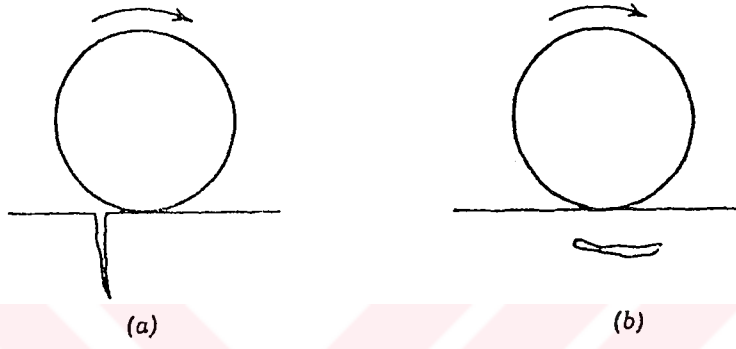
Mekanizmanın çalışması devam ettikçe yuvarlanma yolunda malzemenin gerilme ve gevşemesi yer almayı sürdürür. Uzun süre malzeme bir gerilme çevriminden etkilenmemiş gibi olur. Ama aniden, belki birkaç saat çalışmasından sonra, yüzeyden bir parçacık ayrılır ve bundan sonra yüzeyin bozulması, bundan parçaların kopması hızlanır. Kalkan parçacıklar büyük olma eğilimindedirler, yani boyutları, malzeme için karakteristik yapışkan aşınma parçacığı boyutundan (30μ mertebesinde) çok gerilme altında temas alanınkilere (1000μ mertebesinde) daha yakın görünürler.

Birleşmenin ömrü belirgin olarak yüke bağlı olup ilişki genellikle $t = \text{sabit} / N^3$ tipindedir.

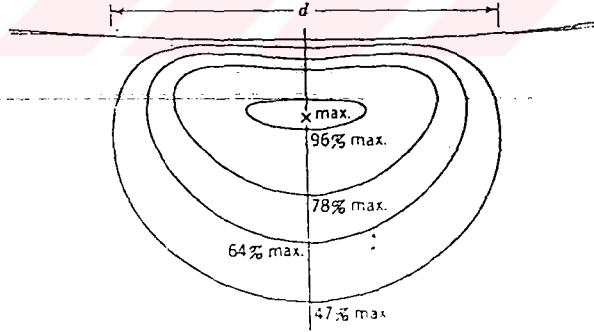
Burada t , kırılmaya kadarki zaman, N de yüküdür.

Küresel uçlu temas eden malzemelerin elastik deformasyonun da maximum gerilme yükünün küp kökü ile değiştiğinden, yukarıdaki denklem $t = \text{sabit} / \sigma_m^3$ şeklinde yazılabilir. σ_m , maximum elastik gerilmedir.

Normal yorulma deneyinde gözlenen, malzemenin sonsuz bir yorulma yaşamına eriştiği sınır (Wöhler eğrisi) yüzey yorulması durumunda mevcut değildir. Yüzey yorulma aşınmasının deneysel tetkiki oldukça güçtür. Pullanma ortaya çıkıncaya kadar yapılabilecek az faydalı gözlem vardır; buna rağmen bazı araştırmacılar yuvarlanma temas malzemelerinin metalografik incelemelerini yapmışlar ve pullanmayı başlatan çatlakların bazen yüzeyde, bazen de yüzeyin altında kendini gösterdiğini bulmuşlardır (Şekil 6.11). Yüzey altı çatlaklarının hasıl olması muhtemelen maximum kesme gerilmeli ve dolayısıyla plastik akma için maximum eğilimli noktanın yüzeyin altında yakın bir mesafede bulunmasına bağlıdır (Şekil 6.12).



Şekil 6.11. İlk Başlangıç Safhalarında Tipik Yüzey Yorulma Kırılmalarının Görünümü
(a) Yüzey Çatlağı ; (b) Yüzey Altı Çatlağı.



Şekil 6.12. Küre ve Düzlemin Elastik Temasında Gerilme Maksimumunun Pozisyonu

7. YORULMA

Gerilmelerin akma sınırını aşmamasına yeterince özen gösterildiği halde, işletme esnasında makine parçalarında kırılmalar meydana gelmektedir. Şekil değişimine uğramadan ortaya çıkan bu kırıkların farklı olduğu, bunların tespiti için malzemedeki gerilmelerin kesitteki dağılımlarının zamanla değişimlerinin dikkate alınması gerektiği, statik deneylerle saptanan mukavemet değerlerinin malzemenin davranışını belirlemekte yetersiz kaldığı bilinmektedir. Değişken gerilmeler etkisinde olan malzemelerde gerilmelerin maksimum değerleri yerine, bunların periyodik değişimi, yani tekrarı önemlidir (Kayalı,1991). Bu tespitler sonunda, deneysel olarak yapılan çalışmalarda yorulma dayanımının, statik dayanım değerinden çok daha düşük düzeyde olduğu saptanarak, sonsuz sayıda tekrarlanmasına rağmen kırılmaya neden olmayan en yüksek gerilme "yorulma dayanımı" olarak ifade edilir. Ancak yorulmaya etki eden faktörlerin fazlalığı nedeniyle günümüzde çok sayıda yorulma hasarına rastlanmakta; makine, taşıt ve benzeri konstrüksiyonlarda görülen hasarların takriben % 90'ı yorulmadan ileri gelmektedir (Bargel ve Schulze, 1980).

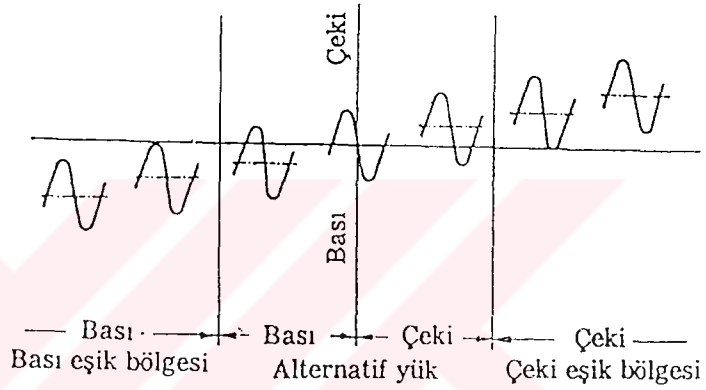
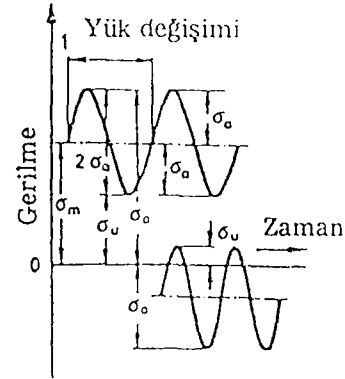
7.1. Yorulma Türleri

Çevrim sayısı, yorulma ömrünü önemli ölçüde etkilemez. Kuvvet veya moment aynı büyüklükte fakat biri artı diğeri eksi işaretli iki sınır değeri arasında değişiyor ise değişken zorlama ve malzeme dayanımı bakımından değişken yorulma dayanımı söz konusudur. Kuvvet veya moment sıfır değeriyle belirli bir diğer sınır arasında değişiyor ise dalgalı zorlama ve malzeme dayanımı bakımından dalgalı yorulma dayanımı değeri deyimleri kullanılır (Şekil 7.1). Yorulma zorlaması sadece dış kuvvetlerin değil, sıcaklık farkları nedeni ile oluşan iç kuvvetlerin etkimesi ile de görülebilir (Tauscher, 1971).

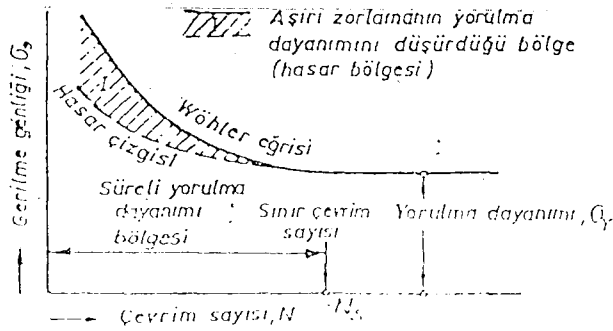
Gerilme genliği (σ_g) - çevrim sayısı (N_g) eğrisi belirli bir sınır gerilmesinde yatay olur. Bu limit gerilmenin alt yorulma limiti, veya dayanım limiti olarak adlandırılır. Burada malzemenin hasarsız, sonsuz çevrim sayısına dayanabileceği varsayılır (Yıldırım vd., 1994) (Şekil 7.2). Mg, Al ve Cu gibi demir dışı metaller, artan çevrim sayısı ile yavaşça aşağı doğru inen bir $\sigma_g - N_g$ eğrisine sahiptirler. Bu malzemeler de $\sigma_g - N_g$ eğrisi yatay

konuma gelmediğinden gerçek bir yorulma limiti elde edilemeyebilir (Dieter, 1976).

- σ_o = Üst gerilme (Mutlak değer)
 σ_u = Alt gerilme (Mutlak değer)
 σ_m = Ortalama gerilme = $0,5 (\sigma_o + \sigma_u)$
 σ_a = Gerilme sapması (Amplitut = $0,5 (\sigma_o - \sigma_u)$)
 $2\sigma_a$ = Gerilmenin değişme bölgesi = $\sigma_o - \sigma_u$



Şekil 7.1 Yardımcı Titreşim Zorlamasında Çeşitli Gerilme Bölgelerinin Gösterilişi (Domke, 1977).



Şekil 7.2. Wöhler Eğrisi ve Hasar Çizgisi

7.2 Yorulma Mekanizması

Yapı malzemelerinin yorulma zamanını üç basamata değerlendirmek mümkündür

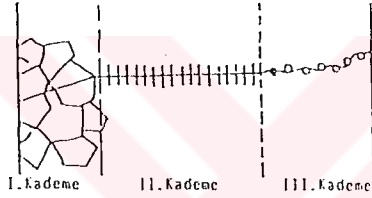
1) Yorulma çatlağı başlaması (Fatigue-crack initiation)

2) Yorulma çatlağının gelişmesi (Fatigue-crack propagation)

3) Kırılma (Fracture) (Parkins, 1979).

7.2.1. Çatlak büyüme mekanizması

Çatlak büyümesi araştırmaları neticesinde çatlağın değişik kademelerinde büyümenin nasıl meydana geldiği anlaşıldı. Şekildeki çatlağın bir yüzeydeki oluşumunu takiben, büyümenin değişik kademelerini gösteriyor. 1.kademe, çatlak başlangıcı işleminin, yüzey tanelerinin arasındaki dislokasyon hareketi ile uzamasıdır. 2.kademe, uygulanan maximum gerilme kuvvetine dik olan ve kademeli çizgilerden oluşan bölgelerdir. 3.kademe, malzemenin homojenliğini bozan çökelmelerin ve inklüzyonların, çatlağın gelişmesinde katkısı olan çatlak ucu teşekkülünü başlattığı bölgedir.



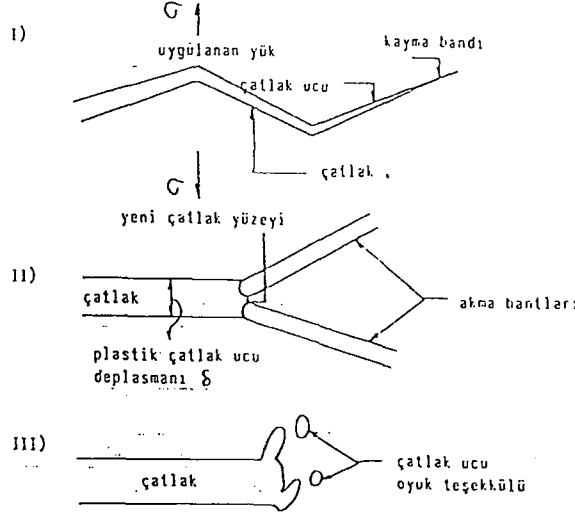
Şekil 7.3 Çatlak Oluşumu ve Büyüme Kademeleri.

Bu üç kademeli çatlak gelişme olayı, düşük yüklemelerde büyüyen ve uzun süre mevcudiyetini sürdüren çatlaklarda da görülür. Şekil 7.4' de yukarıda tarif edilen üç kademeli çatlama olayını gösteriyor.

1. ve 2.kademelerde çatlak ucuna yakın akma bantlarındaki kayma deformasyonları, çatlak ucundaki atomik bağların koparak kayması sonucu yeni çatlak yüzeylerinin meydana gelmesini sağlarlar. Bu hadise aslında çatlak körelmesi işlemidir ve çatlak ucundaki mevcut şekil değiştirme kargaşalığı böylece ortadan kalkar. Çatlak ucu deplasmanı δ , meydana gelen yeni düzey Aa ile gösterilecek olursa çatlak körelmesinin meydana gelmesi için:

$$Aa = \delta / 2$$

olmalıdır. 1.Büyüme kademesi sadece bir kayma yönü ile sınırlı olduğundan, daha kolay dönüşümlüdür, yani çatlak büyümesinin ileri-geri hareketleri iki yönlü olarak tekrarlanabilir. 2.kademedeki kırılma ve basamaklı durum, iki kayma sisteminin ya aynı

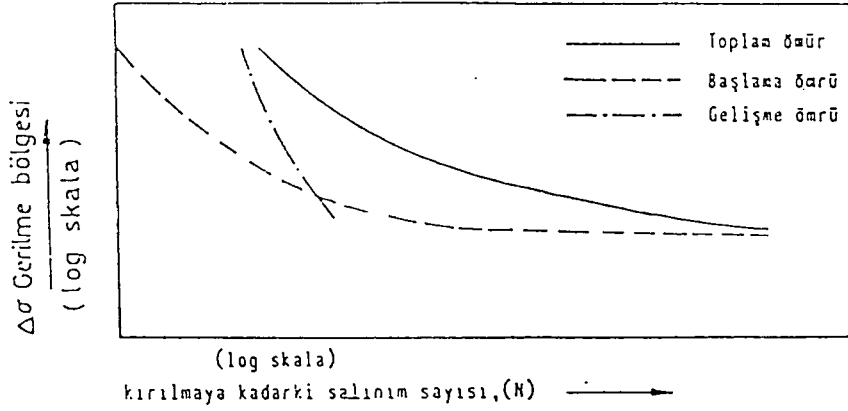


Şekil 7.4 Yorulma Çatlak Büyümesi Kademelerine Tekabül Eden Açılma Profilleri (Çakır, 1990)

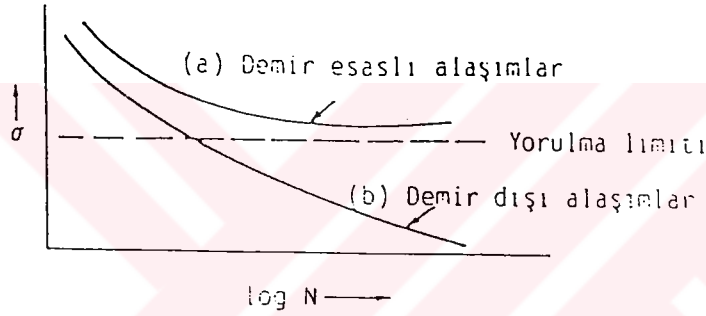
anda ya da dönüşümlü olarak devrede bulunmasının neticesidir. 3.kademedeki bölgesel akma bantlarının boyutu, malzeme içinde homojenliği bozan partiküller arasındaki mesafe boyutundadır. Bu partiküllerin çevresi ile olan bağlarını kopararak ayrılması, çatlak büyümesi anında, gelişen çatlakla bağ sağlayan oyukları meydana gelmesine sebep olur. Bu durumda $\Delta a > \delta / 2$ olur ve malzeme dengesiz durumdadır. Bu durumda 3.kademe, dengesiz çatlak büyümesi ile son bulur (Tomkins vd, 1979).

Belli aralıklarda periyodik olarak değişen gerilme uygulamasının kırılma zamanına kadar geçen salınım sayısının fonksiyonu olarak düzenlenen eğriler ($\sigma_g - N_c$) eğrisi olarak bilinir ve başlangıç ve gelişme bileşenlerinden meydana gelir. Kırılmanın meydana gelmesi için gereken çatlağın boyutları, uygulanan gerilmenin büyüklüğüne, numune boyutlarına ve uygulanan deney şartlarına bağlıdır. Belli bir gerilmenin altında, malzeme ömrü sonsuza yaklaşır (Wassermann, 1965).

