

6557

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

ÇİNKO-ALÜMİNYUM ESASLI YATAK ALAŞIMLARININ İÇYAPI VE
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mak.Müh.Hamdullah ÇUVALCI

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"Makine Yüksek Mühendisi"

Ünvanının Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20.6.1989

Tezin Sözlü Savunma Tarihi : 10.7.1989

Tez Danışmanı : Doç.Dr.Temel SAVAŞKAN

Jüri Üyesi : Prof.Dr.Metin Y.GÜRLEYİK

Jüri Üyesi : Prof.Dr.Fazlı ARSLAN

Enstitü Müdürü: Doç.Dr.İlhan SUNGUR

Temmuz - 1989

TRABZON

T. C.
Yükseköğretim Kurumu
Dokümantasyon Merkezi

ÖNSÖZ

Bugünün metal piyasasındaki kuvvetli rekabet, üretici firmaları, geleneksel malzemelere göre daha üstün ve ekonomik malzemeler geliştirmeye yöneltmiştir. Araştırmacılar, özellikle savunma, havacılık, uzay, elektronik ve tıp alanlarındaki hızlı gelişmelere paralel olarak ortaya çıkan malzeme ihtiyacını karşılamak amacıyla yoğun çalışmalar yürütmektedirler.

İlk defa İkinci Dünya Savaşına rastlayan yıllarda, geleneksel yatak malzemelerinin yerine kullanmak amacıyla üretilen çinko-alüminyum esaslı alaşımların geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar günümüzde de büyük bir ilgi ile sürdürülmektedir. Yapılan araştırmalar, söz konusu alaşımların, pekçok bakımdan, geleneksel yatak alaşımlarından daha üstün olduğunu göstermiştir. Bu üstünlüklerin başında, çinko-alüminyum esaslı alaşımların, aşınma direncinin ve mukavemet/yoğunluk oranının yüksek olması, alaşım elementlerinin kolaylıkla ve ucuza temin edilebilmesi, ideal döküm ve ısıl işlem özelliklerine sahip olması gelmektedir.

Son yıllarda yapılan araştırmalar, düşük oranlardaki bakır yada silisyum katkılarının çinko-alüminyum alaşımlarının hem mekanik hemde tribolojik özelliklerini büyük ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Ancak, her iki elementi de (Cu ve Si) içeren dörtlü Zn-Al-Cu-Si alaşımlarının özellikleri bu zamana kadar incelenmemiştir. Bu nedenle, bu çalışmada çinko-alüminyum esaslı bir dizi ikili Zn-Al, üçlü Zn-Al-Cu ve Zn-Al-Si alaşımları ile birlikte dörtlü Zn-Al-Cu-Si alaşımları da üretilerek, bunların içyapıları, mekanik özellikleri ve aşınma davranışları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Bu incelemeler, bakır yada silisyum katkılarının söz konusu alaşımların hem mekanik özelliklerini hemde aşınma davranışlarını büyük ölçüde iyileştirdiğini göstererek, önceki araştırmacıların buldukları sonuçları doğrulamıştır. Ancak, bakır katkılarının mukavemeti arttırmada silisyumdan, silisyum katkılarının ise aşınma dayanımını arttırmada bakırdan daha etkin oldukla-

rı görülmüştür. Nitekim, hem bakır hemde silisyum içeren dörtlü alaşım ($ZnAl_4OCu_2Si_2$) yalnız bakır içeren üçlü $ZnAl_4OCu_2$ alaşımından daha üstün, ancak yalnız silisyum içeren üçlü $ZnAl_4OSi_2$ alaşımından daha düşük aşınma dayanımı göstermiştir.

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde kendisinden her türlü yardımı ve fedakârlığı gördüğüm sayın Hocam Doç.Dr.Temel SAVAŞKAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, aşınma deney düzenine katkılarından dolayı Yrd.Doç.Dr. Aydın BIYIKLIOĞLU'na, değerli yardımları ile Prof.Dr.Fazlı ARSLAN'a, kimyasal analizleri gerçekleştiren Yrd.Doç.Dr.Oktay TORUL'a ve Arş.Gör.H.Hüseyin AYAR'a çok teşekkür ederim. Çalışmayı 86.112.003.07 kod no.lu proje ile mali yönden destekleyen K.T.Ü. Rektörlüğü ve Araştırma Fonu yetkililerine şükranlarımı sunarım. Ayrıca bu çalışma için gerekli malzeme ihtiyacını karşılayan Çinkur ve Sarkuy-san Firması ile Etibank Seydişehir Alüminyum İşletmesi Müdürlüğüne müteşekkirim. Aynı zamanda Makina Bölümü Malzeme Laboratuvarı ve Talaşlı İmalat Atölyesi Teknisyenleri ile Fotoğrafhane görevlilerine teşekkür ederim.

Haziran 1989

Hamdullah ÇUVALCI

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii-iii
İçindekiler	iv-v
Şekil Listesi	vi-vii
Tablo Listesi	viii
Özet	ix-x
Summary	xi-xii
1. ÇİNKO-ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI İLE İLGİLİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI*	1
1.1. Giriş	1
1.2. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Tarihsel Gelişimi	1
1.3. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Faz Diyagramları	2
1.3.1. İkili Zn-Al Faz Diyagramı	2
1.3.2. Üçlü Zn-Al-Cu Faz Diyagramı	4
1.3.3. Üçlü Zn-Al-Si Faz Diyagramı	5
1.4. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri	6
1.4.1. Yapısal Özellikler	6
1.4.2. Fiziksel Özellikler	8
1.4.3. Mekanik Özellikler	10
1.4.4. Tribolojik Özellikler	18
1.5. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Uygulama Alanları	24
1.6. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı	26
2. DENEYSEL ÇALIŞMA	
2.1. Alaşımların Üretimi, Kimyasal Bileşimlerinin Tayini ve Isıl İşlemler	28
2.2. İçyapı İncelemeleri	28
2.3. Mekanik Deneyler	29
2.3.1. Çekme Deneyi	29
2.3.2. Sertlik Deneyi	29
2.4. Yoğunluk Ölçümleri	29
2.5. Aşınma Deney Düzenliğinin Konstrüksiyonu ve Özellikleri	29
2.6. Aşınma Deneyleri	31
3. DENEY SONUÇLARI (BULGULAR)	
3.1. Kimyasal Analiz Sonuçları	34
3.2. Alaşımların İçyapısı	34

3.3. Mekanik Deney Sonuçları	40
3.4. Aşınma Deneyi Sonuçları	47
4. İRDELEME	51
5. SONUÇLAR	56
6. KAYNAKLAR	58



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

No

Şekil 1	İkili çinko-alüminyum faz diyagramı.....	3
Şekil 2	Murphy'ye göre, Zn-Al-Cu sisteminin 350°C sıcaklık- taki izotermal kesiti.....	4
Şekil 3	ZA alaşımlarında yaşlandırma sıcaklığı ve süresine göre boyut değişimi.....	10
Şekil 4	ZA alaşımlarının çekme mukavemetinin yaşlandırma sıcaklığı ve zamanına göre değişimi.....	15
Şekil 5	ZA alaşımlarının çekme mukavemeti ve % uzama değerinin sıcaklıkla değişimi.....	16
Şekil 6	ZA alaşımlarında sürünme hızının gerilmeye göre değişimi.....	18
Şekil 7	Stribeck eğrisi.....	20
Şekil 8	Tipik bir aşınma eğrisi.....	21
Şekil 9	Monotektoid esaslı alaşımların aşınma diyagramı....	23
Şekil 10	Ötektoid esaslı üçlü alaşımların aşınma diyagramı.....	24
Şekil 11	CuPb30 ve ZnAl38Cu2 alaşımlarında meydana gelen aşınmanın uygulanan yüke göre değişimi.....	25
Şekil 12	Aşınma deney düzeneğinin şematik resmi.....	30
Şekil 13	Aşınma deney düzeneğinin görünümü.....	31
Şekil 14	Aşınma düzeneğine ait disk ve nümunenin yakından görünümü.....	32
Şekil 15	Uzama Ölçer (Strain gauge) için kalibrasyon doğrusu.....	33
Şekil 16	ZnAl25Cu2 alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı..	35
Şekil 17	Stabilize edilmiş ZnAl25Cu2 alaşımının içyapısı...	36
Şekil 18	ZnAl40Cu2 alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı..	36
Şekil 19	ZnAl40Cu2 alaşımının stabilize edilmiş durumdaki içyapısı.....	37
Şekil 20	ZnAl40Si2 alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı..	38
Şekil 21	ZnAl40Si2 alaşımının stabilize edilmiş durumdaki içyapısı.....	38

Şekil 22	ZnAl ₄₀ Cu ₂ Si ₂ alaşımlarının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	39
Şekil 23	ZnAl ₄₀ Cu ₂ Si ₂ alaşımlarının stabilize edilmiş durumdaki içyapısı.....	39
Şekil 24	Dökülmüş durumdaki ikili Zn-Al alaşımlarının çekme mukavemeti ve sertliğinin içerdikleri alüminyum oranına göre değişimi.....	42
Şekil 25	Fırında soğutulan ikili alaşımların çekme mukavemeti ve sertliğinin alüminyum oranına göre değişimi.....	43
Şekil 26	Su verme işlemi sonrası yapay olarak yaşlandırılan ikili alaşımların mukavemet değerlerinin alüminyum oranı ile değişimi.....	44
Şekil 27	Dökülmüş durumdaki üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarının çekme mukavemeti ve sertliğinin alüminyum oranına göre değişimi.....	44
Şekil 28	Fırında soğutulan üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarının çekme mukavemeti ve sertliğinin alüminyum oranı ile değişimi.....	45
Şekil 29	Su verme işlemi sonra yapay olarak yaşlandırılan üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarının çekme mukavemeti ve sertliğinin alüminyum oranına göre değişimi.....	45
Şekil 30	Bakır katkısının dökülmüş durumdaki monotektoid alaşımların mukavemetine etkisi.....	46
Şekil 31	Su verme işlemi sonrası yaşlandırılmış monotektoid alaşımların mukavemetinin bakır oranı ile değişimi.....	46
Şekil 32	Aşınma numunelerinin sıcaklık-zaman eğrisi.....	47
Şekil 33	Alaşımların aşınma davranışını gösteren eğriler.....	49

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 1 İkili Çinko-alüminyum Sistemindeki Önemli Dönüşümler.....	4
Tablo 2 Ticari Zn-Al ve Bazı Döküm Alaşımlarının Fiziksel Özellikleri.....	9
Tablo 3 Modife Edilmiş ZA-27 Alaşımının Çekme Mukavemeti ve Yüzde Uzama Değerleri.....	12
Tablo 4 Zn-Al ile Bazı Döküm Alaşımlarının Mekanik Özellikleri.....	14
Tablo 5 ZA Alaşımları ile Bazı Döküm Alaşımlarının Kırılma Toklukları.....	17
Tablo 6 Alaşımların Kimyasal Bileşimleri.....	34
Tablo 7 Mekanik Deney Sonuçları.....	41
Tablo 8 Aşınma Deneyi Sonuçları.....	48

ÖZET

Değişik kimyasal bileşimlerde bir dizi ikili çinko-alüminyum, üçlü çinko-alüminyum-bakır ve çinko-alüminyum-silisyum ve dörtlü çinko-alüminyum-bakır-silisyum alaşımları kokil döküm yöntemi ile üretilmiştir. Alaşımların içyapı ve mekanik özellikleri, gerek dökülmüş, gerekse ısıl işlem görmüş durumlarda incelenerek, kimyasal bileşim oranının bu özellikler üzerindeki etkileri belirlendi. Söz konusu alaşımların aşınma davranışları ise, laboratuvarında imal edilen yeni bir aşınma deney düzeneği yardımı ile incelendi. Bulunan sonuçlar alaşımların kimyasal bileşimi, içyapısı ve mekanik özelliklerine dayandırılarak açıklandı.