Başlangıç kademesinde belli tanelerde bazı kaymalar gözlenebilir. Daha sonraki kademelerde gerilme durumu elastik deformasyona sebep olur. Yorulma limiti üzerindeki gerilmelerde ise bazı kayma düzlemleri boşluklar varatacak şekilde gelişir ve bu boşluklar birbiri üzerine eklenerek çatlakları meydana getirir. Farklı gerilmelerde ortaya çıkan kopma zamanı ($\sigma_g - N_c$) eğrileri şeklinde gösterilir. (Tomkins, 1979)



Şekil 7.5 Başlama ve Gelişme Bileşenlerine Ayrılmış Şematik Bir (σ_g - N_c) Eğrisi.



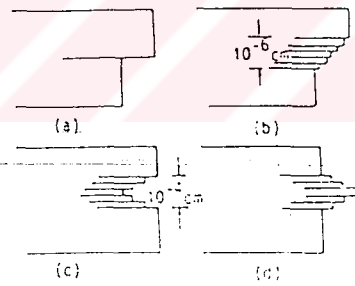
Şekil 7.6 Korozyonsuz Ortamlarda Alternatif Gerilmeli Yorulmada (a) Demir Esaslı, (b) Demir Dışı Malzemelerin S-N Eğrileri ile Gösterilen Yorulma Davranışları (Çakır, 1990).

7.2.2. Yorulma kırılması sebepleri

İşletme koşullarındaki zorlamalar sonucu ortaya çıkan gerilmeler mukavemet bilgisinin temel denklemlerine her zaman uymaz; dolayısıyla çekme veya basma gerilmeleri parça kesitinde eşit olarak dağılma, eğme ve basma gerilmeleri de yüzeyden ortaya doğru doğrusal bir azalma göstermeyebilirler. Yorulma çatlakları gerilme yığılmalarının bulunduğu bölgelerde başlar. Montaj hataları ve makine elemanının öz titreşim frekansına yakın bölgelerde zorlanması sonucu oluşan rezonans titreşimleri veya aşırı yüklerle göre tasarlanıp veya tasarlanmamış olmaması, yorulma çatlaklarına ya da hasarın yol açabilir. Gözlemler yorulma çatlakları ilerleme hızının çatlak derinliğinin karesi ile arttığını göstermektedir. Parçanın ikiye ayrılması uzunca süreyi gerektirdiği ve zorlama sürekli değiştiği için olay yorulma kırılması diye adlandırılır (Bargel ve Schulze, 1980).

7.2.3. Kuru yorulmanın mekanizması

Düzlem yüzeye sahip bir malzeme (levha), düşük değerlerde çekme gerilmesine tabi tutulursa şekil değiştirme, kayma şeklinde ortaya çıkar ve tane içindeki kayma ışık mikroskopunda bakıldığında tek bir basamak şeklinde görülürken, elektron mikroskopunda bakıldığında bunun çok kademeli bir basamaktan meydana geldiği görülür. Aynı numune bir alternatif gerilmeye tabi tutulursa kaymanın ciddi bir değişiklik yaratmaksızın aynı düzlemde ileri-geri hareketi beklenir. Kayma için gerekli olan dislokasyonlardan başka hiçbir hata içermeyen ideal bir malzemede tam tersinir yüklemde bu durum gerçekten ortaya çıkabilir. Kütlenin, iç kısmında yani tanelerde, çekme deneyinde olduğu gibi dislokasyonlar tane sınırında yığılmaz. Dislokasyonlar hiçbir ciddi hasar yaratmadan tane boyunca ileri-geri hareket ederler. Bu ideal durum, bir malzemeden beklenenin çok çok ötesinde bir durumdur. Kayma düzleminde gelişen pürüzlülük kümülatiftir, giderek çoğalır. Çünkü meydana gelen pürüzlülük düzgün bir kaymayı engeller (Çakır, 1990).



Şekil 7.7 a) Statik Kaymada Meydana Gelen Basamağın Düşük Büyütmeli Optik Mikroskopunda, b) Aynı Basamağın Elektron Mikroskopunda Görünüşü, c) Yorulmada Ortaya Çıkan Çentik Profili, d) Pik Profili (Austen, 1979).

Çekme deneyinde yukarıdaki (a) ve (b) şekillerinde oluşan basamaklar, tam tersinir gerilme uygulaması durumunda (c) ve (d)'deki gibi ortaya çıkar. Burada meydana gelen içe doğru olmuş basamaklar (çentik profili) yüzeyden çatlak oluşumu için uygun yerleri oluştururlar. Eğer gerilme, çatlak başlangıcı için yeterince büyük ise kayma düzlemi şeklini elastik hale gelir. Bundan sonra plastik bir hasar yoktur. Kayma düzleminde oluşan pürüzlenmenin simetrik () olmaktan çok () şeklinde olması

karşılaşır. İşaretli yönlerin tersinde kayma engellenir. Bu nedenle kayma yön değiştirdiğinde başka bir düzlemde devam edebilir. Böylece yüzeyde girinti ve çıkıntıları oluşturan kayma bantları meydana gelir. Bu girintilerin oluşturduğu çentikler yorulma çatlamasının başlangıcını meydana getirirler (Çakır, 1990).

7.2.4. Yorulma zorlamalarında hasar durumu

Sürekli artan zorlamalarda şekil değiştirmenin tek yönlü olmasına karşın yorulma zorlamasında kuvvet veya moment, dolayısıyla şekil değiştirme sürekli yön değiştirerek artma-azalma gösterir. Söz konusu şekil değiştirmeler malzemenin kristal kafesi tarafından tam elastik olarak karşılanabildikleri sürece tehlikeli değildir (Tauscher, 1971). Küçük kalıcı şekil değiştirmelerde, kırılma olmadan kristal kafesi tarafından taşınabilirler. Tek yönlü zorlamalarda olduğu gibi yorulma zorlamaları sırasında da pekleşme olayı görülür. Pekleşme sadece şekil değiştirmenin miktarına değil, ayrıca az da olsa frekansa bağlıdır. Yorulma zorlaması uygulanan malzemelerde yapılan metalografik incelemeler, pekleşme sonucu yapı değişikliklerinin olduğunu kanıtlamıştır (Hempel ve Houdremont, 1953). Tekrarlanan şekil değiştirmeler kristal kafes tarafından sürekli olarak taşınmadığı için, yorulma zorlanmasının pekleşme dışında hasar etkisi de vardır. Kaymaların miktarına ve bir ölçüde de frekansa bağlı olarak belirli bir çevrim sayısından sonra ortaya çıkan hasara, malzeme yapısıyla ilgili olarak nelerin yol açtığı yeterince araştırılmamış ve tatmin edici bir kuramsal açıklama yapılamamıştır. Ancak x-ışınları araştırmaları hasar başlangıç kademeleri hakkında bazı bilgiler sağlamış ve yorulma esnasında iç gerilmelerin meydana geleceğini göstermiştir (Müller vd.1949).

7.3. Kırıkların Oluşum Şekilleri ve Mikroskobik Görünümleri

- a) Düzgün, mat veya bazen sürtünerek parlamış bölge, yorulma çatlağı diye tabir edilir.
- b) Kaba kristalli, yarıklar içeren, kısmen kalıcı şekil değiştirmiş ve son çevrim sırasında zorunlu olarak ani kırılmış bölge son kırılma yüzeyidir.

7.3.1. Yorulma kırılmasının oluşum şekilleri

Çekme zorlamasının tek başına etkimesi çok ender rastlanan bir olaydır. Kuvvet etkime noktasının ekseninden kayması ile çekme zorlanmalarına ek olarak tek taraflı

eğmelerin ortaya çıkması ve yorulma çatlağının ilerlemesiyle eğme gerilmelerinin artması söz konusudur. Dönen parçaların çevresel eğilmesi sonucu oluşan şekiller çekme veya tek taraflı eğmeye çok benzer olabilirler. Ancak çatlağın ilerlemesi daha hızlıdır. Çekme veya eğme zorlanmalarında görülen yorulma kırılmalarındaki kırık yüzey daima gerilmelere dik yönde oluşur. Anma gerilmesinin yorulma dayanımını aşması durumunda ise, yorulma ömrü hiçbir zaman sonsuz olmayıp, gerilmenin seviyesine bağlı olarak birkaç çevirim mertebesine kadar azalabilir. Böylece tek yönlü sürekli artan zorlama sonucu meydana gelen kırılma zorunlu kırılmadır (Richter vd., 1956). Yorulma çatlak yüzeyinin düzgün olmasına karşın, sürekli yorulma çatlağı kısmen yarıklar içeren basamaklı ve taneli bir görünümündedir. Duraklama çizgileri yerine de çoğunlukla daha büyük aralıklı çıkıntılar oluşur. Tüm yorulma kırılmalarında çatlağın ilerlemesi sırasında kalan kesitin küçülmesi sonucu çoğunlukla gerilme arttığından, yorulma çatlağı ile zorunlu kırılan son kırık yüzeyi arasında belirgin bir süreli yorulma çatlağı görülür (Bargel vd., 1980).

7.4. Yorulmaya Tesir Eden Faktörler

Dış Etkenler :

- 1- Konstrüksiyonla ilgili çentikler,
- 2- Kuvvetlerin doğrultu değiştirdiği yerler,
- 3- Kuvvet etki noktaları.

Yüzey etkilenmeleri:

- 1- Yüzey pürüzlülüğü (yüzeydeki gerilme artırıcılar),
- 2- Metal yüzeyinin yorulma mukavemetindeki değişimler,
- 3- Yüzeyin artık gerilme durumundaki değişimler (Dieter, 1976).

İç Etkenler:

- 1- Curuf kalıntıları; oksitlerin, nitrürlerin ve karbürlerin tane sınırlarına çökmesi,
- 2- Segregasyonlar,
- 3- Yüzey kabarcıkları,
- 4- Mikrolunkerler ve mikroboşluklar,
- 5- İç çatlak kümeleri,
- 6- Talaşlı veya talaşsız şekil verme veya ısıtma işlemlerden kaynaklanan iç gerilmelerin özellikle bunların çekme gerilmesi olması durumunda.

Belirtilenlerin dışında; çalışma durumu, doğrudan hasara yol açan malzeme ya da yapı hataları bulunabilir (Dittschlag vd., 1955).

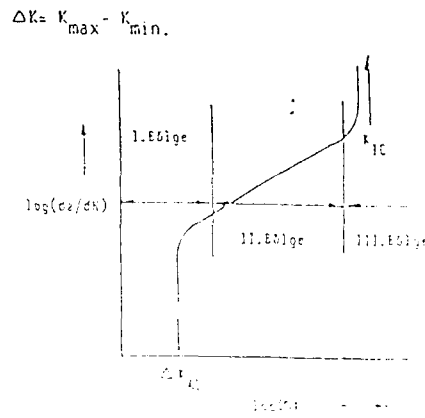
- yapı hataları bulunabilir (Dittschlag vd., 1955).

7.4.1. Yüzey tesirleri

Eğme ve burulma gibi yüklemeye maruz kalan malzemede max. gerilme yüzeyde meydana gelen hasarın yüzeyde başlamasına neden olur. Eksenel yüklemeye ise neredeyse tamamen hasar yüzeyde başlar. Hassas parlatılmış yüzeylere sahip numunelerin yorulma deneylerinde yüksek değerler verdiği bilinmektedir (Wassermann, 1965). Yorulma hasarının yüzey durumuna bağlı olmasından dolayı yüzey malzemesinin yorulma mukavemetinin değişmesi yorulma özelliklerini önemli ölçüde değiştirecektir ve mukavemeti artırma miktarı parçanın çapına ve yüzey sertleştirmenin derinliğine bağlıdır (Kuzucu vd., 1997). Isıl işlem ile, yorulma özelliklerinde iyileşmeler sağlanabilir. Plastik deformasyon, deforme olan kısmın iç kesiti boyunca üniform olmadığından artık gerilmeler yüzeyde meydana gelir (Yıldırım vd., 1994).

7.4.2. Gerilme yoğunluğu

Yorulma çatlaklarının gelişmesi veya yayılması davranışları salınım başına çatlak büyümesi hızı (da/dN)' nin periyodik gerilme yoğunluğu ΔK ' ya göre belirlenmesiyle incelenir. Aşağıdaki şekilde şematik olarak zararsız ortamdaki durumunu gösteriyor (Şekil 7.8). ΔK , bir periyodik salınımda, K_{max} maximum gerilme yoğunluğu ile K_{min} , minimum gerilme yoğunluğu arasındaki farkı gösteriyor.



Şekil 7.8 Şematik [Log (da/dN) - Log ΔK] Yorulma Çatlak Büyüme Hızı Eğrisi (Tomkins, 1979)

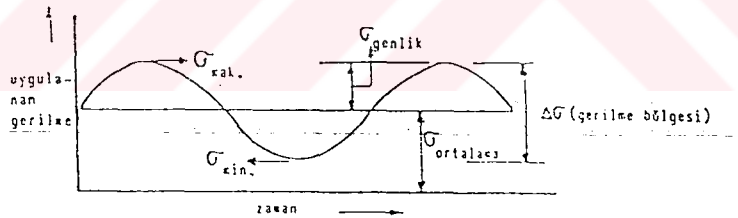
Şekilde görüldüğü gibi eğri, üç bölgeye ayrılmış durumdadır. I. bölgede ΔK değeri

ΔK_{AL} 'e yaklaşır ki, bu değerin altında çatlak büyüme hızı ihmal edilir derecede küçüktür. Başka deyişle ΔK_{AL} (threshold value, ΔK_{TH}), altında yorulma çatlaklarının büyüyemeyeceği periyodik gerilme yoğunluğunun limit değerini belirler. 2.bölgede çatlak büyüme hızı periyodik gerilme yoğunluğuyla artar ve bu durum alttaki denklemlerle tanımlanır; $da/dN = C \cdot \Delta K^n$

3. bölge hızlanmış çatlak büyümelerini ve $K_{max} \rightarrow K_{IC}$ 'ye (kırılma tokluğu) yaklaştığı çatlak dengesizliğinin olduğu bir bölgeyi belirler (Çakır, 1990).

7.4.3. Yükleme oranı

Gerilme oranı R (uygulanan minimum gerilmenin maximum gerilmeye oranı) düz ve çentikli malzemelerin yorulma davranışları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. (log da/dN -log ΔK) eğrisindeki bölgeleri R gerilme oranı açısından incelemeye başlamadan önce R'nin etkisini en iyi biçimde gösteren "Goodman" diyagramının incelenmesi faydalı olur. Goodman diyagramı yorulmadaki sabit ömür için maximum, minimum, ortalama gerilme ve gerilme genliği değerlerine göre düzenlenmiş bir diyagramdır. Periyodik yüklemenin en basiti olan sabit genlikli sinüzoidal gerilme salınımı Şekil 7.9' da görülmektedir.



Şekil 7.9. Sabit Genlikli Sinüzoidal Gerilme Yükleme (Parkins, 1979).

Şekildeki gerilme yüklemesindeki büyüklükler, özellikle σ genlik, σ_0 (orta. ger.) ve $\Delta\sigma$ (ger. böl.) yüklemeyi boyutlandırır ve alttaki şekilde tanımlanırlar: Ortalama gerilme, σ_{max} ve σ_{min} değerlerinin cebirsel ortalamasıdır

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_{Max} + \sigma_{Min}}{2} \quad \sigma_G = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{Max} - \sigma_{Min}}{2}$$

Gerilme genliği, σ_{max} ve σ_{min} değerlerinin cebirsel farkının $(\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min})$ yarısıdır.

7.4.4. Metalurjik faktörler

Belirli bir metal veya alaşımın yorulma performansını arttıran kesin bir metalurjik faktör yoktur. Yorulma deneyleri ısı işlem gibi bazı metalurjik faktörlerin etkilerini belirlemek için yapılmaktadır. Yorulma özellikleri genellikle çekme özellikleriyle ilgilidir. Yorulma limitinin çekme mukavemetine oranı, yorulma oranı olarak tanımlanmaktadır. Ni, Cu ve Mg gibi çeşitli demir dışı metaller yaklaşık 0,35'lik bir yorulma oranına sahiptir. Akma mukavemeti çeşitli mukavemet arttıran mekanizmalar ile artarken yorulma limiti genellikle oransal olarak artmaktadır. Yorulma ömrünün tane büyüklüğüne olan ilişkisi deformasyon moduna göre değişir. Tane büyüklüğü 1.safha çatlamanın etkili olduğu yüksek devirde, düşük gerilmede yorulma dayanımı üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Yüksek yığılma hatası enerjisine sahip malzemelerde (Cu, Al) hücre yapıları kolaylıkla gelişir ve bunlar 1. safha çatlak ilerlemesini kontrol ederler. Böylece dislokasyon hücre yapısı, tane büyüklüğünün tesirini kapatır ve yorulma ömrü sabit gerilmede tane büyüklüğünden etkilenmez (Dieter, 1976).

7.4.5. Sıcaklık etkileri

Genel olarak, metallerin yorulma mukavemeti oda sıcaklığının üzerinde artan sıcaklıkla ve altında düşen sıcaklıklarda azalmaktadır. Artan sıcaklıkla yorulma hasarında sürünme hasarına geçiş, hasar tespitini de değiştirerek genellikle trans kristalli yorulma hasarından inter kristalli sürünme hasarına geçiş olacaktır. Yerel tane sınırı oksidasyonu önemli ölçüde çatlak başlamasına yardım edebilir. Genel olarak bir malzemenin daha yüksek sürünme mukavemeti, daha yüksek sıcaklıkta mukavemeti demektir. Ancak en iyi yüksek sıcaklık yorulma özellikleri meydana getiren metalurjik işlem en iyi gerilmeli sürünme-kopma özellikleriyle sonuçlanır. Coffin yüksek sıcaklık yorulmasının frekans bağımlılığını göz önüne alarak, düşük devirli yorulma için şu analizi geliştirmiştir. $\Delta\epsilon_p = C_2 N^{-b'v(1-k),b}$ ve $\Delta G/2 = A' N^{-b'v k'}$ denklemleri; Gerilme genliği ve yorulma ömrü, farklı frekanslar için ilgi kurulabilir. Burada; A' , b' , ve k' sabitleri gerilme analizi ile elde edilmiştir (Dieter, 1976).

7.4.6. Isıl yorulma

Yüksek sıcaklıklarda yorulma hasarı meydana getiren gerilmelerin nedenleri mekanik olmayabilir ve yorulma hasarı değişen ısıl gerilmelerle meydana gelebilir. $\sigma = \alpha.E.\Delta T$, α

Eğer hasar ısıl gerilmenin sonucunda meydana gelirse, ısıl şok olarak adlandırılır. Tekrarlanan ısıl gerilmeler sonucu meydana geliyorsa ısıl yorulma olarak adlandırılır. Isıl yorulma hasarı için eğilim; $\sigma_f.k/E.\alpha$ parametresi ile ilgili olduğu görülmektedir. Bu parametrenin yüksek değeri, ısıl yorulmaya, iyi direnç gösterdiği anlamına gelir (Dieter, 1976).

8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

8.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

İlk aşamada her bir alaşıma öngörülen oranda alaşım elementi ilave edildikten sonra, deney numuneleri kum kalıplara dökülmek suretiyle elde edildi. Bu çalışmada sekiz çeşit deney numunesi kullanıldı. Tablo 8.1'de numunelerin spektral analiz cihazından alınan kimyasal bileşimleri verilmektedir. Bütün numuneler birçok alanlarda kullanılan az katkılı kalay bronzlar olup, bünyelerine değişik oranlarda P, Fe ve Mn elementleri katılmak suretiyle dayanımları artırılarak intermetalik bileşikler oluşturulup, aşınma, mikroyapı, mekanik özellikleri ve yorulma üzerine ilave alaşımların yaptıkları etkiler incelenmiştir .

Tablo 8.1. Deneylerde Kullanılan Numunelerin Kimyasal Analizleri .

Num. adı	Sn	Zn	Pb	P	Fe	Mn	S	Cu
R1	5.55	6.15	2.37	0.011	0.039	0.0079	0.030	kalan
P1	5.63	6.77	2.47	0.046	-	-	"	"
P2	5.40	6.63	2.26	0.105	-	-	0.0055	"
P3	5.57	6.82	2.40	0.147	-	-	0.028	"
P4	5.56	4.10	2.50	0.224	-	-	0.026	"
F1	5.62	5.70	2.38	0.085	0.014	-	0.022	"
F2	5.56	5.78	2.48	0.080	1.080	-	0.018	"
M	5	5.58	2	-	-	0.226	0.030	"

Referans numune; impürite olarak Fe, P ve Mn elementlerini, özenle alaşımlandırılan diğer numunelerle karşılaştırılabilecek şekilde çok az içermektedir. Bu numune diğer numunelerin aşınma, yorulma ve mekanik özelliklerini karşılaştırmak ve değerlendirmek amacıyla referans malzeme olarak kullanıldı. P1, P2, P3, P4 nolu numuneler % 0,046 P içeriğinden % 0,224 P içeriğine kadar değişen oranlarda artırılan fosforun etkisini incelemek için kullanıldı. F1 ve F2 numunelerinde Fe içeriğinin artırılması halinde, demirin alaşımlar üzerine olan etkileri araştırıldı. R1 ve M1 numunelerinde ise Mn içeriğinin artırılması halinde, tüm (fosforlu, demirli, manganlı) alaşımlandırılmış numunelerin; aşınma, yorulma, mekanik özellikler ve mikroyapıları üzerine bu alaşımlandırmanın etkileri araştırılarak incelendi.

8.2. Metalografik Çalışmalar

Deney numunelerinin mikro yapısını ve bu yapılar içinde oluşan fazları belirlemek için numuneler, 80 numaradan 1200 numaraya kadar zımparaya tutularak yüzeyleri temizlendi. Sonra numunelerin, 6 μ ve 1 μ elmas pastadan ve alüminadan geçirilen yüzeyleri, saf alkolle silinerek metalografik anlamda parlatma işlemleri tamamlandı. Metalografik incelemeler için parlatılan numuneler 40 gr CrO₃ + 7,5 gr NH₄Cl + 50 ml HNO₃ + 8 ml H₂SO₄ + 100 ml H₂O seyrelticisi ile seyreltilen ve 20 gr CrO₃ + 2 gr Na₂SO₄ + 1,7 ml HCl + 100 ml H₂O şeklinde verilen Beraha reaktifi (Geçkinli, 1989) ile dağlandı. Dağlama işleminden sonra numunelerin metal mikroskobunda metalografik yapılarını gösteren fotoğrafları çekildi.

8.3. SEM Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemeleri

Yüzeyleri dağlanan deney numuneleri Ceol CSM 6400 seri nolu 1990 Japon yapımı SEM mikroskobu ile tarandı. Alaşımın mikroyapılarında oluşan fazlar, matrisin yapısı, intermetalik fazların dağılımları, incelendi. Ayrıca aşınma ve yorulma deneyine tabi tutulan numunelerin yorulma sonucu kırılan ve aşınan yüzeylerinden farklı büyütmelerde fotoğraflar çekildi.

8.4. EDS (Energy Dispersive Spectrograf) Noktasal Analiz Çalışmaları

SEM' in bir ünitesini oluşturan EDS cihazında numunelerin mikroyapısında görülen matrisin, interdendritlerin ve tanımlanması gereken birçok intermetalik fazların, noktasal analizleri yapıldı. Bunlardan elde edilen piklerin grafik çıktıları alınarak, tartışma ve sonuçların belirlenmesinde ayrıntılı bir tarzda değerlendirildi.

8.5. X-Işınları Difraksiyonu (X-Ray Diffraction) Çalışmaları

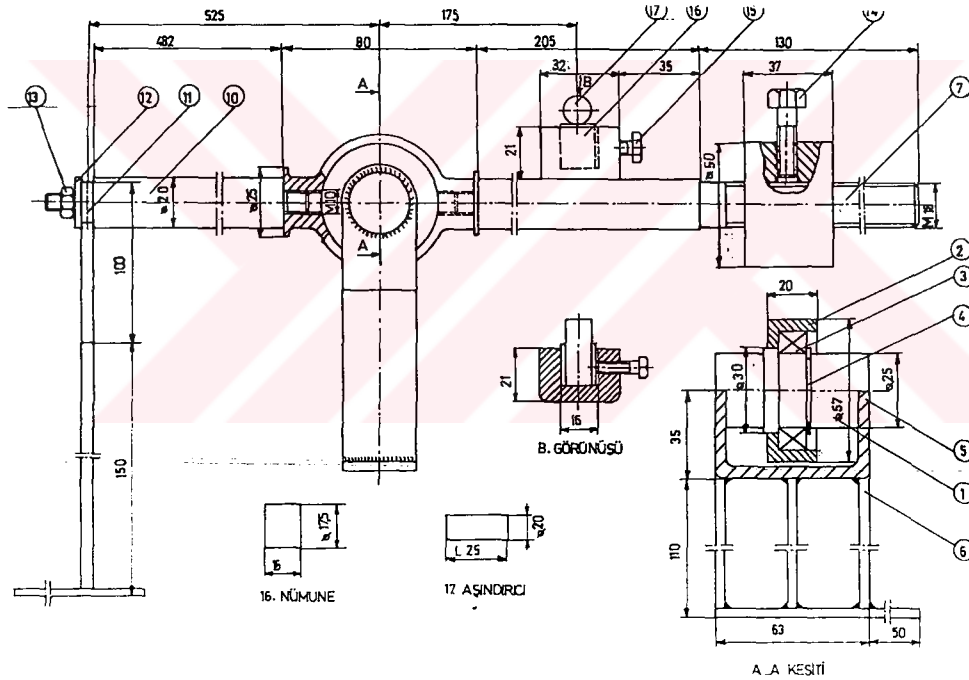
Tüm numunelerdeki yapıların ve intermetalik fazların Philips TW 1220 seri nolu 1972 Alman yapımı X-Ray Diffraction cihazında pikler elde edilmek suretiyle, kristal düzlemlerinin miller indisleri belirlendi ve X - Ray grafikleri çizildi.

8.6. Sertlik Deneyleri

Tablo 8.1'deki alaşımların yüzey sertlikleri, Instron Wolpert GmbH 1996 Alman yapımı sertlik ölçme aparatında tespit edildi. Numunelerin yüzey sertlikleri 5 kg'lık yük altında HV skalası ile ölçüldü. En az sekiz ölçüm yapılarak, bu ölçümlerin ortalama sertlik değerleri alındı.

8.7. Aşınma Deneyleri

Tablo 8.1 'de verilen numunelerin adhesiv aşınma davranışlarını incelemek için deneyler oda sıcaklığında 30 N'lık sabit yük ve 11,25 dev / dak. sabit hızla gerçekleştirildi. Kullanılan deney cihazı, numunelerin şekil ve boyutları Şekil 8.1'de verilmiştir.



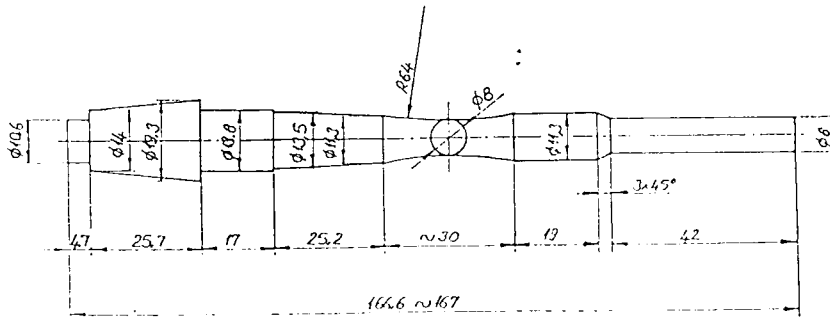
Şekil 8.2. Aşınma Deney Aparatı (Korkut, 1997)

- | | |
|----------------------------------|------------------------------------|
| 1 Mil (Ç 1040) | 9 Ağırlık parçası (C 22) |
| 2 Yatak (C 35) | 10 Kol (C 35) |
| 3 Bilyalı yatak (6005 DIN 625) | 11 Ağırlık taşıyıcısı (Sac 2 mm) |
| 4 Emniyet segmanı (Ç 1030) | 12 Rondela 7 (Ç 1030) |
| 5 U demiri (C 22) | 13 Somun M 6 TS 1026 1 (Ç 1030) |
| 6 Lama demiri (C 22) | 14 Cıvata M 10x24 TS 1021 1 |
| 7 Kol (C 22) | 15 Cıvata M 5x18 TS 1021 |
| 8 Numune tutucu (C 35) | |

Her bir numune için üç adet aşınma deneyi yapıldı. Aşındırıcı olarak SAE 1040 çeliği kullanıldı. Aşınma yolu 450 m olarak belirlendi. Aşınma deneyleri her 45 m aşınma yolu sonunda deney durdurularak ağırlık kaybı tespiti yapıldı. Ağırlık kayıpları 10^{-5} hassasiyetindeki elektronik terazi kullanılarak bulundu. Deney aralarında numunelerin yüzeyleri alkolle temizlenerek yüzeydeki aşınma ürünü partikülleri atıldı. Aynı zamanda yüzeyde oluşabilecek değişiklikler gözle kontrol edildi. Aşınma yolu olan toplam 450 m tamamlandıktan sonra cihaz durdurulup numune son defa alkolle temizlenerek tartma işlemi tekrar yapıldı. Böylece numunenin başlangıç ve son durumu arasındaki ağırlık farkı tespit edilerek aşınma yolu boyunca toplam ağırlık kaybı da bulundu.

8.8. Yorulma Deneyleri

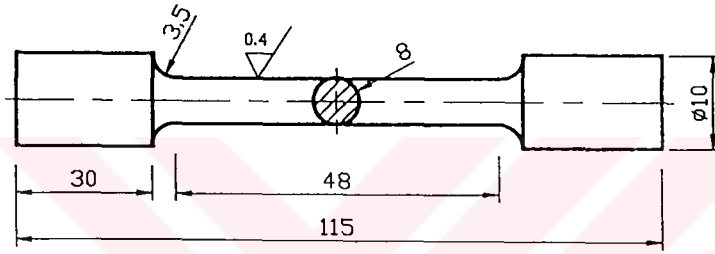
Talaşlı üretim yöntemiyle hazırlanan numuneler taşlandıktan sonra Fransız yapımı (Fatigue Testing Machine) MT 3012 Terco Leroy Somer 1991, 3000 dev/dak hızla dönen yorulma cihazında, yorulma deneyleri, döner eğme yüklemesiyle gerçekleştirildi. Her alaşım için sekiz deney numunesi üzerinde yorulma ömrü testi yapıldı. Yorulma kırık yüzeylerinin mikro yapılarını ve deney sonunda numuneler üzerinde meydana gelen yorulma kırık izlerini belirlemek için, optik ve taramalı elektron mikroskobunda bir seri metalografik çalışmalar gerçekleştirildi. Elde edilen yorulma grafikleri ile metalografik çalışmalar biraraya getirilerek sonuçlar tartışma kısmında ayrıntılı olarak değerlendirildi. Şekil 8.2'de yorulma deney numunesi görülmektedir.



Şekil 8.2. Yorulma Deneyi Numunesi

8.9.Çekme Deneyleri

Tablo 8.1'de verilen alaşımların hepsinden çekme gerilmesi deneyleri için talaşlı üretim yöntemiyle 8 x 40 TS 13 A tipi çekme deneyi numuneleri hazırlandı (Şekil 8.3). Bunlardan her bir numune için üç adet çekme deneyi yapıldı. Bu deneyler seri No:H50 KM 411 50000 N'luk Hounsfield 1990 İngiliz yapımı çekme aparatında gerçekleştirildi. Elde edilen değerlerin ortalaması alınarak çekme gerilmeleri (N/mm^2) cinsinden bulundu. Ayrıca % uzama-çekme gerilmesi eğrileri vasıtasıyla akma mukavemeti, ve enerji kapasitelerinin tespitleri yapıldı.



Şekil 8.3. Çekme Deneyi Numunesi

9. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

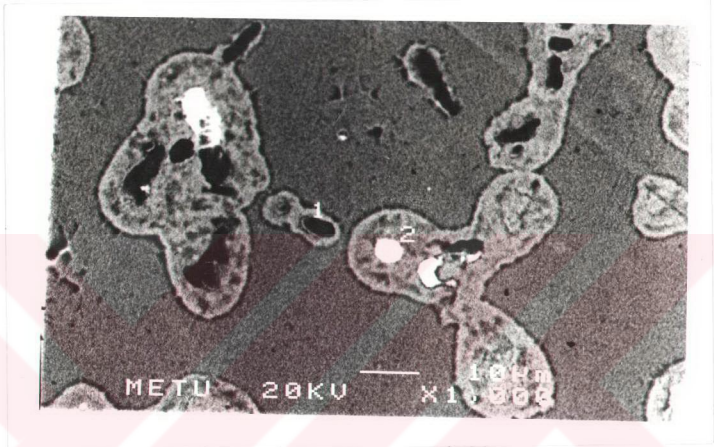
9.1. Fe İlaveli Numunelerin Mikroyapı (Optik, SEM, EDS, X-RAY) Sonuçları

Her iki numune dendritik mikroyapıya sahiptir. Şekil 9.1 a ve b' de görülen demir içeren F2 nin tane boyutları, çok az demir içeren F1' in tane boyutlarından daha büyüktür.



b)Şekil 8.1. Demirli Numunelerin Optik Fotoğrafları a) F1 b) F2 (X 50)

F1' de dendritler arası bölgelerde görülmeyen matrise ait mikro yapı, F2' nin interdendritik bölgelerinde yer yer görülür duruma gelmiştir. F1' e ait SEM mikrografisi Şekil 9.2' de görülmektedir. Matris kübik yüzey merkezli (kym) yapılı α -Cu dur. EDS' de alınan değerlere göre matris içinde Zn, Sn, ve S elementlerinin olduğu belirlenmiştir (Şekil 9.3).