İncelemeler sonucunda, ikili alaşımların çekme dayanımı ile sertliğinin artan alüminyum oranı ile artarak yaklaşık % 60 Al oranında en yüksek değerlere ulaştığı ve bu oranın üzerindeki bileşimlerde ise, tekrar azaldığı görüldü. Düşük oranlarda bakır içeren üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarında ise, mukavemet değerlerinin alüminyum oranı ile artarak % 40 Al oranında en yüksek değerlere ulaştıktan sonra, tekrar düştüğü gözlemlendi. Ayrıca, düşük oranlardaki bakır katkılarının ikili çinko-alüminyum alaşımlarının çekme dayanımı ile sertliğini büyük ölçüde arttırdığı belirlendi. Ancak, belirli bir oranın üzerindeki bakır katkılarının, bu alaşımların mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği görüldü.

Bu çalışmada, dökülmüş durumdaki alaşımların stabilize edilmiş alaşımlardan daha üstün aşınma davranışı sergilediği görüldü. Nitekim, en yüksek aşınma direnci dökülmüş durumdaki silisyum içeren üçlü alaşımdan, en düşük aşınma direnci ise stabilize edilmiş durumdaki bakır içeren üçlü ZnAl₂SiCu₂ alaşımından elde edildi. Silisyum içeren bütün alaşımlar (ZnAl₄Si₂, ZnAl₄Cu₂Si₂), gerek bakır içeren alaşımlardan ve gerekse geleneksel bir yatak malzemesi olan DIN-1705 (CuSn₁₂) bronzundan daha üstün aşınma davranışı sergiledi. Alaşımların hem mukavemet ve hemde aşınma direncini yükseltmek bakımından, bakır ve silisyumun çok uygun alaşım elementleri olduğu belirlendi. Bakır katkısı alaşımların mekanik özellik-

lerini iyileştirmede silisyumdan daha etkili olurken, silisyum katkısının aşınma dayanımını arttırmada bakırdan daha etkin olduğu görüldü. Nitekim, hem bakır ve hemde silisyum içeren dörütlü $ZnAl_4Cu_2Si_2$ alaşımının, mukavemet yönünden üçlü $ZnAl_4Si_2$ alaşımından, aşınma dayanımı bakımından ise yalnız bakır içeren ötektoid ve monotektoid esaslı üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarından daha üstün olduğu belirlendi.



SUMMARY

A series of binary zinc-aluminum, ternary zinc-aluminum-copper and zinc-aluminum-silicon and quaternary zinc-aluminum-copper-silicon alloys were produced by permanent mould casting. Their micro-structure and mechanical properties were investigated in the as-cast and heat treated conditions as a function of chemical composition. The wear behaviour of the alloys was examined using a new wear test apparatus which is designed and constructed for this work. The wear test results obtained from the alloys were related to their chemical composition, microstructure and mechanical properties.

It was found that the tensile strength and the hardness of the binary alloys increased with increasing aluminum content up to 60 % Al, above which they decreased as the aluminum content increased. It was also found that the additions of small amount of copper greatly increased the tensile strength and hardness of the binary alloys. However, above a certain percentage, the mechanical properties of these alloys were inversely affected by the copper additions.

It was also shown that all the experimental alloys in the as-cast condition exhibited superior wear behaviour than in the stabilized condition. Among the experimental alloys, the highest wear resistance was obtained with the silicon-containing alloys in the as-cast condition, while the copper-containing ternary ZnAl25Cu2 alloy showed the lowest wear resistance in the stabilized condition.

As a result of this work, copper and silicon were found to be most useful alloying additions to improve both mechanical and wear behaviour of the alloys. However, copper was a more effective strengthening additive than silicon, while silicon was found to be more effective than copper in increasing wear resistance of the alloys.

A quaternary alloy containing both copper and silicon, showed higher strength than silicon-containing ternary alloys, and higher wear resistance than copper-containing ternary alloys. It is therefore concluded that for zinc-aluminum alloys optimum properties including strength and wear resistance can be obtained by the additions of controlled amount of both copper and silicon.



1. ÇİNKO-ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI İLE İLGİLİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1. Giriş

Son yıllarda çinko-alüminyum esaslı alaşımların geliştirilmesi ve uygulama alanlarının yaygınlaştırılması amacıyla yoğun araştırma çalışmaları yürütülmektedir. Bu alaşımlara gösterilen ilgi bunların ekonomik avantajları yanında, üstün tribolojik ve mekanik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Yalnız Kuzey Amerika'da çinko-alüminyum esaslı alaşımların pazar payının, toplam döküm malzemesi hacminin % 1.3'ü olan 180.000 ton olarak gerçekleşeceği gözönüne alındığında, bu alaşımların ne kadar geniş uygulama alanlarında kullanıldığı ortaya çıkmaktadır.

Yapılan araştırmalar, çinko-alüminyum esaslı yatak alaşımlarının geleneksel yatak malzemelerine göre pekçok üstünlüklere sahip olduğunu göstermiştir (Savaşkan ve diğ., 1986, S.211). Bu üstünlüklerin başında, çinko-alüminyum esaslı alaşımların aşınma direncinin ve özgül mukavemetinin (mukavemet/yoğunluk) yüksek olması, alaşım elementlerinin kolaylıkla ve ucuza temin edilebilmesi, ideal döküm ve ısıl işlem özelliklerine sahip olması gelmektedir. Söz konusu alaşımlar, pekçok uygulamada beyaz metal (Babbit), bronz, pirinç ve dökme demir gibi geleneksel yatak malzemelerinin yerini almaktadır.

1.2. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Tarihsel Gelişimi

Çinko-alüminyum alaşımlarının yatak malzemesi olarak üretimi II. Dünya Savaşı yıllarına rastlar (Altorfer, 1982). Bu yıllarda bakır tedarikinde karşılaşılan güçlükler nedeniyle çinko-alüminyum esaslı alaşımlar bronzlara bir alternatif olarak düşünülmüş ve üretilmiştir. İlk üretilen çinko-alüminyum esaslı yatak alaşımları piyasada "beyaz bronz" olarak adlandırılmıştır. (Calaş ve Ferres, 1982, S.40).

Savaş sonrası, malzeme ihtiyacı daha kolay karşılanabildiğinden pek çok uygulama için tekrar bronzla dönmüştür. Ancak bazı firmalar, yatak uygulamaları için yüksek oranda alüminyum içeren çinko alaşımları geliştirmeye devam etmişlerdir.

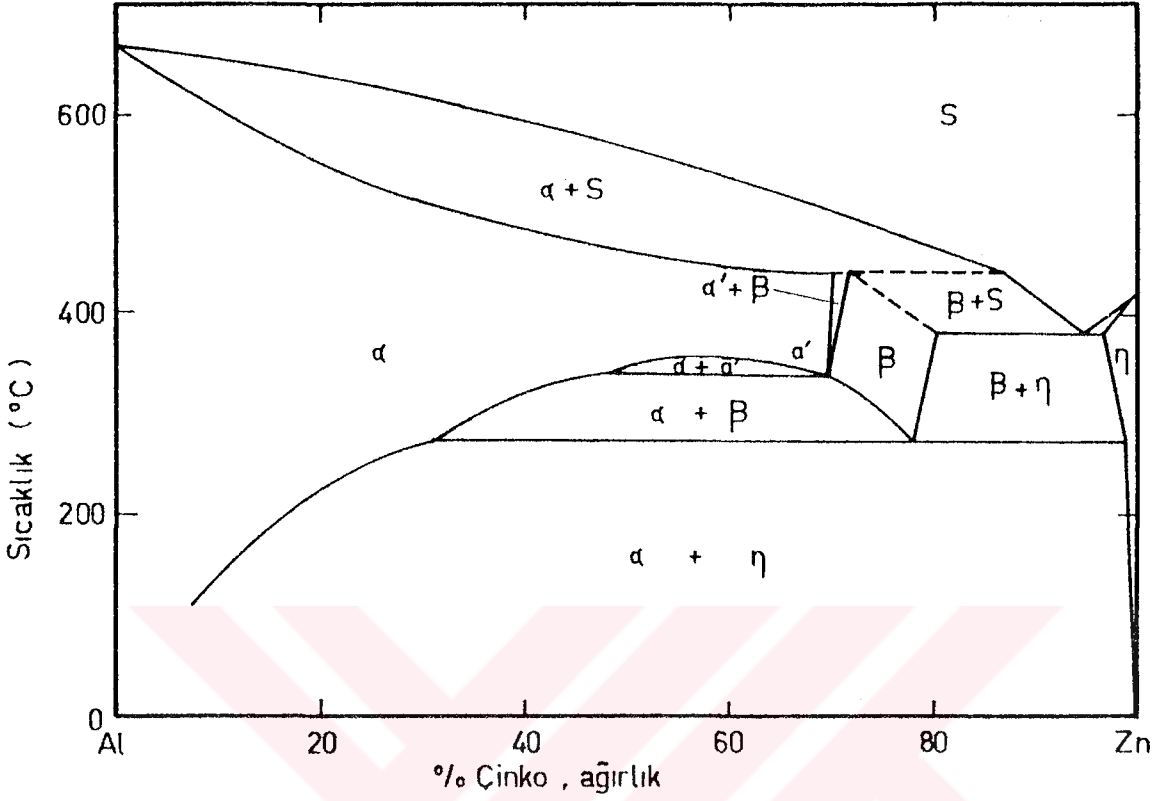
1960'lı yıllarda ILZRO (International Lead-Zinc Research Organization) tarafından geliştirilen ILZRO-12(ZA-12) ve ILZRO-16 adlı ticari alaşımları, 1970 li yıllarda Noranda firması tarafından geliştirilen ZA-8 ve ZA-27 adlı çinko-alüminyum esaslı alaşımlar izlemiştir (Gervais ve Loong, 1984, S.1.). Aynı yıllarda, Avusturya'daki Vöest-Alpina firması tarafından çinko-esaslı %27-70 Al, %0-5 Cu ve %0-5 Si içeren ALZEN alaşımları geliştirilmiştir. Bu alaşımlardan ALZEN-305 (ZnAl30Cu5) olarak bilinen ticari alaşım bugün İngiltere'de Fry's Metals firması tarafından yatak uygulamaları için önemli miktarlarda üretilmektedir (Savaşkan ve diğ., 1984, S.152).