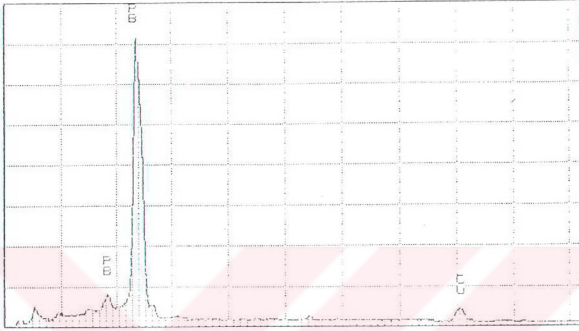
Şekil 9.2. F1 Numunesinin SEM Fotoğrafı. (X 1000)



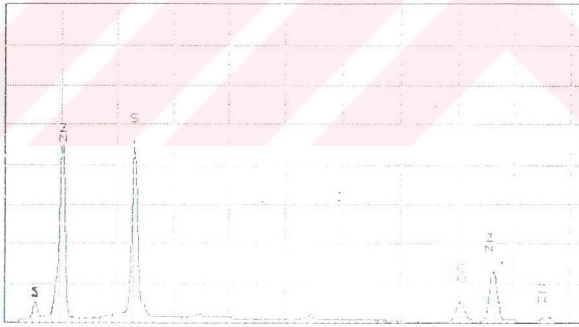
Şekil 9.3. F1 Numunesi Matrisinin EDS Kimyasal Analizi

Dendrit kollarının arasında büyük bloklar halinde Cu-Sn ve Cu-Zn faz karışımı oluşmuştur. Bu faz karışımı birbiri içine çökelmiş durumda intermetalik fazların ana

yapısını oluşturmaktadır. İç içe çökelen bu yapı içerisinde yuvarlak (globular) şekilde Pb (beyaz) ve (Zn, Cu)S (siyah faz) oluşmuştur. Bu fazların EDS spektrumları sırasıyla Şekil 9.4 ve 9.5'te görülmektedir. (Zn, Cu)S fazındaki elementlerin EDS analizinden tespit edilen oranları % 37,98 atomik (at.) Zn, % 12,79 at. Cu ve % 49,28 at. S şeklindedir.



Şekil 9.4. Şekil 9.2'deki Beyaz Fazın (Pb'nin) EDS Analizi



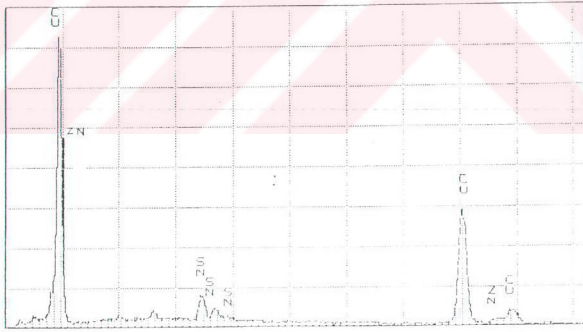
Şekil 9.5. Şekil 9.2'deki Siyah Fazın [(Zn, Cu)S]'in EDS Analizi

F2'nin SEM mikrografisi Şekil 9.6'da görülmektedir. Bu numunedeki EDS analizleri, F1'den farklı olarak matris içerisinde Zn, Sn ve S'e ilaveten bir miktar Pb elementinin de bulunduğunu göstermektedir.



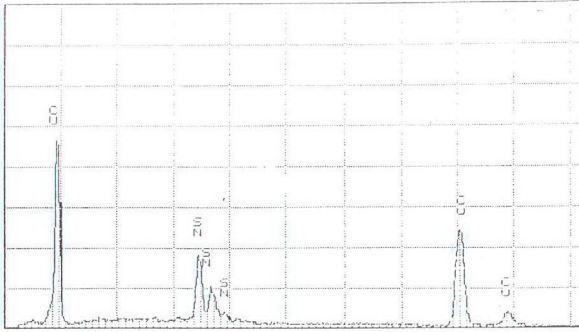
Şekil 9.6. F2' Numunesinin SEM Fotoğrafı. (X 1700)

F1 numunesine benzer olarak dendrit kolları arasında Cu-Sn ve Cu-Zn faz karışımı oluşmuştur. Faz karışımlarını gösteren EDS sonuçları Şekil 9.7'de görülmektedir.



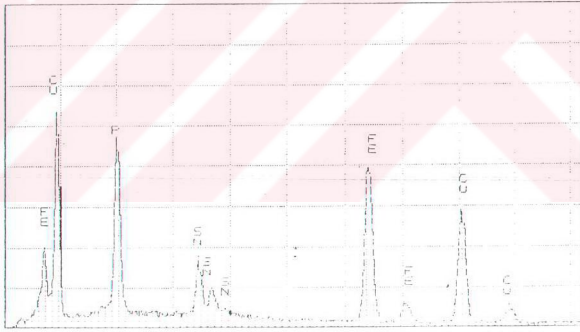
Şekil . 9.7. Şekil 9.6'daki (Koyu Gri Bölge) 3 Numara ile Gosterilen Yerin EDS Analizi

Bu faz karışımı içerisinde $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ (açık gri bölgeler) bileşiğinin çokeldiği EDS analizi Şekil 9.8 'de görüldüğü gibi tespit edilmektedir.



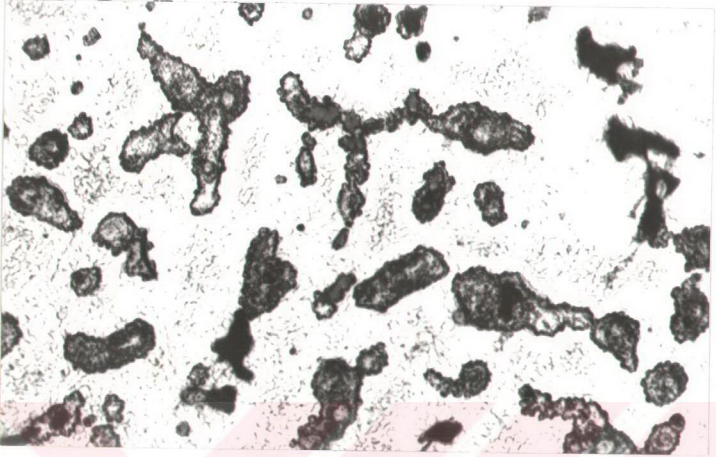
Şekil 9.8. Şekil 9.6' da (Açık gri bölge) 2 Numara ile Gösterilen Yerin EDS Analizi.

Yuvarlak çok açık renkli beyaz bölgeler Pb fazlarıdır. $(\text{Cu,Fe})_3\text{P} + \text{Cu}_6\text{Sn}_5$ şeklindeki verilen bir başka faz karışımı, daha açık gri bölgelerde (2 nolu) ve yan yana çökelen siyah bölgeler (1 nolu) Şekil 9.9' da EDS analizlerinden görüleceği gibi oluşmuştur.

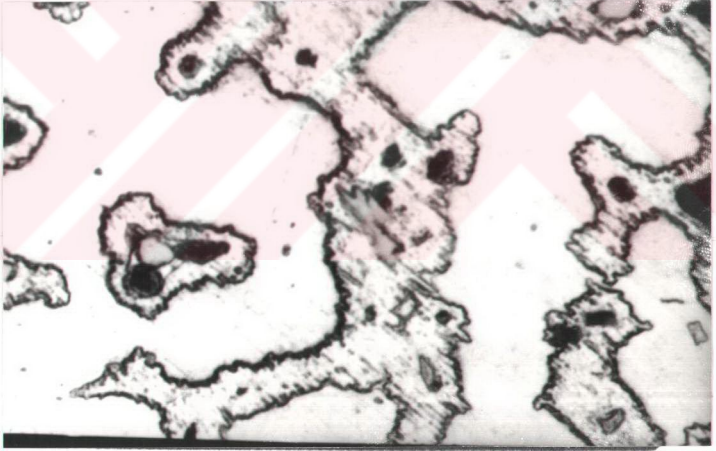


Şekil 9.9. Şekil 9.6 daki (Siyah faz) 1 Numara ile Gösterilen Yerin EDS Analizi

Fe elementi bu alaşımda, Şekil 9.10 optik mikroskopisinde görüldüğü gibi, Pb seyratasyonunu azaltmıştır. F2'de interdendiritlik bölgelerde seyrelti halinde görülen Pb yuvarları F1'de aynı büyüklükteki alanda interdendiritlerde ve matriste daha fazla gözükmektedir.



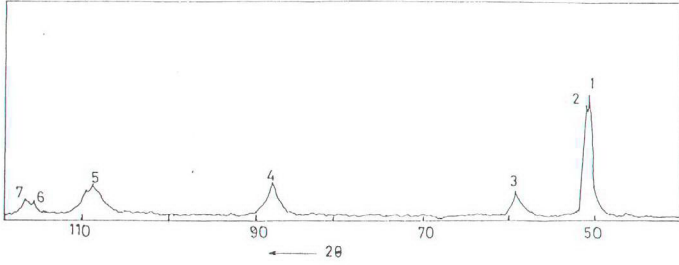
a)



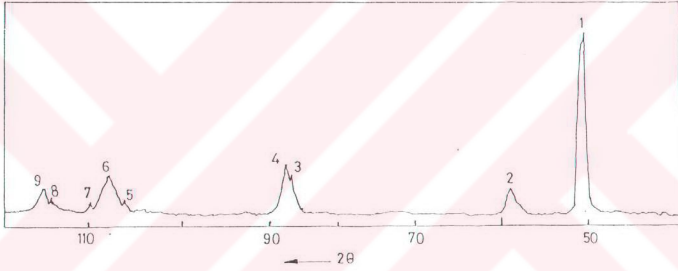
b)

Şekil 9.10. Numunelerin Optik Fotoğrafları a) F1 b) F2 (X 200)

F1 ve F2 numunelerinin X-ışınları difraktomları Şekil 9.11 ve Şekil 9.12' de görülmektedir. Bu difraktomlara göre F1 ve F2 numunelerinde oluşan ve oluşması muhtemel fazların listesi sırasıyla Tablo 9.1 ve Tablo 9.2' de verilmiştir.



Şekil 9.11. F1' in X-RAY Difraktromu.



Şekil 9.12. F2' in X-RAY Difraktromu.

Tablo 9.1 F1' de Oluşan Fazların, Şekil 9.11' deki X-ışını Piklerine Katkıda Bulunan Kristal Düzlemlerinin Miller İndisleri.

Pik No	1	2	3	4	5	6	7
Fazlar	1	2	3	4	5	6	7
α -Cu	111		200				
Pb							322
$\text{Cu}_{31}\text{Sn}_5$	411		500, 403	632			661
Cu_9Sn_5	110		200				220
Cu_6Zn_8	411, 330		422				
CuZn(P')		110					
ZnSn_2	123		131		052		
PbSnS_2	021		211	310			042
ZnS	201		111, 300				
Cu_2S	513		613		848		
CuS						303	

Tablo 9.2 F2 de Oluşan Fazların, Şekil 9.12 deki X-ışını Piklerine Katkıda Bulunan Kristal Düzlemlerinin Miller İndisleri

Pik No Fazlar	1	2	3	4	5	6	7	8	9
α -Cu	111	200							
Pb									332
$\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$	411	500, 403		632					661
Cu_6Sn_5	110	200							220
Cu_5Zn_8	411, 330	422							
ZnSn_2	123	131				052			
PbSnS_2	21	211		310					042
Cu_7S	513	613				848			
Fe_3P							602	522	
FeZn_9	421	433		550					756
FeP_2				211					
FeZn_{21}	330	500, 430		700					
FeSn_2				422					433
Fe_2P									222
Cu_5FeS_4	315	116		777			769		789
CuFe_2S_3	300	330		015		305			335
$\text{SnCu}_2\text{FeS}_4$			330						
Cu_3P				214	413		332		

Şekil 9.2 ve Şekil 9.6 karşılaştırıldığında; F1'de oluşan (Zn,Cu)S fazının F2 nolu numune de büyük oranda engellendiği görülür. Buna sebep olarak da Fe elementinin; Tablo 9.2'de verilen FeZn_9 , FeZn_{21} , Cu_5FeS_4 , $\text{SnCu}_2\text{FeS}_4$ gibi intermetalik fazları meydana getirmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Bundan başka yine F1 numunesinde görülmeyen $(\text{CuFe})_3\text{P}$ fazının da F2 nolu numune de çökeldiği açıkça görülmektedir.

9.2 Fe İlaveli Numunelerin Mekanik Deney Sonuçları

F1 ve F2 numunelerinin çekme gerilmesi, yüzey sertliği, aşınma ve yorulma dayanımları deneylerinin sonuçları Tablo 9.3' de verilmiştir.

Tablo 9.3. Numunelerin Mekanik Özellikleri

Num. Adı	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	% uzama	Enerji kapasitesi (10 ⁶ J/m ³)	% uzam. x Çek.Muk. (N/mm ²)	Yorulma dayanımı (N/mm ²)	Sertlik (HV)	Ağırlık Kaybı (mg)
F1	103.45	224.8	31.62	1616.5	71081.76	60	108	24.3
F2	105.45	232.0	14.60	2307.5	33918.40	80	133	35.1

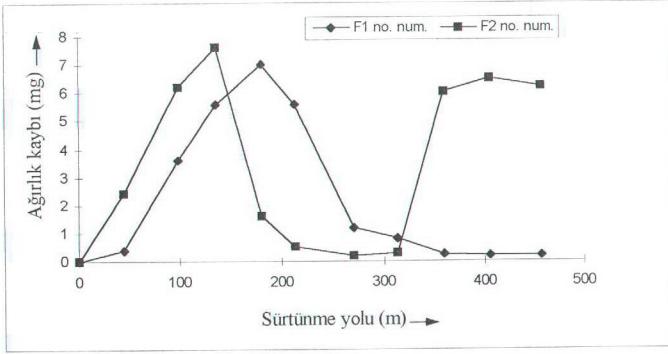
Tablo 9.3'de verilen ve deneylerden elde edilen değerlerden görüleceği gibi Fe; çekme dayanımını, yüzey sertliğini, yorulma sınırını, enerji kapasitesini ve ağırlık kaybını artırmış, % uzama ve kabaca malzemelerin tokluğu hakkında bilgi veren % uzama $\times$ çekme mukavemetini düşürmüştür. Çekme dayanımı, sertlikteki artış ve uzamadaki azalmanın sebebi, Fe'nin bir miktarının matris içinde çözünerek onu sertleştirmesinden ve Fe-P, Fe-Zn, Fe-Sn vb. demirli bileşiklerin matris içerisinde ve daha çok dendrit kolları arasında çökmesinden kaynaklanmaktadır. Çekme mukavemetindeki artışın sonucu olarak da yorulma dayanımı artmıştır.

Tablo 9.3'de görüldüğü gibi F2 nolu numunenin ağırlık kaybı diğerinden daha fazladır. Ağırlık kaybının fazla olması doğal olarak aşınma direncinin azalması anlamına gelmektedir. Buradan hareketle Tablo 9.3'e göre aşınma direnci ile tokluk değeri (% uzama $\times$ çekme dayanımı) arasında doğru bir ilişkinin olduğu söylenebilir.

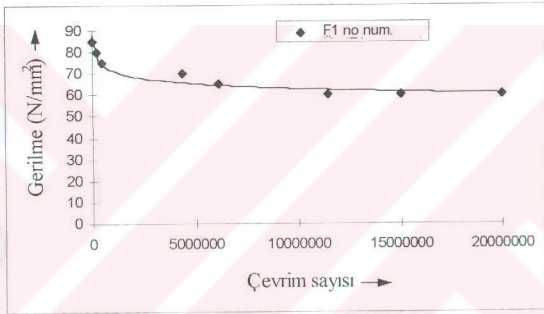
F2 nolu numunede tokluğun diğerine göre düşük olmasının sebebi Tablo 9.2'de görüldüğü gibi Fe elementinin bu numunede oluşmasına sebep olabileceği sert, kırılğan metallerarası Fe içerikli bileşiklerdir. F1'in aşınma direncinin F2'nin aşınma direncinden yüksek olmasının sebebi, yukarıda bahsedildiği üzere, Pb segregasyonunun bu numunede daha fazla olmasıdır. Şekil 9.10.a ve b'de Pb'nin globular şekilde F2' ye nazaran F1'de daha yoğun olduğu görülmektedir. Çünkü aşınma esnasında yüzeyden kopan Pb parçacıkları sürtünen yüzeyler arasına sıvanarak sürtünmeyi azaltmaktadır. Bu durum ise aşınma direncini olumlu yönde etkilemektedir. Her iki numunede aşınma deneyi 45 m' de durdurularak ağırlık kaybı tespiti yapıldığında Şekil 9.13'de görüldüğü gibi aşınma yolu ağırlık kaybı ilişkisi farklılık sergilemektedir.

Bu numunelerin kırık yüzeyinde Pb parçacıklarına rastlanmıştır. Örnek olarak F2 nolu numunenin yorulma kırık yüzeyinin SEM mikrofrafisi Şekil 9.15'de verilmiştir. Buradan hareketle Pb partiküllerinin her iki numune için de yorulma dayanımını olumsuz olarak etkileyebileceği söylenebilir. Özellikle F2 nolu numunede demirli sert intermetalik bileşiklerin yanı sıra, Fe elementinin bu numunede kurşun segregasyonunu azaltması da, Şekil 9.14.a ve b'de görüldüğü gibi, F2 'nin yorulma dayanımının diğerine göre yüksek çıkmasına sebep olmaktadır.

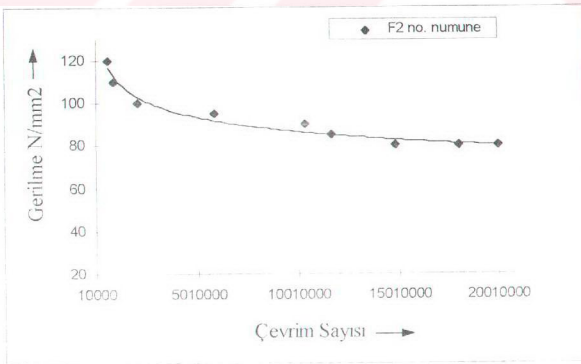
Şekil 9.16'da; aşınma çizgileri ve aşınma esnasında çizgiler üzerinde yırtılma ve kopmalar görülmektedir.



Şekil 9.13. F1 ve F2 Numunelerinin Aşınma Eğrileri



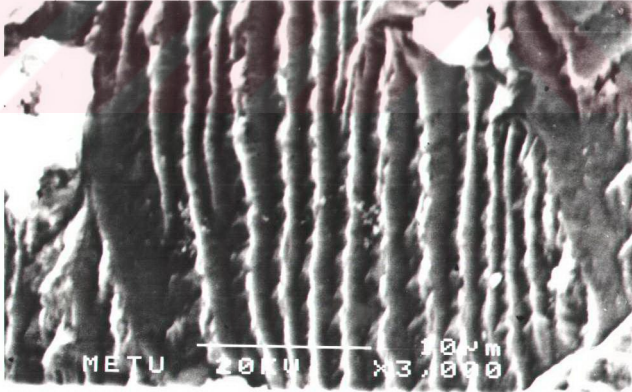
Şekil 9.14. a. F1 Numunesine ait Gerilme (Rm) - Çevrim (N) Eğrisi



Şekil 9.14. b. F2 Numunesine Ait Gerilme (Rm) - Çevrim (N) Eğrisi

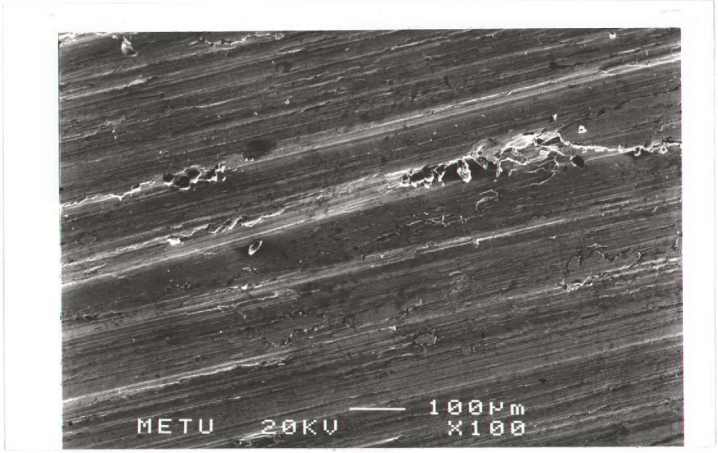


a)



b)

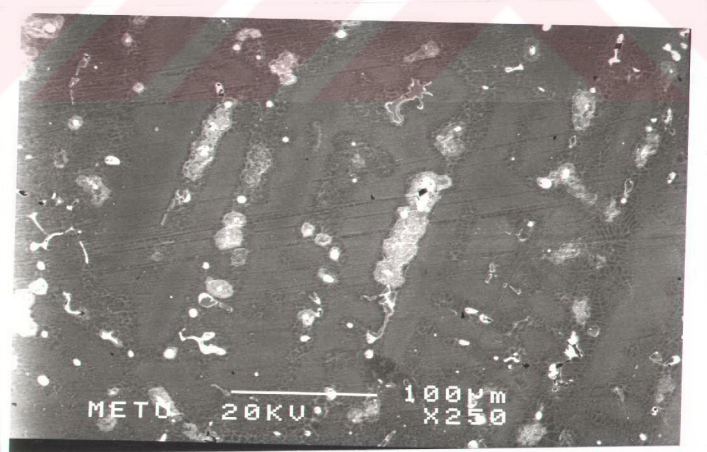
Şekil 9.15. F2 Numunesinin Yorulma Kırık Yüzeyleri SEM Fotoğrafları a) X 450 b) X3000



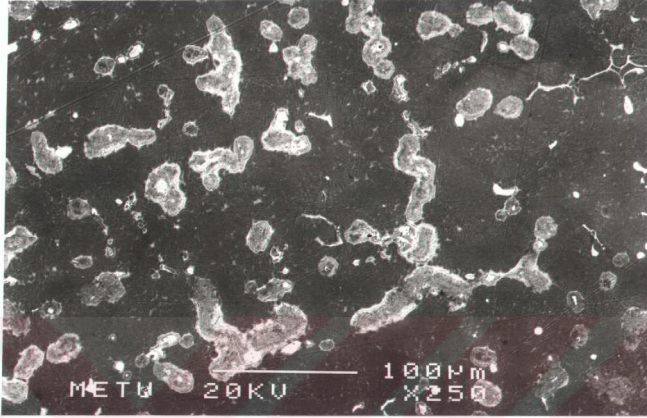
Şekil 9.16 F2 nin Adhesiv Aşınma Sonunda Oluşan Aşınma İzlerinin SEM Fotoğrafi (X 100).

8.3. P İlaveli Numunelerin Mikroyapı (Opt., SEM, EDS, X-RAY) Sonuçları.

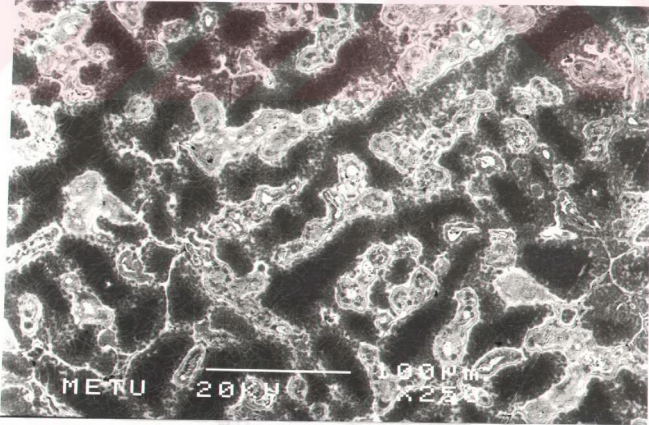
Şekil 9.17 a, b, c ve d, 'de R1, P1, P3 ve P4'ün SEM mikrografları verilmiştir. Aynı şekilden ve daha önceki Fe ilaveli alşımlardan görüleceği gibi numunelerin hepsi de bronzların tipik yapısı olan dendritik mikroyapıgöstermektedir. Bütün numunelerdeki ortak mikroyapıyı temsil eden P4'e ait SEM mikrografı Şekil 9.18'de görülmektedir.



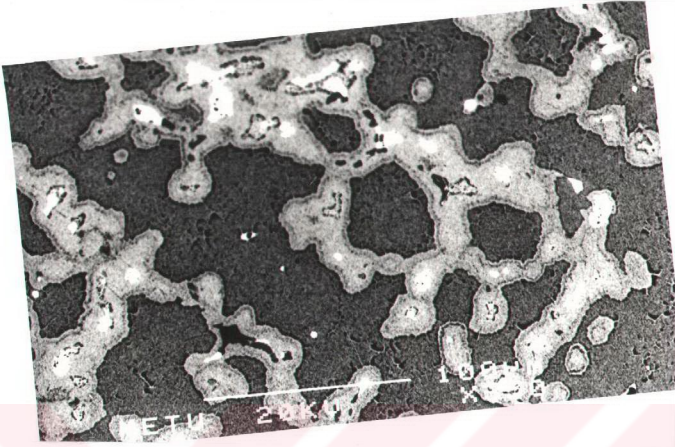
Şekil 9.17. a) R1 Numunesinin SEM Fotoğrafi (X250)



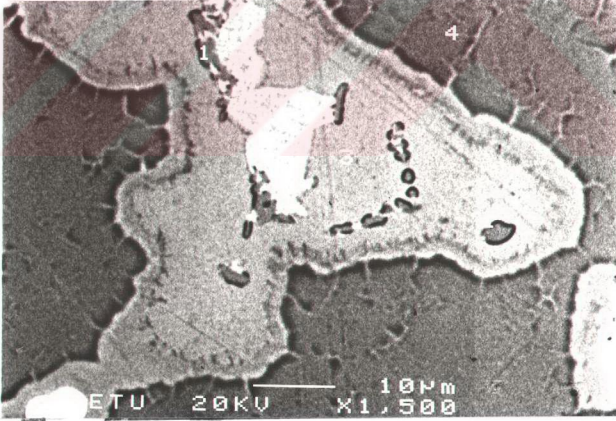
Şekil 9.17 b) P1 Numunesinin SEM Fotoğrafi (X250)



Şekil 9.17 c) P3 Numunesinin SEM Fotoğrafi (X250)



Şekil 9.17 d) P4 Numunesinin SEM Fotoğrafı (X300)

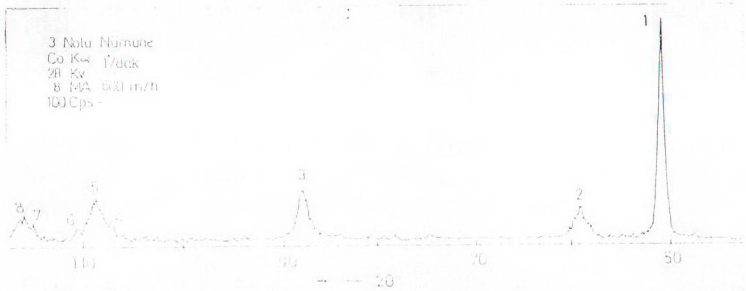


Şekil 9.18. P4 Numunesinin SEM Fotoğrafı (X1500).

Şekil 9.18' deki EDS analizlerine göre, ilk önce dendritik bir mikroyapıya sahip olan KYM yapılı α -Cu (matris) katılmıştır. Matristen alınan EDS analizi % 93,09 at.

Cu; % 3,07 at. Sn; % 2,07 at. Zn; % 1,77 at. S şeklindedir.

İkinci olarak dendrit kolları arasını oluşturan koyu gri renkte görülen interdendritik bölgelerde katılaşma olmuştur. Bu bölgenin EDS analizi % 88,20 at. Cu; % 7,65 at. Sn; % 1,74 at. Zn; % 1,54 at. S; % 0,88 at. P şeklindedir. Ayrıca 3 nolu bölgenin içinde, siyah renkte % 66,07 at. Cu; % 0,66 at. Sn; % 0,67 at. Zn; % 32,61 at. P şeklinde EDS analizi verilen Cu_3P çökeltileri ve bu fazla beraber koyu gri renkli olan ve EDS analizi verilen % 2,33 at. Cu; % 43,27 at. Zn; % 54,23 at. S; % 0,17 at. Sn şeklinde $(\text{Zn,Cu})\text{S}$ bileşiği oluşmuştur. Ancak 3 nolu bölgede tespit edilen P elementi ve Cu_3P bileşiği sadece P1, P2, P3 ve P4'de gözlenmiştir. R1 numunesi yeterli miktarda P içermediğinden bu bileşik gözlenmemiştir. Şekil 9.17 ve 9.18 'de görüldüğü gibi hem matris ve hem de interdendritik bölgelerde globular olarak ayrı bir şekilde Pb çökelmiştir. Matris içinde kalayın % 3,11 at. oranında bulunması, burada ince dağılmış Cu-Sn bileşiklerinin varlığını ima etmektedir. Çünkü Cu-Sn faz diyagramına göre (ASM Handbook Vol.3) katı halde oda sıcaklığında kalayın Cu içerisinde çözünürlüğü çok azdır. Fakat Zn'nin α -Cu içerisindeki çözünürlüğü yüksek olduğundan matris içinde Cu-Zn bileşiği oluşmaz. Matriste çözülmeyen Sn ve Zn dendrit kolları arasına itilmiştir. Bu sebeple 3 nolu bölgede Cu-Zn, Cu-Sn ve Zn-Sn intermetalik bileşikleri oluşmuştur. Bu bölgede de çözülmeyen fazla Sn daha iç bölgelere itilerek bu iç kısımlarda Sn miktarı oldukça yükselmiştir. Bu nedenle en son katılaşan 2 nolu bölgede Cu-Sn intermetalik fazları oluşmuştur. Ayrıca katılaşma esnasında interdendritik bölgede Cu-Sn bileşiklerinin çevresinde $(\text{Zn,Cu})\text{S}$ bileşikleri ve bu bileşiklerin çevresinde de Cu_3P bileşiği oluşmuştur. Şekil 9.19'da P1'in X-Işınları difraktomu ve Tablo 9.4' de bu numune de oluşan ve oluşması muhtemel fazlar görülmektedir.



Şekil 9.19. P1 Numunesinin X-Ray Difraksiyonu

Tablo 9.4 P1 de Oluşan Fazların, Şekil 9.18'deki X-Işını Piklerine Katkıda Bulunan Kristal Düzlemlerinin Miller İndisleri.

Pik No Fazlar	1	2	3	4	5	6	7	8
α -Cu	111	200						
Pb								332
$\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$	411	500, 403	632					661
Cu_6Sn_5	110	200						220
$\text{Cu}_3\text{Sn} (\epsilon)$		330			530			
Cu_5Zn_8	411, 330	422						
ZnSn_2	123	131			052			
PbSnS_2	021	211	310					042
Cu_2S	513	613			848			
CuS							303	
ZnS	2101	111, 300						
Cu_3P			214	413		332		

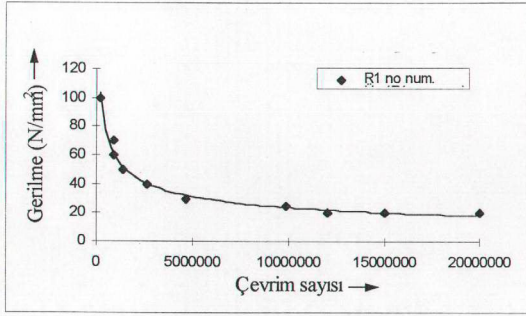
9.4. P ilaveli Numunelerin Mekanik Özellikleri Sonuçları

Numunelerin mekanik özelliklerini içeren değerler Tablo 9.5'de verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü gibi, P bütün numunelerde akma dayanımını ve sertliği önemli ölçüde etkilememiştir. Çekme mukavemeti ve özellikle ağırlık kaybı değerlerinde R1'e göre dikkate değer bir artış gözlenirken, P içeren numunelerin kendi aralarında bu değerleri önemli ölçüde değişmemiştir. Yorulma sınırında ise, P artışına göre kademeli olarak önemli ölçüde bir artış mevcuttur.

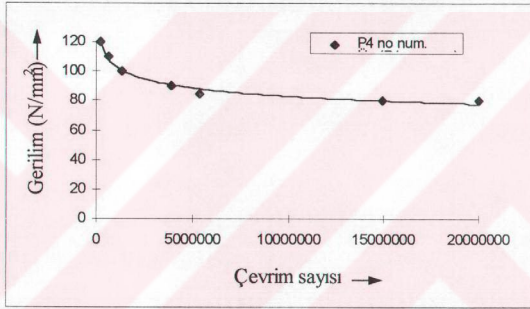
Tablo 9.5 Numunelerin Mekanik Özellikleri.