Son zamanlarda, Kuzey Amerika'da daha çok düşük miktarlarda bakır ve silisyum içeren çinko-alüminyum alaşımlarına karşı büyüyen bir ticari ilgi vardır. Çinko-alüminyum alaşımları bugün yatak uygulamaları dışında, yapısal parçaların kokil dökümü ve genel amaçlı döküm alaşımları olarak kullanılmaktadır.

1.3. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Faz Diyagramları

1.3.1. İkili Çinko-Alüminyum Faz Diyagramı

İkili çinko-alüminyum sistemi pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Presnyakov ve arkadaşları (Presnyakov ve diğ., 1961, S.632/633) tarafından belirlenen ve daha sonra Goldak ve Parr (Goldak ve Parr, 1964) tarafından geliştirilen faz diyagramının, bu sistemi en doğru şekilde temsil ettiği kabul edilmiştir. İkili çinko-alüminyum faz diyagramı Şekil 1'de verilmiştir. Sınırsız sıvı çözünürlüğü gösteren bu sistem metallererarası bileşik (İntermetalik) oluşumuna izin vermemektedir. Çinko esaslı alaşımların katılaşma aralığı alüminyum oranına göre değişmekte ve bu nedenle dökülen alaşımların iç yapısı farklı özellikler göstermektedir (Delneuville ve diğ., 1985, S.569).



Şekil 1. İkili çinko-alüminyum faz diyagramı

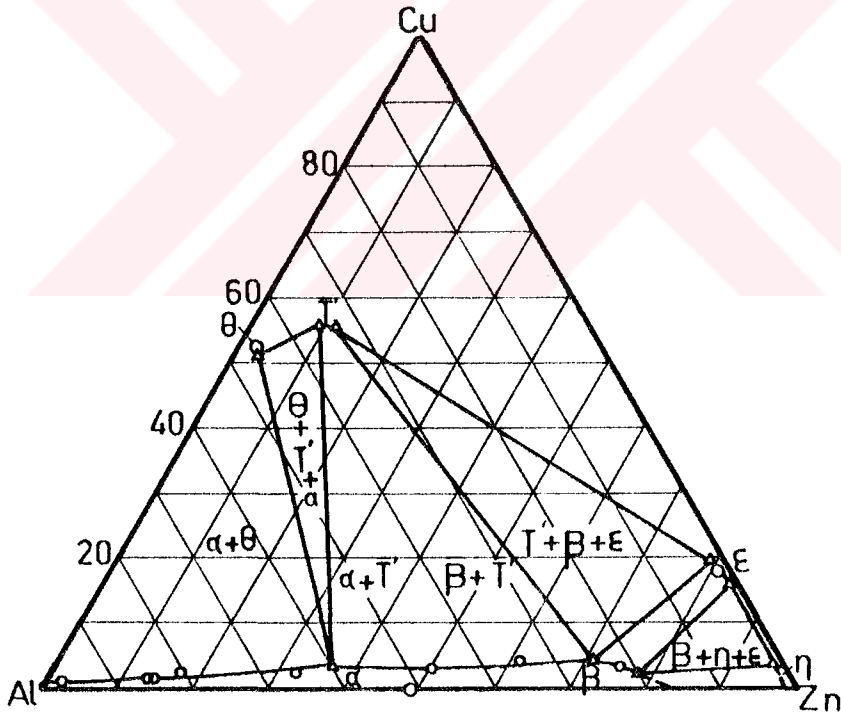
Bu diyagramda alüminyumca zengin faz bölgesi α , çinkoca zengin faz ise η fazı olarak adlandırılmıştır. Alüminyum içeri-
 indeki çinko katı eriyiği % 80 Zn oranına kadar uzanarak α , α'
 ve β olarak adlandırılan üç değişik faz bölgesi oluşturmaktadır. Bu fazların hepsi, yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahiptir. α ve α' fazlarının kafes parametreleri birbirine çok yakın olduğundan, bunlar arasındaki faz sınırı tam olarak belirlenememiştir. Faz diyagramından görüldüğü gibi, % 32-78 Zn oranları arasında ise $\alpha + \alpha'$ olarak adlandırılan bir karışmazlık bölgesi (immiscibility gap) oluşmaktadır. İkili çinko-alüminyum alaşım diyagramında ortaya çıkan faz dönüşümleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1 İkili çinko-alüminyum sistemindeki önemli dönüştürmeler

Dönüşüm	Bileşim Oranı (%Zn)	Sıcaklık(°C)
Ötektik $S \rightleftharpoons \beta + \eta$	95	382
Ötektoid (i) $\beta \rightleftharpoons \alpha + \eta$	78	276
(ii) $\alpha / \alpha' \rightleftharpoons \alpha + \beta$	32	340
Peritektik $\alpha + S \rightleftharpoons \beta$	72	443

1.3.2. Üçlü Çinko-Alüminyum-Bakır Faz Diyagramı

Üçlü çinko-alüminyum-bakır sistemine ait faz diyagramı henüz tam olarak belirlenememiş olmakla birlikte, sistemin düşük oranlarda bakır içeren bölümü Murphy (Murphy, 1980) tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Çinko-alüminyum-bakır alaşım diyagramınının 350°C sıcaklıktaki izotermal kesiti Murphy (Murphy, 1980, S.96/102) tarafından belirlenerek Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Murphy'ye göre, Zn-Al-Cu sisteminin 350°C sıcaklıktaki izotermal kesiti

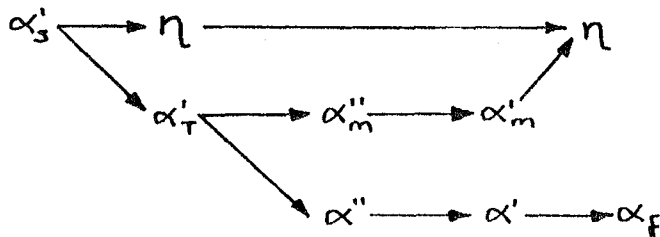
Çinko-alüminyum-bakır alaşımlarında ϵ (CuZn_4), θ (CuAl_2) ve T' ($\text{Al}_4\text{Cu}_3\text{Zn}$) gibi intermetalik bileşiklerin oluşması nedeniyle faz dönüşümleri ikili sisteme göre, çok daha karmaşık olup tamamlanması uzun süre almaktadır. Koster'e göre (Koster, 1941, S.289) $\alpha + \epsilon \rightleftharpoons T' + \eta$ dönüşümünün oda sıcaklığında tamamlanması için birkaç aydan birkaç yıla kadar değişen bir dönüşüm süresi gereklidir. Lohberg (Lohberg, 1983, S.456/457) yukarıda belirtilen dörtlü faz reaksiyonunun Zn-Al-Cu alaşımlarında yaklaşık %4,5 oranında bir hacim büyümesine neden olduğunu belirlemiştir. Krol ve Tosior (Krol ve Tosior, 1971, S.199) %1-10 arasında bakır içeren Zn-Al-Cu alaşımlarında, yaşlandırma sırasında ortaya çıkan faz dönüşümlerini inceleyerek aşağıdaki katı hal reaksiyonlarını önerdiler:



Düşük oranlarda (%1-5) bakır içeren Zn-Al-Cu alaşımlarında kararlı bir içyapı oluşturmak için uygun bir ısı işleme yukarıda verilen faz dönüşümlerinin tamamlanması gerekir. Bunu gerçekleştirmek için de alaşımların döküm sonrası, 150°C 'da yaklaşık 400 saat, yada 200°C 'da 80 saatlik bir süre yaşlandırılmalarının yeterli olabileceği, yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir (Savaşkan ve Murphy, 1984, S.553).

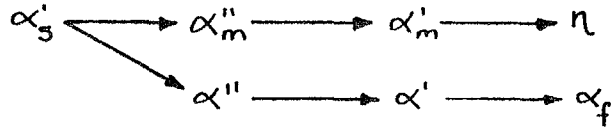
1.3.3. Üçlü Çinko-Alüminyum-Silisyum (Zn-Al-Si) Faz Diyagramı

Çinko-alüminyum-silisyum alaşım sistemine ait faz diyagramı henüz tam olarak belirlenmemiş olmakla birlikte, bu sistemdeki faz dönüşümleri Savaşkan ve arkadaşları (Savaşkan ve diğ., 1983, S.1) tarafından elektron mikroskobu ve X-ışınları difraksiyonu yardımı ile incelenmiştir. Bu araştırma sonucunda çözündürme ve su verme işlemi sonrası yaşlandırılan monotektoid bileşimdeki $\text{ZnAl}_{13}\text{Si}_5$ alaşımında, aşağıda verilen faz dönüşümlerinin ortaya çıktığı belirlenmiştir:



Bu faz dönüşümü sırasında ilk önce oluşan G.P. bölgelerini, çinkoca zengin α_m'' ve α_m' geçiş fazları izlemekte ve dönüşüm çinkoca zengin η fazı ile alüminyumca zengin α_f fazının oluşumu ile tamamlanmaktadır.

Düşük oranda çinko içeren üçlü ZnAl65Si5 alaşımında ise aşağıda verilen faz dönüşümlerinin ortaya çıktığı belirlenmiştir:



ZnAl65Si5 alaşımında faz dönüşümleri monotektoid alaşımdan (ZnAl35Si5) daha yavaş olmakla birlikte, ilk dönüşüm safhasında yalnız, çinkoca zengin geçiş fazlarının oluştuğu gözlenmiştir. Su verme işlemi ile elde edilen aşırı doymuş α_s' fazı, yaşlandırma sırasında birtakım geçiş fazları (α_m'' , α_m' , α'' , α') oluşturduktan sonra, çinkoca zengin η ve alüminyumca zengin α_f kararlı fazlarına dönüşmektedir (Zhu, 1983).

Bu çalışma sonucunda ayrıca, silisyumun çinko-alüminyum alaşımları içerisindeki katı çözünebilirliğünün çok az olduğu ve bu nedenle faz dönüşümlerini pek etkilemediği görülmüştür. Bununla birlikte, silisyum parçacıklarının büyüklüğü ve dağılımının bileşim oranına bağlı olduğu gözlenmiştir. Şöyleki, silisyum oranı artırıldığında silisyum parçacıklarının büyüdüğü ve dağılımlarının düzensizleştiği görülmüştür. Silisyum miktarı belli bir oranın (% 2) altında tutulduğunda ise silisyum parçacıklarının hem boyutunun küçüldüğü, hem de daha homojen olarak dağıldığı gözlenmiştir.

1.4. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri

1.4.1. Yapısal Özellikler

Alaşımların iç yapısını etkileyen faktörlerin başında, kimyasal bileşim oranı, ısıtma işlem ve soğuma hızı gelmektedir. Çinko-alüminyum alaşımları dökülmüş durumda göbekli dendritik bir iç yapı sergilemektedir.

Dökülmüş durumdaki ötektoid ve monotektoid bileşimdeki ikili çinko-alüminyum alaşımlarının iç yapıları genelde alüminyumca zengin dendritler (dal biçimindeki faz) ile bunları çev-

releyen çinkoca zengin fazlardan oluşmaktadır. Ancak, alüminyum oranı arttıkça iç yapıdaki alüminyumca zengin dendritlerin büyüklüğü artmaktadır.