Numune Adı	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Yüzde uzama	Yorulma dayanımı (N/mm ²)	Sertlik (HV)	Ağırlık Kaybı (mg)
R1	103.8	153	13.5	20	105	5
P1	103.8	181	14.2	45	102	10
P2	103.4	172	10.6	55	105	11.9
P3	105.4	185	12.5	65	110	9.8
P4	105.4	190	11	80	115	11

Bu sonuçlara göre, yorulma sınırı ve çekme dayanımı üzerinde P elementinin olumlu etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 9.20'de yorulma dayanımı eğrileri ve Şekil 9.21'de çekme gerilmelerinin grafikleri görülmektedir.

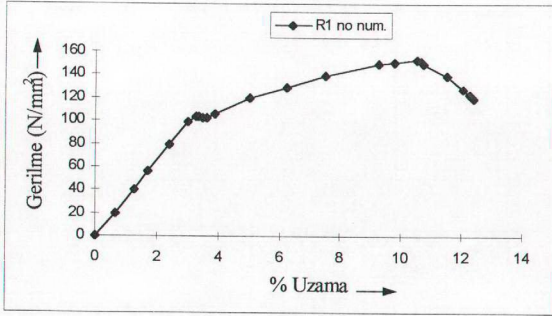


Şekil 9.20. a. R1 Numunesine Ait Gerilim (Rm) - Çevrim Sayısı (N) Diyagramı

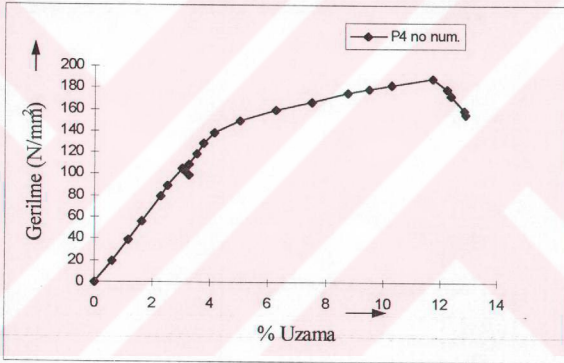


Şekil 9.20. b. P4 Numunesine Ait Gerilim (Rm) - Çevrim Sayısı (N) Diyagramı

Bu olumlu etkiye interdendritik bölgede Cu-Sn ve (Zn,Cu)S fazlarının çevrelerinde çökelen Cu_3P ötektik bileşiği sebep olmaktadır. Şekil 9.19 ve Şekil 9.21 karşılaştırılırsa P elementinin (Zn,Cu)S fazlarının etrafında Cu_3P fazını oluşturarak (Zn,Cu)S fazının büyümesini engellediği ve bunların küçük tanecikler halinde kalarak oluşmasına sebep olduğu anlaşılar. Sert ve kırılgan faz olan (Zn,Cu)S bileşiğinin parçacıklar halinde oluşması çekme ve yorulma dayanımlarını etkileyeceği anlamına gelir. Şekil 9.22'de verilen P4 nolu numunenin yorulma kırık yüzeyi SEM mikroskopundan anlaşılacağı gibi matris ile interdendritik bölge farklı kırılma davranışı sergilemektedir. Yorumla izlerinin görüldüğü bu bölge dendrit kollarıdır.



Şekil 9. 21. a. R1 Numunesine Ait Gerilme (Rm) - % Uzama (A₅) Eğrisi

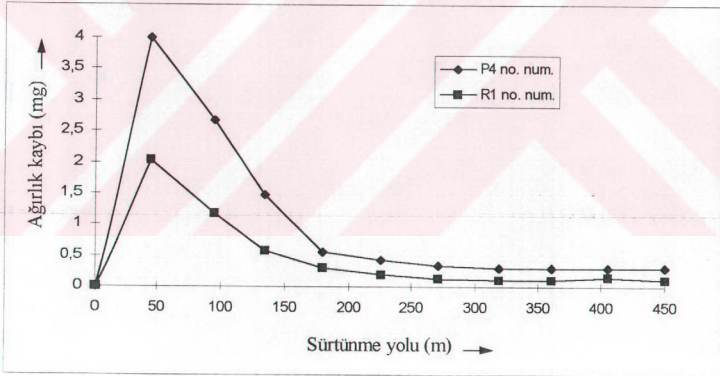


Şekil 9. 21. b. P4 Numunesine Ait Gerilim (Rm) - % Uzama (A₅) Eğrisi.

R1 ile diğer fosforlu numuneler arasındaki ağırlık kaybı farklılığı aşınmanın başlangıcında yüzeyden kopan sert parçacıkların (Cu_3P gibi) üçüncü cisim olarak abrasiv aşınmayı meydana getirmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 9.23' de verilen R1 ve P4' ün ağırlık kaybı eğrilerinden görüleceği gibi, sürtünmenin ileri safhasında (kararlı sürtünme durumunda) numunelerin ağırlık kayıplarında önemli bir fark ortaya çıkmamaktadır.



Şekil 9.22. P4 Numunesinin Yorulma Kırık Yüzeyinin SEM Fotoğrafı (X 2200).

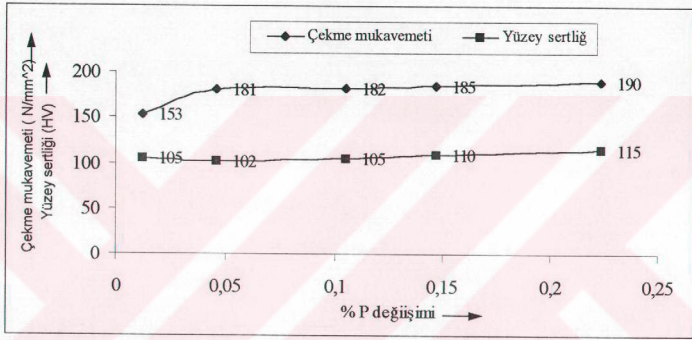


Şekil 9.23. R1 ve P4 Numunelerinin Aşınma Grafikleri.

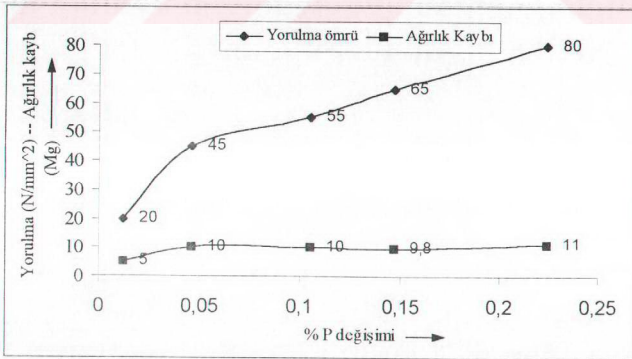
Buradan anlaşılacağı gibi her ne kadar fosforlu numunelerin toplam ağırlık kayıpları, P ihtiva etmeyen R1 numunesinin ağırlık kaybına göre yüksek görünüyorsa da, kararlı sürtünme durumunda bütün numunelerin ağırlık kayıplarının birbirlerine yakın olacağı söylenebilir.

Şekil 9.24' de sertlik-çekme mukavemeti ilişkilerinden görüleceği gibi P oranına bağlı olarak deney numunelerinin çekme mukavemeti ve yüzey sertliği belli bir oranda artmaktadır.

Aynı şekilde Şekil 9.25' e baktığımızda bu paralellikteki artışı ağırlık kaybı-yorulma ilişkisindeki yorulma eğrisinde görmekteyiz. Ancak ağırlık kaybı artışı P oranına bağlı olarak kararlı sürtünme durumunda olduğu gibi (Şekil 9.19) burada da çok az bir miktar artmaktadır. Bu da P oranının başlangıçta önemli bir artışa sebep olduğunu, ancak kararlı sürtünme durumunda ağırlık kaybını fazlaca etkilemediğini göstermektedir.



Şekil 9.24. % P Oranına Bağlı Olarak Numunelerin Çekme Dayanımı - Yüzey Sertliği İlişkileri.

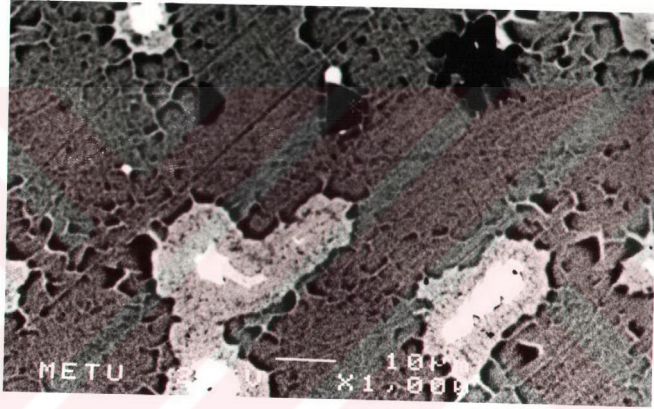


Şekil 9.25 % P Oranına Bağlı Olarak R1 ve P4' ün Ağırlık Kaybı - Yorulma Ömrü İlişkileri.

9.5.Mn İlaveli Numunelerin Mikroyapı (Opt.,SEM, EDS, X-Ray) Sonuçları

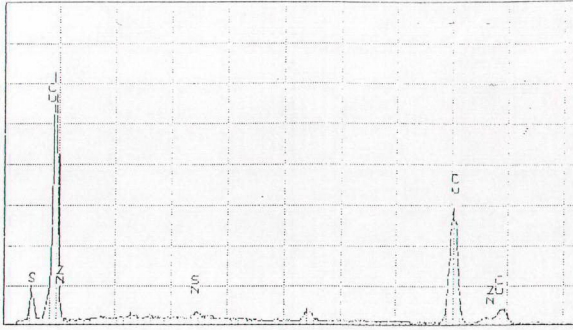
Önceki bölümlerde Fe ve P içeren alaşımların ve R1'in mikroyapıları incelenmişti. Bu alaşımların hepsi dendritik bir mikroyapıya sahip olup, ana matrisleri KYM yapılı α -Cu dur. M numunesinin SEM mikrografi Şekil 9.26' da görülmektedir.

Bu numune de bahsedildiği üzere, tüm alaşımlar gibi dendritik bir mikroyapıya sahiptir. Numunenin EDS analizlerinden görüldüğü gibi matris Zn ve Sn içeren (Şekil 9.27) α -Cu dur. İlk olarak matris ve daha sonra Şekil 9.28. EDS analizlerinden görüldüğü gibi

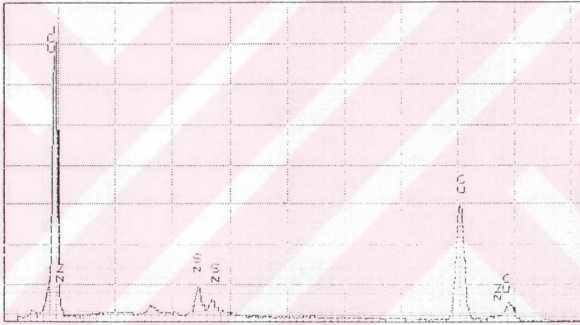


Şekil 9.26. M numunesine Ait SEM fotoğrafı (X1000).

matrise nazaran daha fazla Sn ve daha az Zn ihtiva eden interdendritik gri bölge katılaşmıştır. Üçüncü olarak genellikle interdendritik bölgenin iç kesimlerinde oluşan ve önceki fazlara göre en çok Sn ihtiva eden Şekil 9.29' daki EDS analizlerinden görüldüğü gibi Cu-Sn intermetalik bileşikler katılaşma göstermiştir.



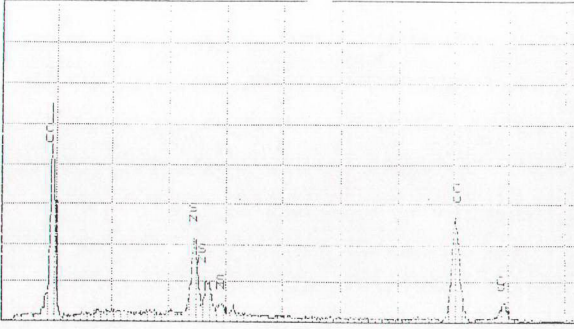
Şekil 9.27. Mn İçerikli Numuneye Ait Matrisin Kimyasal Kompozisyonunun EDS Analizi. (M)



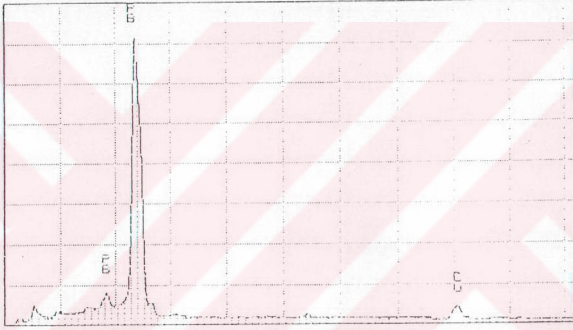
Şekil 8.28. Şekil 9. 26' de 3 Nolu (Gri) Bölgenin Kimyasal Kompozisyonunun EDS Analizi

Diğer demirli ve fosforlu numunelerde bulunan ortak özelliği de sergileyen, Şekil 9.30' da görüldüğü gibi matris içerisinde Pb fazı oluşmuştur. Ayrıca EDS analizlerinden görülebilen Şekil 9.31'de olduğu gibi matris içinde MnS fazı da oluşmuştur.

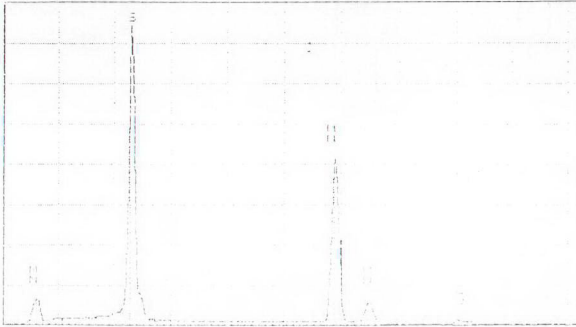
Metalografik olarak R1 ve M numuneleri arasındaki dikkate değer en önemli fark, Mn elementinin R1'de oluşan (Zn,Cu)S fazlarının oluşmasını engellemesidir. Şekil 9.32 ve Şekil 9.33' de verilen SEM mikrografı ve EDS analizlerinden görülen Mn, bu numunede kendisi sülfür meydana getirerek, Şekil 9.26' daki ve Şekil 9.31' de alınan EDS analizi piklerinin verdiği gibi, MnS fazını oluşturmaktadır.



Şekil 9.29. Şekil 9.26' de 2 Nolu Bölgenin Kimyasal Kompozisyonunun EDS Analizi.

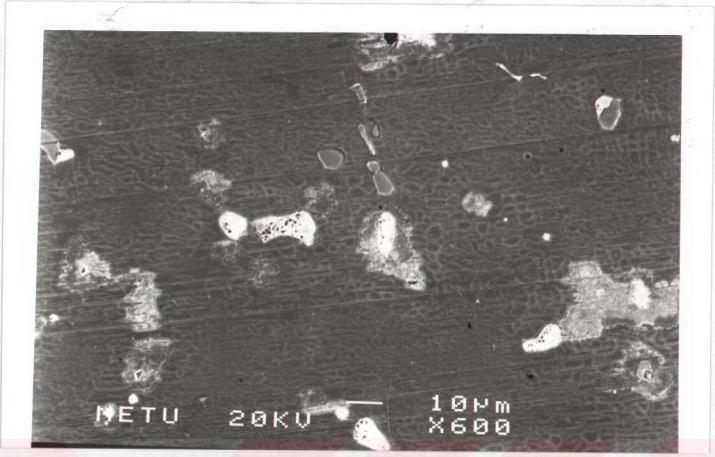


Şekil 9.30. Şekil 9.26' de Beyaz Fazın (Pb) EDS Analizi (Matris İçinde)

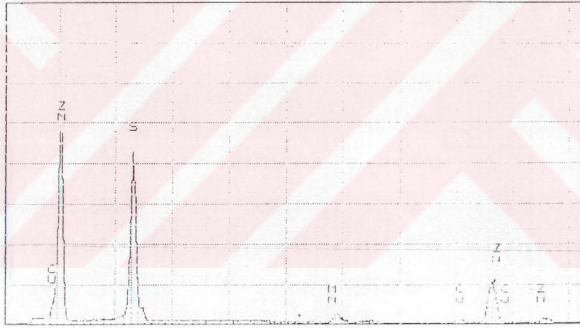


Şekil 9.31. Şekil 9.26' de Gri Fazın (MnS) EDS Analizi





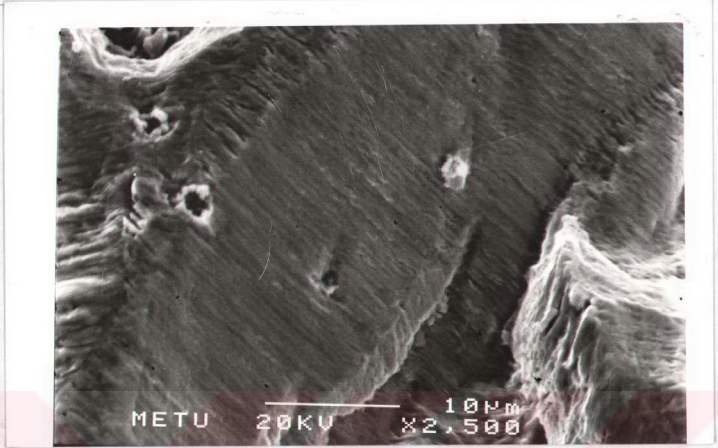
Şekil 9.32. R1 Numunesine Ait SEM fotoğrafı (X 600).