α, α' ve β faz bölgelerinin herhangi birinden yavaş soğutulan alaşımların iç yapılarında kararlı çinko (η) ve alüminyum (α) fazları oluşmaktadır. β fazı içerisinde (350°C sıcaklıkta) çözündürme işlemine tabi tutulan ikili ötektoid alaşım yavaş soğutulduğunda çinko ve alüminyumca zengin katmanlar içeren lamelli bir iç yapı oluşmaktadır. İç yapıdaki lamel büyüklüğü (lamel aralığı) alaşımın soğuma hızına bağlıdır. Fırında soğutulan alaşımlarda kaba lamelli, havada soğutulan alaşımlarda ise ince lamelli bir içyapı oluşmaktadır.

Hızlı soğutma işlemi çinkonun, aşırı doymuş katı eriyik içerisinde tutulmasına neden olur ve sonraki yaşlandırma sırasında katı eriyik içerisinde ortaya çıkan faz dönüşümleri bir takım geçiş fazları oluştururlar. En son elde edilen içyapı, alaşımların bileşimine ve yaşlandırma sıcaklığına bağlıdır. Yaklaşık % 50 oranına kadar çinko içeren alaşımlar bir takım araştırmacılar (Carpenter ve Garwood, 1967) tarafından incelenerek aşağıdaki faz dönüşümleri bulunmuştur:

Aşırı doymuş katı eriyik \longrightarrow küresel Guiner-Preston bölgeleri (G.P zonları) \longrightarrow rombohedral α' \longrightarrow kübik α' \longrightarrow çinko

Bileşimleri β fazı bölgesine karşı gelen alaşımlar, çözündürme ve su verme işlemleri sonrası ortamsıcaklığında yaşlandırıldığında, çinko ve alüminyumca zengin, eş-eksenli çok ince taneleri içeren bir iç yapı oluşmaktadır. Araştırmacılar bu yapısal değişikliği spinodal faz dönüşümüne dayandırarak açıklamaktadırlar (Savaşkan ve Murphy, 1984, S.533/534).

Düşük oranlarda bakır içeren monotektoid ve ötektoid esaslı üçlü alaşımların iç yapılarının morfolojik bakımdan ikili monotektoid ve ötektoid alaşımların iç yapılarına çok benzediği görülmüştür. Ancak bakır içeren üçlü alaşımların iç yapılarında bakırca zengin ϵ (Cu_3Zn_4) ve T' ($\text{Al}_4\text{Cu}_3\text{Zn}$) gibi metallererarası bileşiklerin olduğu gözlenmiştir. Söz konusu intermetalik fazların ayrıca yapay yaşlandırma sırasında da olduğu görülmüştür.

Düşük oranlarda silisyum içeren monotektoid alaşımların dökülmüş durumdaki içyapısı, alüminyumca zengin α dendritlerini çevreleyen çinkoca zengin fazlar ile silisyum parçalarından oluşmaktadır. 150° C sıcaklıkta 240 saatlik yaşlandırma (Stabilizasyon) işlemi sonunda hem α taneleri içerisinde hem de dendritlerarası bölgelerde çinko ve alüminyumca zengin çökeltilerin oluştuğu gözlenmiştir (Savaşkan ve diğ., 1987, S.83). Ancak uygulanan stabilizasyon işleminin silisyum fazı üzerinde pek etkili olmadığı görülmüştür.

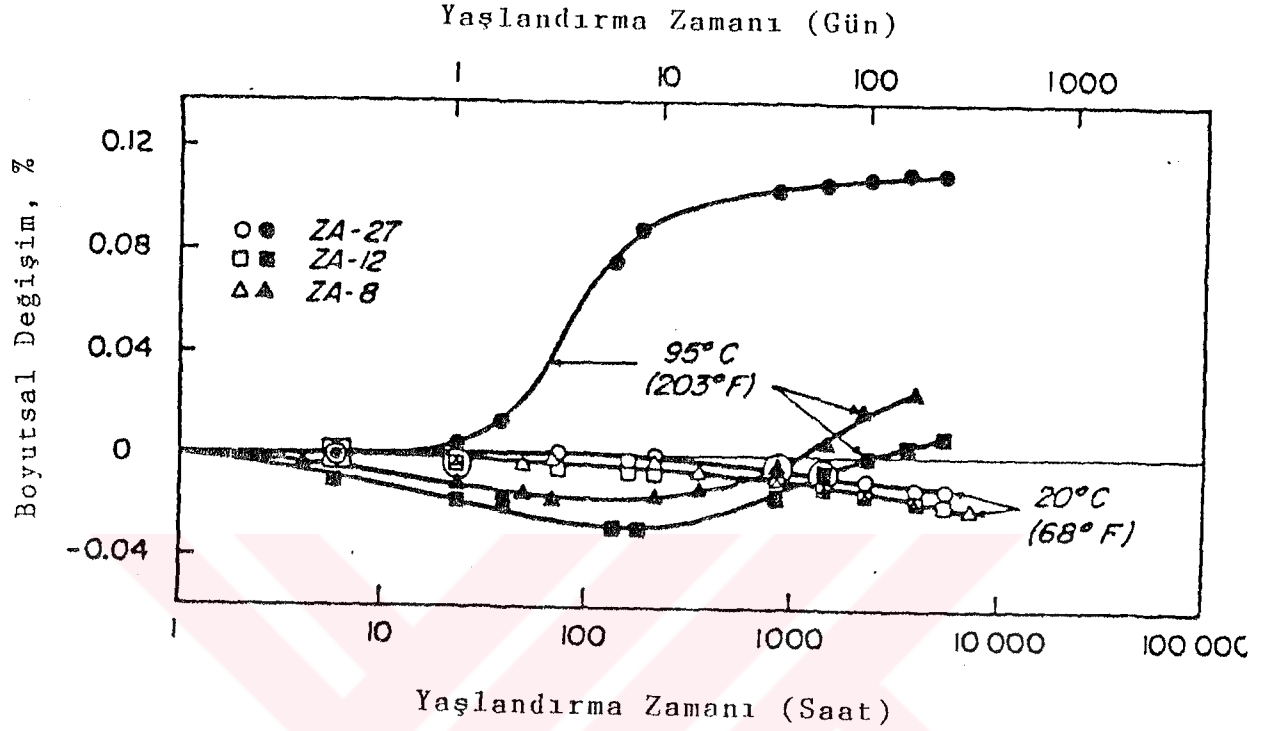
1.4.2. Fiziksel Özellikler

Çinko-alüminyum alaşımlarının yoğunlukları, bronz, pirinç, dökme demir gibi geleneksel alaşımlara göre daha düşük olup, özgül mukavemeti (Mukavemet/yoğunluk) ise oldukça yüksektir. Alüminyum oranı arttıkça azalan yoğunluk değerleri bu alaşımların birim maliyet değerini büyük ölçüde düşürmektedir. Tablo 2'de ticari çinko-alüminyum alaşımları ile birlikte bazı döküm alaşımlarının tipik fiziksel özelliklerini gösteren değerler verilmiştir. Çinko-alüminyum alaşımlarının ısı iletkenlik, ısı iletkenlik katsayıları alüminyum alaşımları dışındaki, geleneksel döküm alaşımlarına göre, daha yüksek olup, bu katsayılar artan alüminyum oranı ile artmaktadır.

Üçlü çinko-alüminyum-bakır alaşımlarında katılaşma sırasında oluşan kararsız dengeli (metastabil) fazların, yaşlandırma sırasında kararlı fazlara dönüşmesi sonucunda, bir hacımsal büyümenin meydana geldiği bilinmektedir (Lohberg, 1983, S.456/457). Bu hacımsal büyümenin, artan bakır oranı ve sıcaklık ile birlikte arttığı yapılan incelemeler sonucunda belirlenmiştir. Şekil 3'de ticari ZA alaşımlarında yaşlandırma sıcaklığı ve süresinin alaşımların boyutsal değişimi üzerindeki etkisi görülmektedir. 20° C lik sıcaklıkta uygulanan 12.000 saatlik doğal yaşlandırma işlemi tüm alaşımlarda % 0.015 - 0.03 arasında bir büzülme meydana getirirken, daha yüksek sıcaklıkta (95° C) uygulanan yaşlandırma işleminin hacımsal büyümeye yol açtığı gözlenmiştir (Barnhurst ve diğ., 1985, S.46).

Tablo 2 Ticari Zn-Al ve Bazı Döküm Alaşımlarının Fiziksel Özellikleri

Alaşım	Özellikler				
	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ergime Aralığı (°C)	Isıl Genleşme Katsayısı (µm/m·K)	Isıl İletkenlik W/m·K	Elektrik İletkenliği % IACS
No.3 AG-40A Çinko Alaşımı Basıncılı Döküm	6.60	381-387	27.4	113	27.0
No.5 AC-41A Çinko Alaşımı Basıncılı Döküm	6.70	380-386	27.4	109	26.0
ZA-8 Koki1 Döküm	6.3	373-404	23.2	115	27.7
ZA-12 Koki1 Döküm	6.03	377-432	24.1	116	28.3
ZA-27 Kum Döküm	5.0	375-484	26.0	125.5	29.7
Alüminyum Alaşımı 356-T6 Koki1 Döküm	2.69	556-615	21.5	151	39
Alüminyum Alaşımı 380 Basıncılı Döküm	2.74	540-595	21.8	96.2	27
Alüminyum Alaşımı 319 Basıncılı Döküm	2.80	515-605	21.5	109	27
SAE-40 Pirinci Kum Döküm	8.83	855-1010	18	72	15
SAE-660 Bronzu Kum Döküm	8.93	855-975	18	59	12
SAE-64 Bronzu Kum Döküm	8.88	762-928	18.5	46.9	10.1
Kır Dökme Demir C 30 Kum Dök.	6.94	1176	12.1	49-52	--
Dövülebilir Çelik 32510 Kum Dök.	7.2-7.45	1232	11.9	--	6



Şekil 3. ZA alaşımlarında yaşlandırma sıcaklığı ve süresine göre boyut değişimi

1.4.3. Mekanik Özellikler

Alaşım elementi olarak katılan alüminyum bu alaşımların döküm özelliklerini iyileştirmekten başka, mukavemet değerlerini de arttırmaktadır. Ancak çinko esaslı ikili alaşımların mekanik özelliklerinin pek çok uygulama için yetersiz olduğu bilinmektedir.

Yapılan araştırmalar, bakır, magnezyum, silisyum gibi alaşım elementi katkılarının ikili çinko-alüminyum alaşımlarının mukavemetini arttırdığını göstermiştir. Özellikle bakır katkısı, ikili alaşımların mukavemet, korozyon ve aşınma dayanımlarını büyük ölçüde arttırmaktadır. Ayrıca bakır katkısı arttıkça üçlü alaşımlarda ortaya çıkan hacimsel büyüme miktarının da arttığı bilinmektedir. Bu nedenlerle üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarında, bakır

oranının % 3 değerinden daha düşük tutulmasının gerek boyutsal kararlılık ve gerekse mekanik özellikler açısından uygun olacağı ortaya çıkmaktadır (Savaşkan ve Murphy, 1986, S. 223).