Şekil 9.33. Şekil 9.32'deki R1 numunesine ait (Zn, Cu)S fazının EDS analizi.

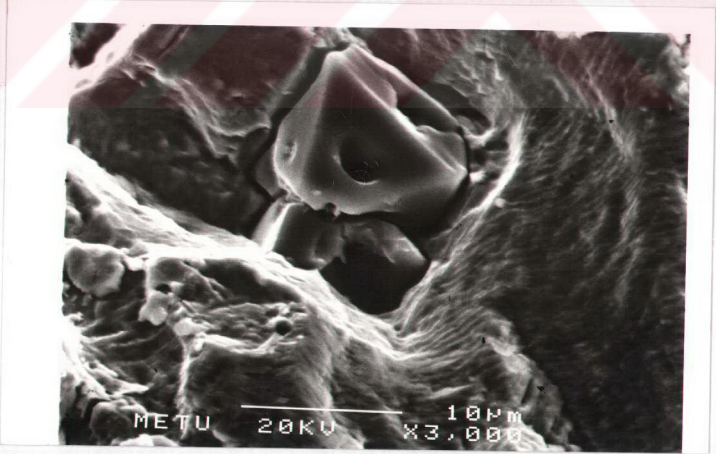
9.6. Mn İtaveli Numunelerin Mekanik Özellikleri Sonuçları

Mekanik deneylerin sonuçları Tablo 9.5' de verilmiştir. Bu Tabloya göre Mn elementi, yorulma dayanımını oldukça artırmıştır. Bununla beraber çekme dayanımı da artmıştır. Ayrıca ağırlık kaybı dışında, diğer mekanik özellikleri, kayda değer bir şekilde etkilememiştir. Manganın özellikle yorulma sınırını büyük oranda artırmasının nedeni, Mn' nin MnS oluşturarak (Zn,Cu)S bileşiklerinin oluşmasını engellemesidir.



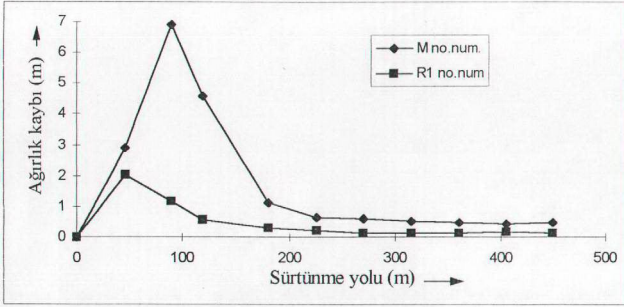
Şekil 9.34. a) M2' ye Ait Yorulma Kırık Yüzeyinin SEM Fotoğrafi (X 2500).

(Zn,Cu)S bileşikleri, MnS 'den daha gevrek ve kırılgandır. M numunesinin matriste ve MnS çevresinde oluşan, yorulma kırılması çizgileri Şekil 9.35' de görülmektedir.



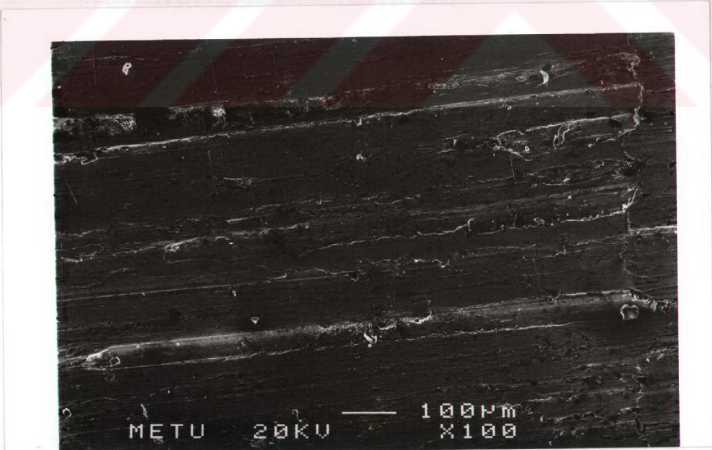
Şekil 9.35. b) M2' ye Ait Yorulma Kırık Yüzeyinin SEM Fotoğrafi (3000X).

Mn, bu numunede ağırlık kaybını önemli ölçüde artırmıştır. R1 ve M numunelerinin ağırlık kayıpları Şekil 9.36'da görülmektedir.

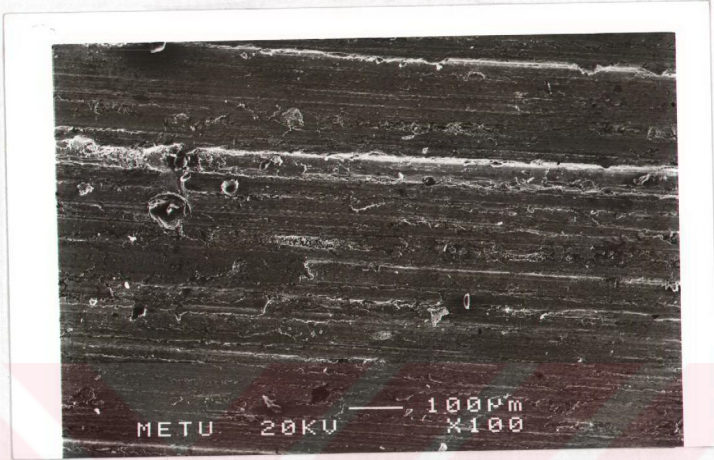


Şekil 9.36. R1 ve M Numunelerinin Aşınma Grafikleri

Grafiklere göre, M numunesi özellikle sürtünmenin başlangıcında, R1'den fazla ağırlık kaybına uğramaktadır. Çünkü yüzeyden kopan parçacıkların içinde sert ve dayanıklı MnS' çökeltileri bulunmaktadır. Bu çökeltilerden meydana gelen sert parçacıklar, abrasiv aşındırıcı gibi, sürtünmenin başlangıcında ağırlık kaybını artırmaktadır. Şekil 9.37' de görülen, R1 ve M numunelerinin aşınma yüzeyleri SEM fotoğrafları bu durumu açıkça göstermektedir. M'nin aşınma izleri R1'e göre daha dar ve daha derindir.



Şekil 9.37 a) R1 Numunesinin Aşınma Yüzeyine Ait SEM Fotoğrafı.



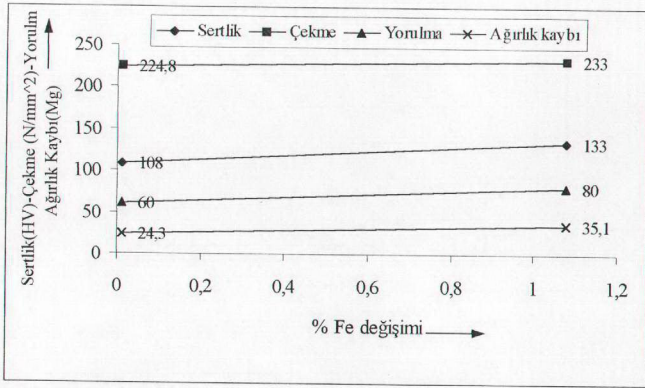
Şekil 9.37 b) M Numunesinin Aşınma Yüzeyine Ait SEM Fotoğrafi

8.7. P ve Fe İçerikli Numunelerin Mekanik İlişkileri Sonuçları

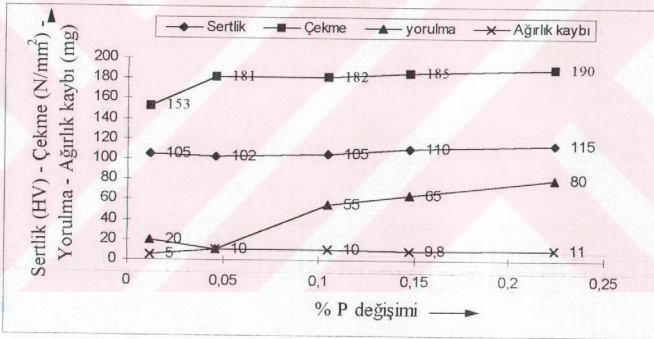
Buraya kadar özel alaşımlandırılan az katkılı kalay bronzuna; ilave elementlerin (P, Fe, Mn)'nin bu alaşımların mekanik özelliklerinden; çekme mukavemeti, yüzey sertliği, yorulma ömrü, ve ağırlık kaybı değerlerini, herbir alaşımda birbirlerinden farklı olarak nasıl değiştirip artırdığı açıklandı. Burada P oranının artışına göre fosforlu numuneler ile demir içerikli numunelerin çekme dayanımı - yüzey sertlikleri ilişkileri karşılaştırdığında, Fe ve P oranının arttıkça yüzey sertliklerinin ve çekme dayanımlarının arttığı görülmektedir.

Fe içerikli numunelerin hem yüzey sertliklerinin hem de çekme dayanımlarının P içeren numunelerden oldukça yüksek olduğu net olarak belirlenmiştir.

Bu da fosforun bu alaşımlarda oluşturduğu özellikle (Cu,Fe)₃P gibi intermetalik bileşiklerin, demirin meydana getirdiği intermetalikler kadar sert olmadığını, aynı zamanda demirli numunelerin matrislerinde demirin varlığının; numunelerin mikroyapısını, çekme dayanımı ve yüzey sertliğini yükseltecek şekilde etkilediği görülmektedir (Şekil 9.38 ve 9.39).



Şekil 9.38. % Fe Değişimine Bağlı Sertlik - Çekme Dayanımı; Yorulma-Ağırlık Kaybı İlişkileri.



Şekil 9.39. % P Değişimine Bağlı Sertlik - Çekme Dayanımı; Yorulma - Ağırlık Kaybı İlişkileri.

9.8. P ve Fe İlaveli Numunelerin Yorulma Dayanımı -Ağırlık Kaybı İlişkileri

P ve Fe içeren numunelerin, aşınma direnci-yorulma ömrü ilişkilerine bakıldığında, Şekil 9.38 ve 9.39, artan P ve Fe içeriklerinin; her iki alaşım türünde de, yorulma dayanımlarını yükselttiği net olarak görülmektedir. Eğer P oranı ile Fe oranı göz önüne alınırsa, % 0,224 P içeren numunenin, bunun dört katı durumdaki % 1,080 Fe içeren numuneye göre, neredeyse yorulma dayanımı bakımından denk gelebileceğidir. Bu ise;

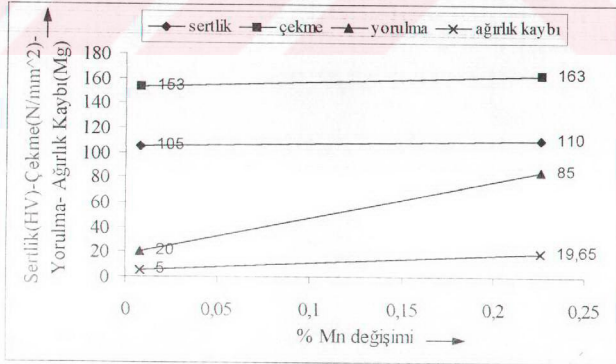
böyle bir alışımda P oranının % 0,5'e çıkartılması halinde, yorulma dayanımı bakımından fosforun, demire nazaran daha iyi sonuç vereceği kanaatini uyandırmaktadır.

Ağırlık kaybı değerlerine göre karşılaştırma yapıldığında; fosforlu numunelerin ağırlık kayıplarının, Fe içeren numunelerden daha az olduğu belirlenmiştir. Böylece P içeren numunelerin, aşınma dayanımlarının, Fe içerikli numunelere göre daha iyi olduğu anlamı ortaya çıkmaktadır.

Bu da; demirli alaşımların aşınması esnasında, kopan parçacıkların, kurşun sıvanmasından daha çabuk soyutlandıkları ve abrasiv gibi davrandıkları anlamına geldiği; buna karşın, örneğin (Cu_3P) gibi fosforlu intermetaliklerin ayrılan partiküllerinin, kurşun sıvanmasının içinde kaldığı ve demirli bileşikler kadar hızlı ayrılıp, abrasiv davranışı sergileyen türden bir görevi üstlenemediği şeklinde açıklanabilir.

9.9. P ve Mn İçerikli Numunelerin Mekanik İlişkileri Sonuçları

Mn ve P' nin artışına rağmen, yüzey sertliğinde çok fazla bir artış görülmemektedir. Ayrıca sonuçlar arasında önemli bir fark da yoktur. Fakat çekme dayanımı değerlerinde, her ikisinde de artan Mn ve P oranlarıyla beraber, çekme dayanımlarının arttığı belirlenmiştir (Şekil 9.39 ve 9.40).



Şekil 9.40 % Mn Değişimine Bağlı Sertlik-Çekme Dayanımı; Yorulma-Ağırlık Kaybı İlişkileri

Ancak fosforlu numunelerin çekme dayanımlarının yüksek olması, birbirlerinden farklı oluşan fosforlu numunelerde, örneğin Cu_3P ve manganlı numunelerde, MnS vb. fazların çekme dayanımlarını farklı etkilemelerinden kaynaklanmaktadır. Bu da Mn'lı bileşiklerin fosforlu bileşiklere nazaran daha sert olması ve manganlı bileşiklerin matris içinde bulunmasından dolayı matriste daha hızlı plastik deformasyona uğraması nedeniyle çekme mukavemetini, fosforlu alaşımlara nazaran olumsuz etkilediği anlamına gelir.

9.10 P ve Mn İçerikli Numunelerin Yorulma- Ağırlık Kaybı İlişkileri Sonuçları

Yorulma ömrü ağırlık kaybı ilişkileri değerlendirildiğinde, yorulma dayanımlarının her iki numunede pek farklı olduğu söylenemez. Manganlı numunenin az bir Mn oranı farkı ile hem yorulma ömrü, hem de ağırlık kaybı ani bir yükselme göstererek arttığı da gözden kaçmamaktadır (Şekil.9.39 ve 9.40). Fakat P içerikli numunelerin yorulma ömürleri fosforun artış oranlarına göre manganlı numuneye benzer bir şekilde yükselirken, ağırlık kayıplarında dikkate değer bir artış olmamaktadır. Artışın olmaması P içeren az katkılı kalay bronzunun, Mn içeren kalay bronzuna göre, yorulma dayanımı bakımından ve ağırlık kaybından hareketle, aşınma direncinin daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya çıkarmaktadır.

Az katkılı kalay bronzlarında P elementi, gevrek ve kırılğan olan, bu özelliğinden dolayı istenmeyen (Zn,Cu)S fazlarının etrafını sınırlayarak bu fazların büyümesini engellemektedir.

Gevrek ve kırılğan fazların, örneğin (Zn,Cu)S fazlarının çevrelerine fosforun çökelerek, onları sınırlamasından ve büyümelerini engellemesinden dolayı fosforlu bronzların dayanımı artmaktadır. Az katkılı kalay bronzunda P elementi, P oranının artışına bağlı olarak, kademeli bir şekilde yorulma direncini yükseltmektedir.

Bundan başka P elementi çekme dayanımını da artırarak, Mn içerikli numuneden daha yüksek bir çekme mukavemeti sağlamıştır. Bu numunelerde P elementi, yüzey sertliğini Mn içerikli numuneye göre önemsenmeyecek kadar az da olsa bir miktar artırmıştır. Ancak Fe içerikli alaşımlarla karşılaştırıldığında yüzey sertliğinin düştüğü belirlenmiştir. Fakat düşük katkılı kalay bronzunda orantılı olarak artırılan P, bu numunelerde kendi aralarında değerlendirildiğinde, yüzey sertliğini kademeli olarak artırmıştır. Ayrıca bu alaşımlarda P elementi, sürtünme yolunun başlangıç safhasında bir miktar ağırlık kaybının artmasına sebep olarak, aşınma direncini az oranda düşürmüştür.