Malzemelerin mekanik özellikleri, sahip oldukları içyapıya bağlıdır. Çinko-alüminyum alaşımlarında içyapı mekanik özellik ilişkileri dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumlarda pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Skenazi ve arkadaşları (Skenazi ve diğ., 1983, S. 898) dökülmüş durumdaki ZA adlı ticari alaşımların içyapısındaki dendrit kol aralığı küçüldükçe alaşımların çekme mukavemetinin arttığını gözlemişlerdir. Ayrıca, aynı araştırmacıların söz konusu alaşımlarda, dendrit kol aralığı (d) ile çekme mukavemeti (Rm) arasında buldukları bağıntılar aşağıda verilmiştir:

Alaşım No	Bağıntı
ZA - 8	$R_m = 49 + 857 d^{-1/2}$
ZA - 12	$R_m = 240 + 400 d^{-1/2}$
ZA - 27	$R_m = 370 + 200 d^{-1/2}$

Bu bağıntılarda, Rm'nin birimi MPa, d ise μm olarak alınmıştır. Çinko-alüminyum alaşımlarında tane boyutu soğuma hızından başka tane küçültücü element katkıları ile de kontrol edilmektedir (Skenazi ve diğ., 1983, S. 901). Yapılan araştırmalar B, Ti, Zr, La ve Ce gibi katkı elementlerinin tane boyutunu küçülterek alaşımların mukavemet değerlerini iyileştirdiğini göstermiştir. Tane küçültücü katkı elementlerinin ZA-27 ticari alaşımının mukavemet değerleri üzerindeki etkisi Tablo 3'de verilmektedir.

Aşağıdaki tablodan Ti-B master alaşımının en etkin tane küçültücü katkı maddesi olduğu görülmektedir.

Tablo 3 Modife Edilmiş ZA-27 Alaşımının Çekme Mukavemeti ve Yüzde Uzama Değerleri

Tane Küçültücü Elementler	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Uzama
--	400	5
B	400	13
B	383	15
Ti-B	404	14
Ti-B	402	18
Ti-B	438	6
Zr	371	1
Ti-Ba	418	12
La	398	14
Ce	392	13

Çinko-alüminyum alaşımlarının ergime sıcaklıklarının düşük ve katılaşma aralıklarının oldukça geniş olması içyapıda mikroboşlukların (porozite) oluşmasına neden olmaktadır. Katılaşma sırasında, içyapıda oluşan mikroboşlukların alaşımların mukavemet değerlerini önemli ölçüde azalttığı gözlenmiştir (Delneuville ve diğ., 1985, S. 571). Bu nedenle, dökümsirasındaki katılaşmaya etki eden bütün faktörlerin (döküm sıcaklığı, kokil sıcaklığı, katılaşma hızı, kokil biçim ve geometrisi vb.) kontrol edilerek boşluk (porozite) oluşumunun önlenmesi yada en aza indirilmesi gerekir.

Genel olarak çinko-alüminyum alaşımları geleneksel döküm alaşımlarından daha üstün mukavemet değerlerine sahiptir. Çinko-

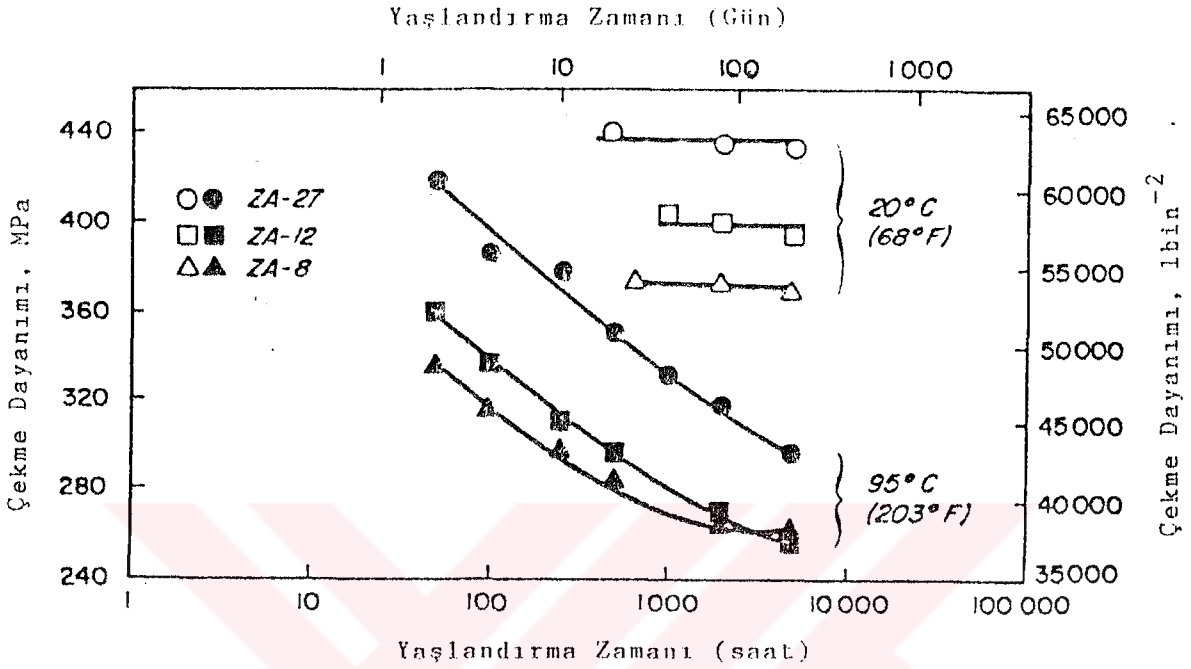
alüminyum alaşımları ile bazı döküm alaşımlarının mekanik özellikleri Tablo 4'de verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü gibi, çinko esaslı alaşımlar alüminyum ve bakır alaşımlarından daha sert, fakat dökme demirden (DD) daha yumuşaktır. (Gervais ve diğ., 1985).

Kararlı bir iç yapı elde etmek amacıyla uygulanan yapay yaşlandırma işleminin Zn-Al alaşımlarının mukavemetini ve % uzama miktarını etkilediği gözlenmiştir. 95°C sıcaklıkta 10 günlük yaşlandırma işlemi, ticari ZA alaşımlarının çekme ve akma dayanımlarını, darbe mukavemetini ve sertlik değerlerini azaltmakla birlikte, kopma uzamasını yaklaşık olarak iki katına çıkarmaktadır. (Gervais ve diğ., 1985, S. 46). New Jersey Çinko kurumunun araştırmalarına göre (Anderson ve diğ., 1968), 95°C'da 10 günlük yaşlandırma işlemi 3 no'lu (Zn-Al3) çinko alaşımının çekme dayanımını 283 MPa'dan, % 15'lik bir azalma ile 241 MPa değerine düşürmektedir. Aynı şekilde bu işlem kopma uzamasını % 10 değerinden % 15'e, sertlik değerini 82 BSD'den 62 BSD değerine ve darbe enerjisini ise 58 Joule'den 54 Joule değerine düşürmektedir. Gervais ve arkadaşları (Gervais ve diğ., 1985, S.46) tarafından yapılan diğer bir araştırmada, oda sıcaklığında (20°C) 5000 saat yaşlandırma işleminin ZA adlı ticari alaşımların mukavemet değerleri üzerinde pek etkili olmadığı gözlenmiştir. ZA alaşımlarının çekme mukavemetinin yaşlandırma sıcaklığı ve zamanına göre değişimini gösteren eğriler (Gervais ve Loong, 1984, S.16) Şekil 4'te verilmiştir.

Çinko-alüminyum alaşımlarının ergime sıcaklıkları oldukça düşüktür. Bu durum bir avantaj olmakla birlikte, söz konusu alaşımları sıcaklığa karşı duyarlı bir hale getirmektedir. Bu nedenle, ticari ZA-27 alaşımı için çalışma sıcaklığı 120°C, ZA-8 ve ZA-12 alaşımları için 90°C olarak sınırlandırılmıştır (Gervais ve Loong, 1985, S. 47). Çinko-alüminyum alaşımlarının akma dayanımı, çekme dayanımı ve sertliği artan sıcaklıkla azalmakta, % uzama miktarı ise artmaktadır. Değişik döküm yöntemleri ile üretilmiş çinko-alüminyum alaşımlarında sıcaklığın çekme mukavemeti ve % uzama değerine etkisi Şekil 5'de verilmiştir (Gervais ve diğ., 1985, S. 46).

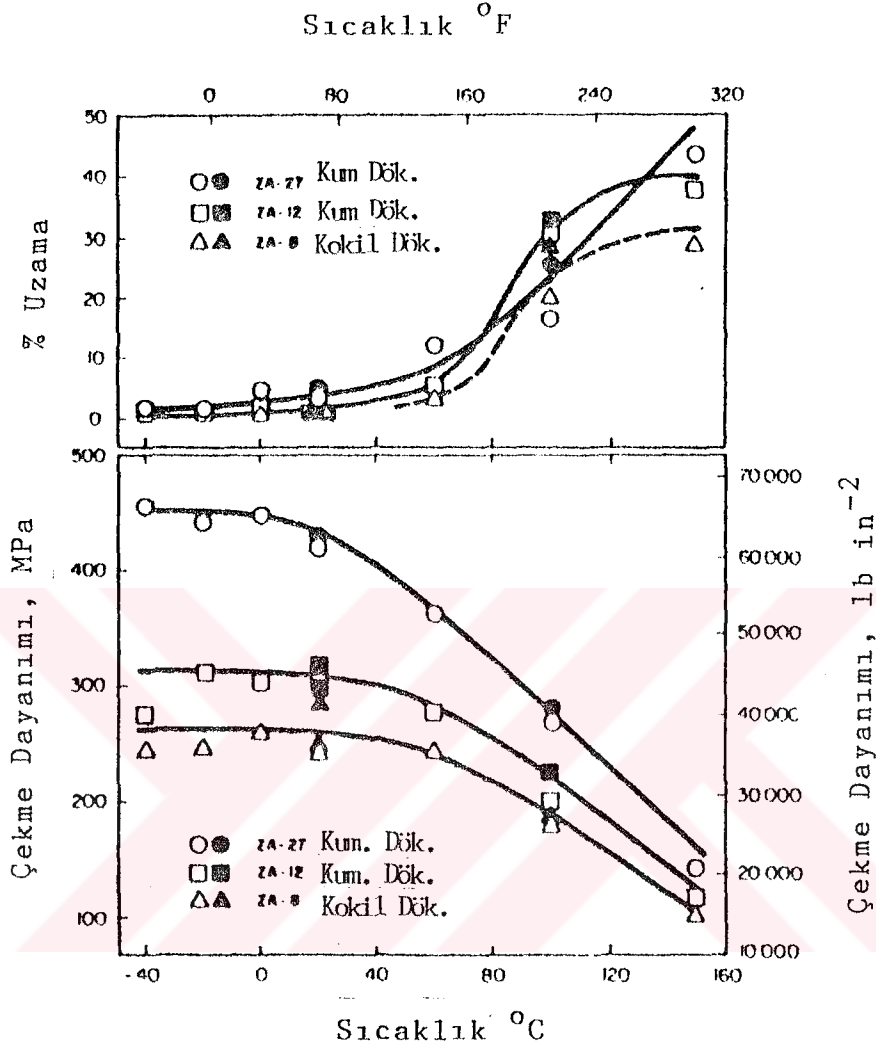
Tablo 4 Zn-Al ile bazı döküm alaşımlarının mekanik özellikleri