Şekil 9.37, 9.38 ve 9.39' da görüldüğü gibi P elementinin; Mn ve Fe ihtiva eden numunelerin ağırlık kayıpları ve yorulma sınırları irdelendiğinde, yorulma sınırını yükseltmesinin yanısıra, aşınma direncini çok da olumsuz etkilemediği, zaten kararlı sürtünmeye geçtikten sonra, aşınma dayanımında pek o kadar olumsuz etkisinin olmadığı görülmüştür.

Çekme mukavemeti, sertlik ve yorulma dayanımının kolektif bir şekilde talep edildiği makina elemanlarının yapımında birinci derecede Fe içerikli az katkılı kalay bronzlarının tercih edilebileceği söylenebilir.

Çok titreşimli ve döner eğmeli yüklere maruz kalan, yalnız yorulma ömrünün çok istendiği durumlarda, makina elemanlarının ve özellikle döner kaymalı yatakların yapımında, Mn içerikli az katkılı kalay bronzlarının kullanılması önerilebilir.

Bu az katkılı kalay bronzuna ucuzluğundan ve dayanımı artırmasından dolayı Zn elementinin takriben % 5 den % 6' ya kadar ilave edilmesi halinde; oluşacak (Zn,Cu)S fazlarının etkinliğinin giderilmesi ve yorulma dayanımının da iyi olması istendiğinde; alaşıma % 0,25 den % 0,5'e kadar Mn'ın ilave edilmesi önerilebilir.

Ayrıca yorulma dayanımı ile birlikte, yüzey sertliği ve çekme mukavemetinin de istendiği hallerde; alaşıma % 0,5' den % 1,5' e kadar Fe ilave edilmesinin iyi sonuç vereceği ifade edilebilir.

Yine aynı durumda yorulma dayanımı, yüzey sertliği, çekme mukavemeti, optimum bir aşınma dayanımı ve (Zn,Cu)S fazlarının etkinliğinin giderilmesi talep edildiği durumlarda; alaşıma % 0,25' den % 0,50' ye kadar P elementinin ilave edilmesinin yararlı olacağı söylenebilir.

Bununla birlikte % 0,25' den % 0,50'ye kadar P elementi ile % 0,5' den % 2' ye kadar Nb katkılarının mukavemet, tokluk ve aşınma özelliklerine etkileri araştırmaya değer görülmektedir.

Kayan sistemlerin dışından gelen aşındırıcı (abrasif) parçacıkların yanı sıra, kayma sırasında meydana gelen aşınma parçacıklarının zarar verme olasılığı da dikkate alınmalıdır. Bu partikülleri yok edebilmek önemlidir. Bunların en yumuşağı, yaklaşık olarak içinden çıktıkları kayan yüzeyin sertliğine eşit olur. Bu itibarla yumuşak malzemenin, sert malzemenin sahip olduğu sertliğin üçte birinden az sertlikte olacak şekilde seçilmesi gerektiği de vurgulanmalıdır.

Zn ve Pb içeren az katkılı kalay bronzunun iyileşen aşınma davranışının, esas itibarı ile alaşımın mikroyapısal özelliklerinden kaynaklandığı söylenebilir. Bu nedenle alaşımlarda sünek halde bulunan α ve η fazları dikkate alınmalıdır.

Çünkü hegzagonal kristal yapıya sahip olan η , yüklenmeye karşı dayanıklı bir faz şeklinde davranmaya yardımcı olarak, kayma sırasında sıvanma yoluyla katı yağlayıcı rolünü gerçekleştirebilir. Bu nedenle aşırı kayma zorlanmalarına maruz kalan durumlarda bu alaşımların kullanılması önerilebilir.

Hem çekme gerilmesine maruz kalan, hem yüzey sertliğinin ve aşınma direncinin iyi olması istenen ve hem de yorulma dayanımının arzulandığı, sonuçta; mekanik ve tribolojik özelliklerin önemli olduğu, çok yönlü talepler karşısında, gerek makina elemanlarının ve gerekse döner kaymalı yatakların yapımında, yukarıda önerilen P oranı katkısı ile beraber, az oranda Pb ve Zn içeren, düşük alaşımlı kalay bronzlarının tercih edilebileceği ortaya çıkmaktadır.

11. KAYNAKLAR

- AKSOY, M., KARAMIŞ, M. B., EVİN, E., (1996). An Evaluation of the Wear Behaviour of A Dual - Phase Low Carbon Steel. **Wear**.193, 248 -252.
- ALAM, S., MARSHALL, R. I., (1992). The Testing Performance of Various Bronze Bushes. Printed in the UK. **J. Phys. D: Appl. Phys.** 25, 1340 -1344
- ANON., (1987). **Wear - Resistant Materials**. O - 87170 - 239 - 8.
- ARSLAN,F., CİNBAET, S., DÖNMEZ, A. G., (1996). Gözenekli Bronz Yatak İmalinde Üretim Parametrelerinin Yatak Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi. **I. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı**. 16-17 Eylül. G. Ü. ankara, Bildiri Kitabı 429 - 440.
- ARCHARD, J. F., (1959), The temperature of rubbing surfaces. **Wear** 25. 438- 455.
- ARNELL, R. D.,HEROD, A. P., TER, D. G., (1975), The effect of Combined Stresses on the transition from mild to severe wear. **Wear** 31 s. 237-242.
- AUSTEN , I . M . ,MCINTYRE , P . , (1979). Corrosion Fatigue of High Strength Steel in Low - pressure Hydrogen Gas , **Metal Science** 13 , s . 420 ,
- BAİLEY , Y. A., SKORSKI, M. E., (1969), The effect of Composition and ordering on adhesion in Some binary Solid Solition alloy systems. **Wear** 14 s. 181-192.
- BARGEL, H. J., SCHULZE, G., (1980). **Werkstoffkunde**. 2. Auflage, VDI - Verlag GmbH, Düsseldorf, 113 - 118.
- BARMAS, V. Yu., (1987). Low- Cycle of Zirconium Bronze at High Temperatures. **Plenum Publishing Corporation**. v.53, n. 2, pp. 75 - 77.

- BERAHA, E., (1977). **Color Metallography**. A bell and Howell Company. American Society for Metals. Metals Park Ohio, U. S. A.
- BÖGEL, A., FEIND, J., (1991). Gleitlager für Extreme Belastungskollektive aus einer Nickel - Zinn - Bronze. **Metallwissenschaft und Technik**. Heft 11. 1134 - 1135.
- BÖHM, H., (1968). **Einführung in die Metallkunde**. Hochschul Taschenbücher B.I. 196 / 196 a. Mannheim / Zürich 139 - 146.
- BROOKS, C. R., (1990). **Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys**. American Society for Metals. Metals Park, Ohio 44073.
- BUCKLEY, D. H., (1968), Adhesion, Reibung und Verschleiss von Kobalt und Kobaltlegierungen. **Kobalt**. 38 s. 17-24.
- BUCKLEY, D. H., (1968), Adhesion, Reibung und Verschleiss von Kobalt und Kobaltlegierungen. **Wear**. 94, 20 - 38.
- BURWELL, J. T., STRANGE, C. D., (1952), **On the Empirical Law of Adhesive Wear**. J. Appl. Phys. 23 s. 18-28.
- COOKE, P. J., BEEVERS, C., (1973). The Effect of Load Ratio on the Threshold Stresses for Fatigue Crack Growth in medium Carbon Steels , **Eng . Fact . Mech .** 5 , s . 1061 ,
- CZICHOS, H., (1972). **The Mechanism of the Metallic Adhesion Bond**. J. Phys-D: Appl. Phys. 5 s. 1890-1897.

DIN 50320., (1938). Verschleiss System Analyse von Verschleissvorgangen Gliederung des Verschleissgebietes, Materialprüfnormen für Metallische Werkstoffe, 2. **DIN Taschenbuch**. Beuth Verlag GmbH, 38 - 51, Berlin.

DOMKE, W., (1987). **Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung**. Verlag W. Girardet. Essen, Germany. 224 -228; 332 -341.

EBERHARD, R., SCHLICHT, H., (1975) **Werkstoff-anstrengung bei Walzbeanspruchung**. Harterei-Tech. Mitt. 30 s. 338-345.

EISENKOLB, F., (1966) **Einführung in die Werkstoffkunde Band IV, Nicht Eisen Metallen**. VEB Verlag Technik Berlin 150 - 158.

GANE, N., PFAELZER, P. F., TABOR, D., (1974), **Adhesion Between Clear**. Surfaces at Light Loads. Proc. Roy. Soc., London, a 340 s. 495-517.

GERVAIS, E., (1987). **ZA Alloys a Challenge to the Metals Industry**, CIM Bulletin, s. 67 -72.

GNANARAJ, S. D., RAMAN, R., (1992) Experimental Studies on Wear in Oil - Impregnated Sintered Bearings. **Elsevier. Wear**, 155. 73 - 81.

HABIG, K. H., CHATERJEE-FISCHER, R., HOFFMAN, F., (1978), Adhesiver, abrasiver und tribochemischer Verschleiss von Oberflächen schichten, die durch Eindiffusion von Bor, Vanadin oder Stickstoff in Stahl gebildet werden. **Harterei - Techn. Mitt.** 33 s. 28 -35.

KAESCHE, H., Die Korrosion der Metalle, **Springer - Verlag**, Berlin, Heidelberg. 1979.

- KRAGELSKI, İ. V., (1960). Contact Area of Rough Surfaces. **Wear**. 3, 170 - 187.
- KRAGELSKI, İ. V., (1965). Friction and Wear, Butterworth, London, pp. 126 - 131.
- KRINITSINA, T. P., POPOVA, N., (1991). Natural and Artificial Ageing of Bronzes Used as the Matrix in Nb₃Sn Based Composites. **Phys. Met. Metall.** V.72, n. 5, pp. 82 -89.
- KRİST, T., (1976). **Werkstoffe, Werkstoffprüfung Technik** - Taballu - Verlag Darmstadt 47 - 61.
- KURT, A., TÜRKER, M., SARITAŞ, S., (1996). Toz Metalurjisi Metodu ile Üretilmiş Bakır Yatakların Aşınma Özellikleri **1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı Gazi Üniversitesi, Ankara** 419 - 428.
- KUZUCU, V., AKSOY, M., KORKUT, M. H., YILDIRIM, M. M., (1997). The Effect of Niobium on the Mikrostruktüre of ferritic Stainless Steel. **Materials Science and Engineering A** 230 75 - 80.
- KORKUT, M. H., (1997). Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapısı ve Aşınması Üzerine Karbür Yapıcı Elementlerin Etkilerinin Araştırılması. **Doktora Tezi. Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı.** Elazığ. s 48 - 65
- MITTMANN, H. U., CZICHOS, H., (1975), Reibungsmessungen und Oberflächen untersucungen an Kunststoff - Metall - Gleitpaarungen - **Material - Prüfung** 17 s. 28 -35.
- MOORE, M. A., (1983). The Effect of Particle Shape on Abrasive Wear. **Wear of Metarials**. 11, 1 - 17.

- MOORE, M. A., (1974). **A Review of Two - Body Abrasive Wear**. *Wear*. 27, 1 -7.
- NIEMANN, G., (1943), Walzenfestigkeit und Grübchenbildung von Zahnrad- und Walzlagerstoffen **VDI - Z**. 85 s. 428 - 435.
- PARKINS, R. N. , Some Electrochemical Aspect of the Mechanism of Corrosion Fatigue , **Metal Science** 13 , s . 381 , 1979.
- PRASAD,B. K., PATWARDHAN, A. K., YEGNESWARAN, A. H., (1996). Dry Sliding Charecteristic of Some Zinc - Aluminium Alloys: A Comparative Study with a Conventional Bearing Bronze at a Slow Speed. **Wear**. 142 -151.
- PUCKERT, F., (1987). Niedriglegierte Kupferwerkstoffe für Steckverbinder und Halbleitertrager. **Metallwissenschaft und Technik**. Heft 11. 1116 - 1119.
- OCHIAI, S., OSAMURA, K., (1988). Influence of Loading - Unloading Treatment at Room Temperature on Critical Current of Bronze - Processed Nb3Sn Superconducting Composites. **Acta Metall**. v. 36, n. 6, pp. 1607 - 1616
- OĞUZ, B., (1990). **Demirdışı Metaller Kaynağı**. Oerlikon Yayını. I. Baskı İstanbul.
- OĞUZ, B., (1993). **Aşınma Sorunları ve Dolgu Kaynakları**. Oerlikon Yayını. I. Baskı İstanbul.
- RAHMEL, A. , SCHWENK, W. , Korrosion und Korrosionsschutz von Staehlen , **Verlag Chemie**, Weinheim , New York , 1977 .
- RYBAKOVA, L. M., TOLOKONIKOV, V. I., (1989). **Metall Science and Heat Treatment** v. 31, n.6 p 376 - 380.
- RIEGER, H., (1977), Kavitation und Tropfenschlag Karlsruhe: **Werkstofftechnische Verlagsgesellschaft m. b. H.**

SHAPOXALOV, I. M., KARPIN, V. P., NECHAEV, E. A., (1991). Proportion of
Metalls V 27 n 12. 240 - 242.

SHARPE, N., (1989). Tin Bronze Powders for Filters. **The Internationall Journal of
Powder Metllurgy**. V.25, n. 1, pp. 47 - 49.

SCIENCE, W. L., (1978). Effect of Structure on Wear Resistance of Co - Fe and Ni-
Base Alloys. **Trans ASME Ser. F** 100 s. 428 - 435.

SCHUMANN, H., (1964). Metallographie, **VEB Deutscher Verlag für
Grundstoffindustrie**, Leipzig ; 519 -532.

STAND, A., (1986). Coating Applied by Thermal Spraying and Their Wearing
Behaviour. **Schweissen und Schneiden**. 38. 4. E 52 - E 54.

TABOR, D., (1981). Friction - The Present Status of our Understanding. **J. Lubr.
Technol.**, 9. 403 - 407

TANDON, K. N., TIAN, R. Z., (1993). Effect of Sb on the Wear Behaviour of a Cu -
Pb Alloy. **Metallurgica et Materialia**. V. 29, pp. 857 - 861.

TEKİN, E., (1984). "Demirdışı Metaller ve Alaşımlarının Uygulamalı Optik
Metalografisi" II. Baskı. Ankara.

TOMKINS, B. , Role of Mechanics in Corrosion Fatigue , **Metal Science** 13 , s.387 ,
1979 .

UETZ, H., FÖHL, J. (1978). Wear as an Energy Transformation Process. **Wear** s. 495.
253 - 26

UETZ, H., SOMMER, K., (1979). Verschleissverhalten Kaltverfestigter Oberflächen.
VDI - Berichte Nr. 333 s. 145 - 157.

VAROL, R., SARITAŞ, S., (1996). Bilyalı Dövme İşleminin Demir Esaslı T / M Parçaların Yorulma Özellikleri Üzerine Etkisinin Araştırılması. **I. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı** . G. Ü, Ankara

YAMAMATO, K., SAKAL, K., SAKAMOTO, M., (1994). **Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy** V. 41 n 3 P. 335 - 339.

YILDIRIM, M. M., NURSOY, M. (1994). “Çinko Alüminyum Esaslı Yatak Malzemelerinin Yorulma Davranışları”, F.Ü. Fen ve Müh. Bilimleri Dergisi, 6 (1), 181 -193.

YILDIRIM, M. M., (1987). **Malzeme Bilgisi**. Cilt II ve III F. Ü. Müh. Fak. Basımevi. Elazığ 39 -51.

WASSERMANN, G., (1965). **Praktikum der Metalle und Werkstoffprüfung**, Springer Verlag, Berlin / Heidelberg / New York 232 - 237.

WEI , R . P . , Correlation Between Sustained-Load and Fatigue Crack Growth in High-Strength Steels , **Materials Research and Standards** , 9, s . 25 , 1969 .

WENSCHOT, P., (1997). A New Nickel - Aluminum Bronze Alloy with Low Magnetic Permeability. **Metallurgical and Materials Transactions a**. V 28 a, pp 689 - 697.

ZHARIN, A. L., SHIPITSA, N: A., FISHBEJIN, E. I., (1993). On Fatigue Processes in Sliding Wear. **NII Poroshkovoj Metallurgii, Minsk, Belarus**. *Trenie Iznos* v14, n 4 pp. 645 -657.