Alaşım	Özellikler					
	Çekme Mukavemeti (MPa)	%0.2 Akma Mukavemeti (MPa)	Young Modülü (GPa)	Yüzde Uzama	Brinell Sertliği 500-10-30s	Darbe Dayanımı (J)
No.3 AG-40A Çinko Alaşımı Basınçlı Döküm	283	--	--	10	82	58
No.5 AC-41A Çinko Alaşımı Basınçlı Döküm	331	--	--	7	91	65
ZA-8 Basınçlı Döküm	221-255	207	85.5	1-2	85-90	--
ZA-12 Basınçlı Döküm	393-414	310-331	--	4-7	93-107	20-37
ZA-27 Basınçlı Döküm	407-441	359-379	--	2.0-3.5	116-122	9-16
Alüm.Alaşımı 356-T6 Kokil Döküm	262	186	72.4	5.0	80	--
Alümin.Alaşımı 380 Basınçlı Döküm	324	158	71.0	3.5	80-85	--
Alümin.Alaşımı 319 Basınç.Dök.	185	124	74.0	2	70	--
SAE-40 Pirinci Kum Döküm	255	117	83	30	60	15
SAE-660 Bronzu Kum Döküm	240	124	100	20	65	8
SAE-64 Bronzu Kum Döküm	240	124	80	20	60	15
Kır Dökme Demir C30 Kum Döküm	214	124	90-113	--	210	--
Dövülebilir Çelik 32510 Kum Döküm	345	221	172	10	110-156	54-88



Şekil 4. ZA alaşımlarının çekme mukavemetinin yaşlandırma sıcaklığı ve zamanına göre değişimi

Çinko-alüminyum alaşımlarının kırılma tokluğu diğer mühendislik malzemelerine göre düşük olmamakla birlikte, tokluk değerleri alüminyum oranı ile artmaktadır (Gervais ve diğ., 1985 S.46/47). Ticari ZA alaşımlarının tipik bir sünek-gevrek geçiş davranışı sergiledikleri gözlenmiştir (Gervais ve diğ., 1985, S. 46). Yaşlandırma işlemi, sünek-gevrek geçiş sıcaklığını (T_g) yükseltirken, homojenleştirme-fırında soğutma işlemi bu sıcaklığı düşürmektedir. Ticari ZA alaşımları içinde en yüksek kırılma tokluğu ZA-27 alaşımı ile elde edilmiş olup, bu değer homojenleştirme ve fırında soğutma işlemi ile daha da arttırılmaktadır. ZA ticari alaşımları ile bazı döküm alaşımlarının (dökme demir, alüminyum alaşımları) kırılma toklukları Tablo 5'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5. ZA alaşımlarının çekme mukavemeti ve % uzama değerinin sıcaklıkla değişimi

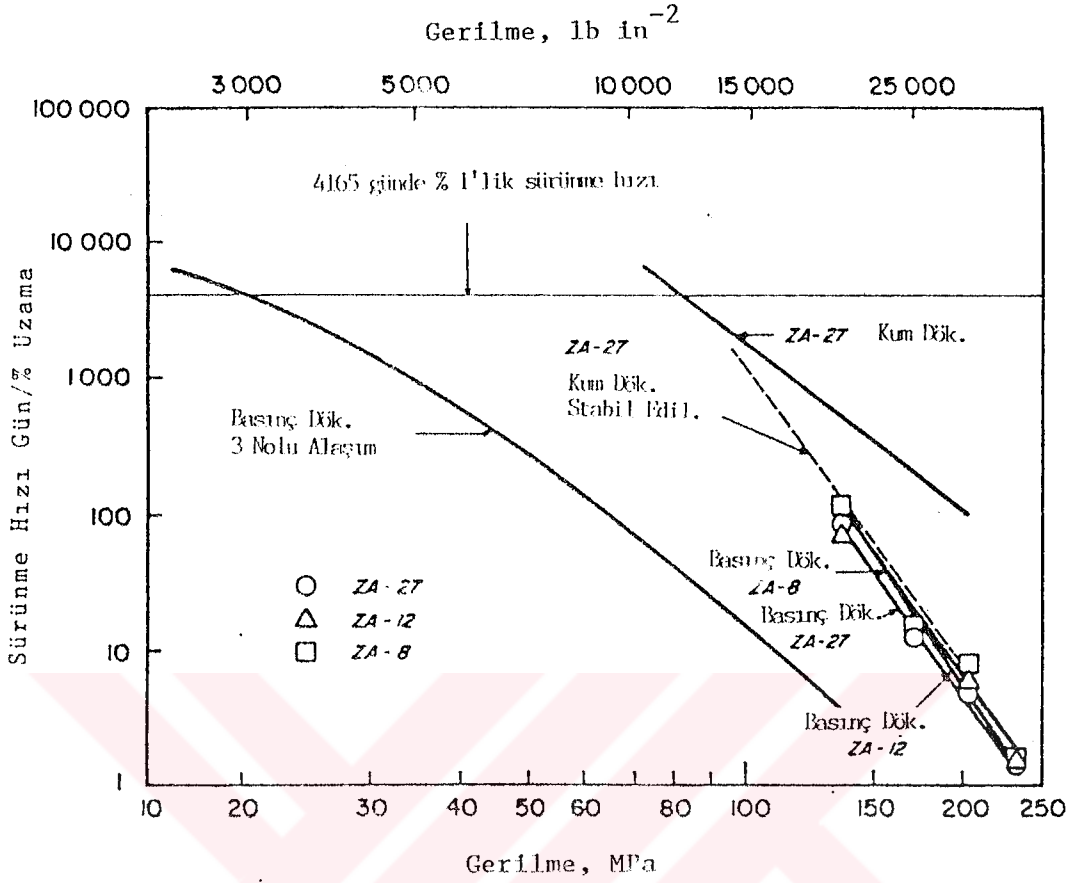
İkili çinko-alüminyum ve üçlü çinko-alüminyum-bakır alaşımlarının sürünme (sünme) davranışı Savaşkan ve Murphy tarafından incelenmiştir (Savaşkan ve Murphy, 1982, S. 82). Söz konusu alaşımların ikincil sürünme hızının $\dot{\epsilon}_s = A\sigma^n \exp(-Qc/RT)$ bağıntısı ile belirlenebileceği gösterilmiştir. Burada $n=3$ ve $Qc=87$ kJ/mol olarak bulunmuştur. Bu araştırma sonucunda, bakır katkılarının çinko-alüminyum alaşımlarının sürünme direncini büyük ölçüde arttırdığı gözlenmiştir. Ayrıca, dökülmüş durumdaki ala-

Tablo 5 ZA alaşımları ile bazı döküm alaşımlarının kırılma toklukları

Malzeme	Kırılma Tokluğu, K _{1c} (MPa/m ²)
ZA-8 Kum Döküm	16
ZA-12 Kum Döküm	18
ZA-27 Kum Döküm	29
ZA-27(320 ⁰ C'de 3 saat homojenleş- tirilmiş)	30-35
Alüminyum A357-T6	29
Alüminyum 2000/7000 Serisi	16-45
Dökme Demir C 30	15-30
Dökme Demir C 50	36-40

şımların ısııl işlem görmüş alaşımlardan daha yüksek sürünme dayanımı sergiledikleri görülmüş ve bu durum söz konusu alaşımların içyapılarına dayandırılarak açıklanmıştır.

Ticari ZA-27 alaşımı için 20⁰C sıcaklıkta, 69 MPa olan tasarım(dizayn) gerilmesi, homojenleştirme işlemi sonrası 89 MPa' a yükselmektedir. Tasarımda kullanılan sürünme gerilmesi, ASME'ye göre; 100.000 saatlik süre içerisinde ikincil sürünme bölgesinde % 1'lik uzama meydana getiren gerilme değeri olarak tanımlanmaktadır(ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 1977). Çinko esaslı alaşımların oda sıcaklığındaki ikincil sürünme hızlarının uygulanan gerilme değerine göre değişimi Şekil 6'da gösterilmektedir(Gervais ve diğ., 1985, S.47).



Şekil 6. ZA alaşımlarında sürünme hızının gerilmeye göre değişimi

1.4.4. Tribolojik Özellikler

Genel anlamıyla triboloji, hareketli yüzeyler arasındaki etkileşimi inceleyen bir bilim ve teknoloji dalı olarak tanımlanmaktadır. Sürtünme, aşınma ve yağlama gibi konuları içeren triboloji, makina mühendisliği, malzeme mühendisliği, fizik ve kimya gibi dalları yakından ilgilendirmektedir. Tribolojik çalışmaların amacı, hareketli yüzeyler arasındaki sürtünme ve aşınmayı minimuma indirerek enerji kayıplarını ve malzeme maliyetini düşürmek, aynı zamanda sistemin verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamaktır.

Gelişmiş ülkelerde triboloji'ye büyük önem verilmekte ve bu konudaki çalışmalara geniş mali kaynaklar sağlanmaktadır. A.B.D.'de 1977 yılında yapılan bir istatistiğe göre (Pinkus ve Wilcock, 1977) tribolojinin uygulama alanlarında kullanımı ve ge-

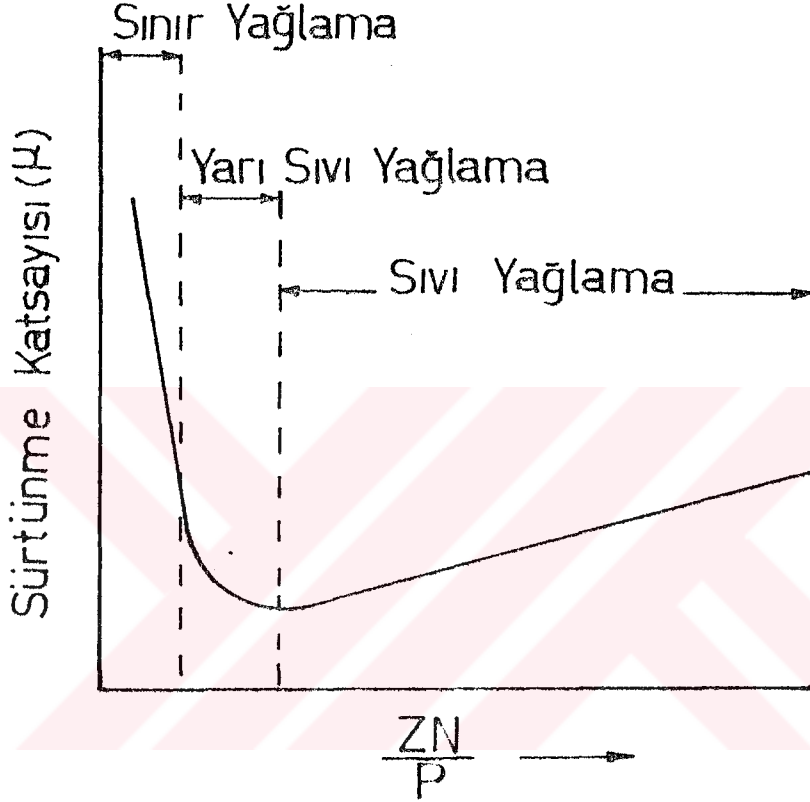
liştirilmesi sonucunda, toplam enerji tüketiminin % 11'i olan 16 milyar dolarlık bir tasarruf potansiyelinin gerçekleşeceği hesaplanmıştır. Bu program için hesaplanan araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin toplam maliyeti ise sadece 24 milyon dolar düzeyindedir. Bu rakamlar, triboloji konusu ile ilgili araştırma ve geliştirme çalışmalarının ülke ekonomisine getireceği katkılardan dolayı dikkate değer niteliktedir.

Kalayın pahalı ve kısıtlı miktarda bulunan bir metal olması, kalay bazlı yatak alaşımları için bir dezavantaj teşkil etmektedir. Bu nedenle, günümüzde yatak uygulamaları için, beyaz metal (Babbitt), bronz, pirinç gibi geleneksel yatak alaşımlarının yerini almak üzere, üstün tribolojik özelliklere sahip ekonomik ve üretimi kolay yatak alaşımları üretilmeye çalışılmaktadır.

Yatak uygulamalarında yatak malzemesinin sürtünme katsayısı (μ) ile yatak parametreleri (ZN/P) arasındaki ilişki Stribeck diyagramında verilmiştir. Burada Z yağ viskozitesi, N yatağın dönme hızı, P ise uygulanan basınçtır. Şekil 7'de verilen tipik bir Stribeck eğrisi, sınır yağlama karışık yağlama ve sıvı (hidrodinamik) yağlama olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır. Sınır yağlama durumunda yüzeyde sadece birkaç yağ molekülünü içeren bir yağ filmi oluşmakta ve bu yağ tabakası yüzey pürüzlerini örtmek için yeterli olmamaktadır. Daha çok düşük hız ve yüksek basınçlarda görülen sınır yağlama durumunda ortaya çıkan metal-metal teması sürtünme katsayısının yükselmesine ve buna paralel olarak aşınma hızının artmasına neden olmaktadır.

Hidrodinamik (sıvı) yağlama durumunda, hareketli yüzeyler arasında tamamen bir yağ filmi oluşmakta ve teorik olarak metal-metal teması olmaması nedeni ile, harekete karşı direnç sadece yağlayıcı akışkanın kendi içindeki iç sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Hidrodinamik yağlama bölgesinde sürtünme katsayısının düşük olması nedeni ile aşınma miktarı da düşük olmaktadır. Karışık yağlama, sınır yağlama ve hidrodinamik yağlama arasında bir geçiş bölgesi olup, elastohidrodinamik (EHD) yağlama ve mikro-elastohidrodinamik (μ EHD) yağlama olmak üzere ikiye ayrılır. Bu yağlama durumunda, yük kısmen yağ filmi tarafından ve kısmende

yüzeyler arasında metal-metal teması vasıtası ile taşınmaktadır. Hidrokinamik yağ filminin oluşmadığı zamanlarda meydana gelen sınır ve karışık yağlama, hareketin ilk başlangıç ve durdurulması sırasında da ortaya çıkmaktadır.

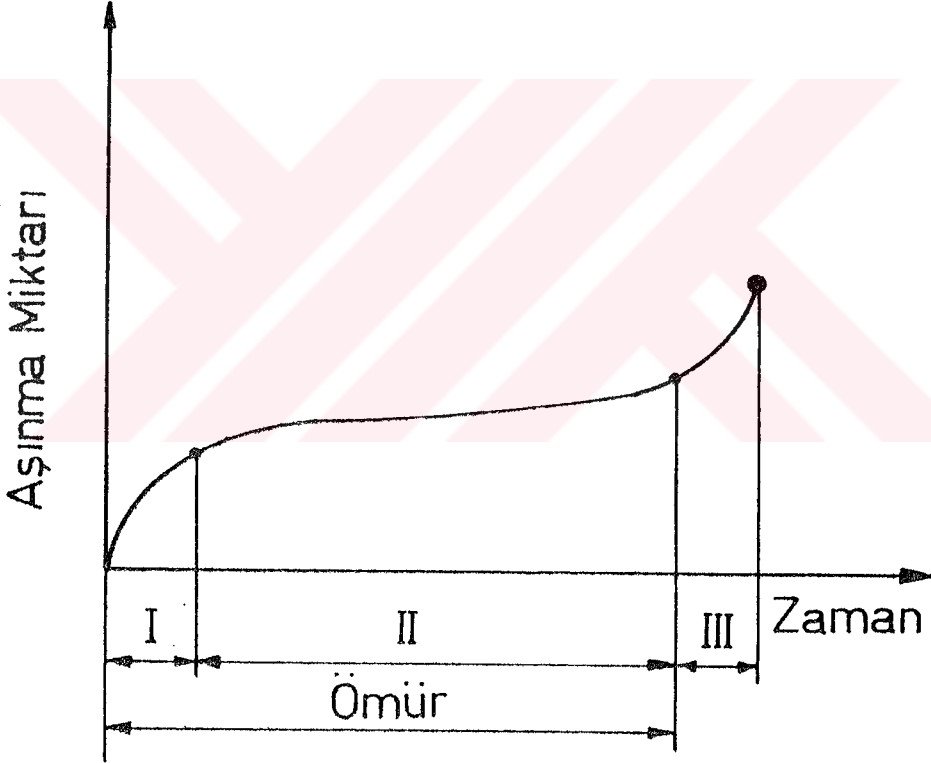


Şekil 7. Stribeck eğrisi

Yatak yüzeyleri, teknik bakımdan en iyi şekilde işlenmiş olsalar bile hiçbir zaman geometrik anlamda pürüzsüz değildirler ve ilk çalışma anında yüzeyler arasındaki sürtünme teması, yüzey pürüzleri nedeni ile ancak birkaç noktada meydana gelmektedir. Bu noktalarındaki basınç değerinin, malzemenin akma sınırının üzerine çıkması durumunda aşınma olarak adlandırılan malzeme kaybı meydana gelmektedir.

Stribeck eğrisi yağlama durumlarında, yatak malzemesinin sürtünme katsayısının, yatak parametresine (ZN/P) göre değişimini göstermektedir. Yatak malzemesinin aşınma davranışı ise aşınma miktarı ile alınan yol, yada çalışma zamanı arasındaki deği-

şimi gösteren eğriler yardımıyla belirlenmektedir. Malzemeler için aşınma miktarı ile alınan yol arasındaki ilişkiyi gösteren teorik aşınma eğrisi Şekil 8'de verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi eğri üç aşınma safhasından oluşmaktadır. Rodaj denilen ilk safhada yüzeyler ilk olarak birlikte çalıştıkları için şiddetli bir aşınma meydana gelir. Bazı durumlarda imalatın bir safhası olarak sayılan bu devre, parçanın daha sonraki aşınma davranışını büyük ölçüde etkiler. Bu nedenle yatak yüzeylerinin düzgün ve pürüzsüz olması rodaj süresindeki aşınmayı önemli ölçüde azaltır.



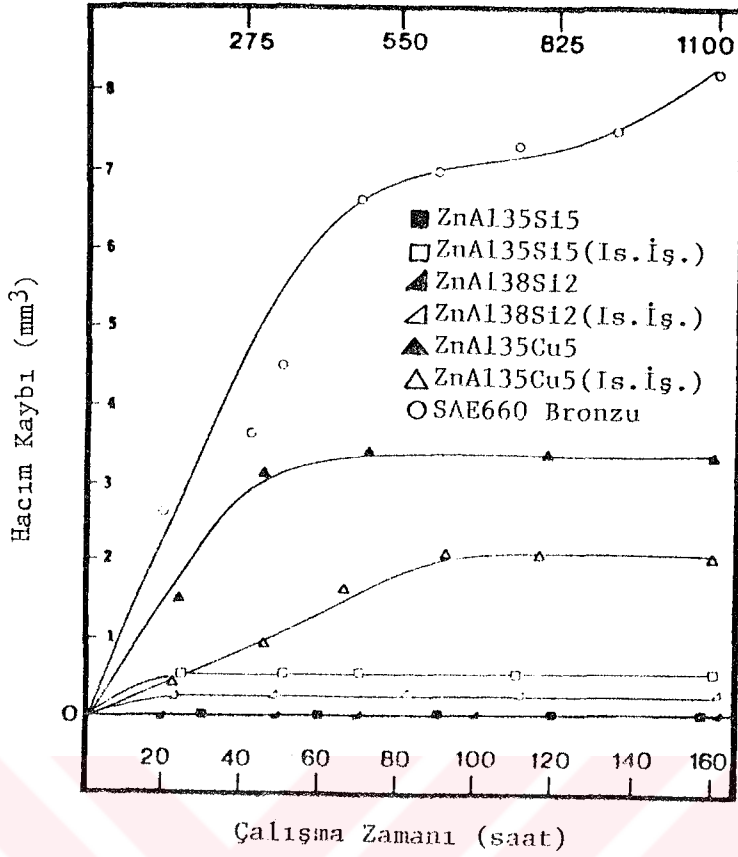
Şekil 8. Tipik bir aşınma eğrisi

Yatağın asıl çalışma ömrünü belirleyen ikinci bölgedeki aşınma hızı ise, rodaj safhasına göre daha düşük olup, sabit bir değere sahiptir. Üçüncü bölgede aşınma hızı aşırı ölçüde artarak yatağın yada milin hasara uğramasına neden olmaktadır. Bu nedenle, üçüncü aşınma bölgesine ulaşılanca yatağın ya değiştiril-

mesi yada bakıma alınması gerekir. Stribeck ve aşınma eğrileri yardımıyla yatağın sağlıklı olarak çalışabileceği çalışma şartları ve aşınma sınırı belirlenebilir.

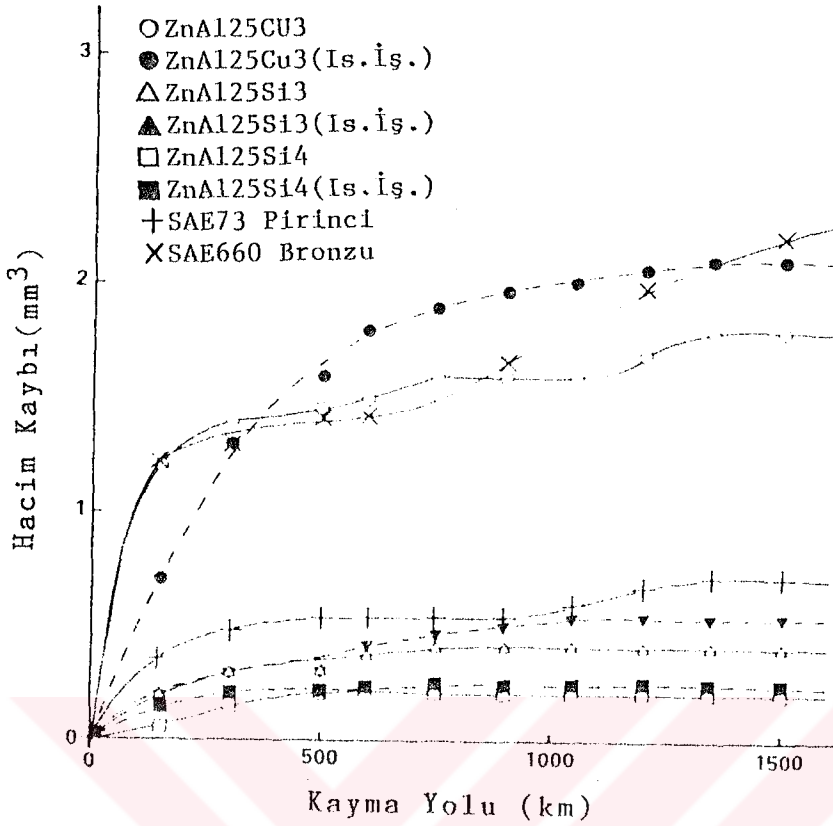
Çinko-alüminyum esaslı yatak alaşımlarının performans ve dizayn parametreleri, gerek laboratuvar deneyleri ve gerekse uygulama sırasında elde edilen verilerden yararlanılarak tayin edilmektedir. Yapılan araştırmalar, sözkonusu alaşımların geleneksel yatak malzemelerine göre daha üstün mekanik ve tribolojik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir (Delneuville ve diğ., 1986, S. 569). Bu alaşımların üstün tribolojik özellikleri, ideal iç yapılarına ve aşınma yüzeylerinde çinko ve alüminyum oksitlerin oluşumuna dayandırılarak açıklanmaktadır (Marczak ve Ciach, 1973, S. 223). Sert alüminyum oksit tabakası yük taşıyıcı olarak görev yaparken, yumuşak olan çinko oksit tabakası ise kaymayı kolaylaştırmakta ve yetersiz yağlama durumunda bir yağlayıcı görevi yapmaktadır. Çinko esaslı alaşımlar yetersiz yağlama, aşırı yükleme gibi çalışma şartlarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Kalay esaslı yatak malzemelerinde sürtünme katsayısı 0,1 değerinde iken, bu değer çinko-alüminyum alaşımlarında 0,03-0,07 arasında yer almaktadır.

Savaşkan ve Murphy tarafından (Savaşkan ve Murphy, 1987, S. 70) yapılan incelemelerde, bakır yada silisyum içeren çinko-alüminyum alaşımlarının pirinç ve bronzdan daha üstün aşınma davranışı sergiledikleri belirlenmiştir. Aşınma dayanımını iyileştirmede, silisyumun bakırdan daha etkili olduğu gözlenmiştir. Bu durum, yumuşak çinko-alüminyum matriksi içerisinde dağılmış yük taşıyan sert silisyum parçacıklarının varlığına dayandırılarak açıklanmıştır (Savaşkan ve diğ., 1987, S. 88). Düşük oranlarda silisyum yada bakır içeren üçlü monotektoid esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun karşılaştırmalı aşınma eğrileri Şekil 9'da verilmiştir. Silisyum içeren alaşımlar gerek dökülmüş ve gerekse ısıtılmış işlem görmüş durumda (350°C 'da çözündürme ve su verme sonrası 175°C sıcaklıkta 6 saat yaşlandırma) en yüksek aşınma direnci sergilemişlerdir. Ayrıca, silisyum fazının dağılım biçiminin de alaşımların aşınma davranışını etkilediği görülmüştür.



Şekil 9. Monotektoid esaslı alaşımların aşınma diyagramı

Ötektoid esaslı üçlü Zn-Al-Cu ve Zn-Al-Si alaşımları, monotektoid alaşımlardan daha düşük aşınma dayanımı sergilemekle birlikte, SAE 73 pirinci ve SAE 660 bronzundan daha yüksek aşınma direncine sahip oldukları gözlenmiştir (Savaşkan ve Murphy, 1986, S. 223). Çinko-alüminyum esaslı ötektoid alaşımlar ile aynı şartlarda denenen pirinç ve bronz aitt aşınma eğrileri (aşınma miktarı-alınanyol) Şekil 10'da verilmiştir. Eğrilerden görüldüğü gibi, en düşük aşınma hızı yada en düşük aşınma miktarı silisyum içeren üçlü alaşımlar ile elde edilmiştir. Bu durum, silisyum içeren üçlü alaşımların, aşınmaya karşı diğer alaşımlardan daha dayanıklı olduğunu göstermektedir. Aynı çalışmada, ayrıca 150°C sıcaklıkta uygulanan 10 günlük yaşlandırma işleminin (stabilizasyon) alaşımların aşınma davranışını olumsuz yön-



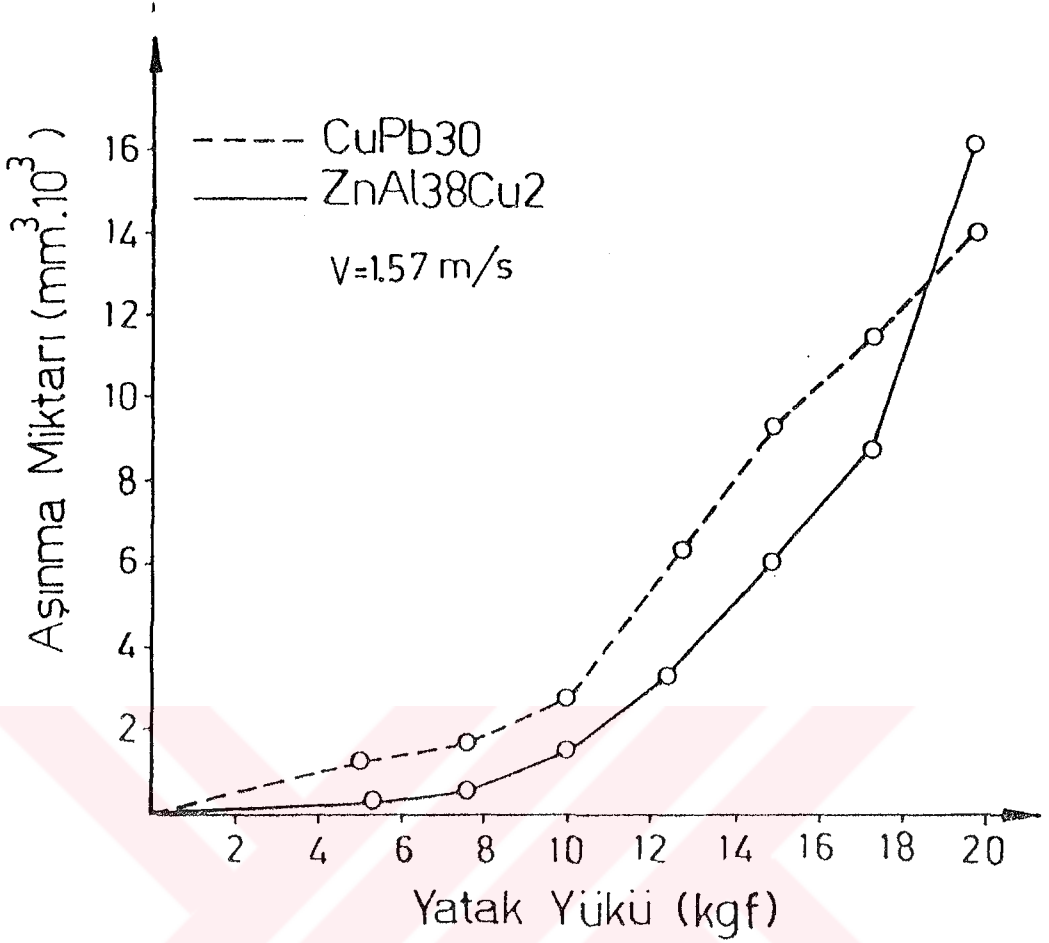
Şekil 10. Ötektoid esaslı üçlü alaşımların aşınma diyagramı de etkilediği gözlenmiştir.

Marczak ve Ciach tarafından (Marczak ve Ciach, 1973, S. 226) yapılan araştırmalar, 175 N'dan daha düşük yüklerde çalışan üçlü ZnAl38Cu2 monotektoid alaşımının, CuPb30 bronzundan daha üstün aşınma davranışı sergilediğini göstermiştir. Söz konusu alaşımlarda meydana gelen aşınma miktarının uygulanan yüke göre değişimini gösteren eğriler Şekil 11'de verilmiştir.

1.5. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Uygulama Alanları

Günümüzde çinko-alüminyum esaslı alaşımlar, genellikle düşük hız ve yüksek yüklü kaymalı yatak uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Söz konusu alaşımlar, yatak uygulamalarından başka pekçok mühendislik alanlarında kullanılmaktadır.

Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar genel olarak, madencilikte kullanılan düşük hızlı araçlara ait kaymalı yataklarda, kab-



Şekil 11. CuPb30 ve ZnAl38Cu2 alaşımlarında meydana gelen aşınmanın uygulanan yüke göre değişimi

lolu kren, iş makineleri, vites kutusu, torna tezgahı, taş kırma makinesi yataklarında, hidrolik kaldırma silindirlerinde, maden direklerinde piston olarak, hidrolik sistemlerde, biyel kollarında, kayıcı pabuçlarda, su pompalarında, matbaa makinelerinde, havalı ve tarımsal makinalarda, tekstil sanayii ve otomobil sanayii gibi birçok mühendislik alanında gittikçe artan oranda kullanılmaktadır. Bu alaşımlar kaymalı yatak uygulamalarında yatağın ana gövdesi olarak imal edilebildikleri gibi, yatak burcu biçiminde de yatak taşıyıcısına soğuk pres geçme ile monte edilebilirler.

Yapılan araştırmalar, uygulamada bronzların yerine kullanılan çinko-alüminyum esaslı alaşımların hem maliyet hemde performans bakımından çok daha üstün olduklarını göstermiştir (Risdon ve Barnhurst, 1987, S. 1404). Lokomotifte kullanılan C93500

bronzundan imal edilen yatak normal olarak 18-24 aylık çalışma zamanı sonunda aşırı aşınma nedeniyle değiştirilirken, bunun yerine kullanılan ZA-12 alaşımından üretilmiş yatakta 20 aylık bir çalışma süresi sonunda önemli bir aşınma izine rastlanmamıştır (Barnhurst ve diğ., 1987, S.1404).

Yapılan inceleme ve araştırmalar, çinko-alüminyum esaslı alaşımlardan üretilen yatakların tasarım ve imalatında aşağıdaki faktörlerin gözönünde bulundurulması gerektiğini göstermiştir:

a) Köşe basıncını önlemek için yatak uzunluğu yatak çapının 1.5 katından fazla olmamalıdır.

b) Cidar kalınlığı mil çapının en az % 5'i kadar olmalıdır.

c) Bronz yataklar için geçerli olan toleranslar, oda sıcaklığında çinko esaslı alaşımlar içinde geçerlidir. Ancak yüksek sıcaklıklarda daha geniş toleransın verilmesi gerekir.

d) Tüm uygulamalar için kayma hızı 7 m/s'nin altında olmalıdır.

e) Çinko-alüminyum esaslı yatak malzemeleri bazı kaymalı yatak malzemelerine göre biraz daha sert olduğundan, mil sertliğinin en az 150 BSD olması gerekir.

f) Korozyon yapıcı sıvılarla temas halinde olan yataklar için pH değeri 6.5-12.5 arasında olmalıdır.

1.6. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Yapılan araştırmalar sonucunda, çinko-alüminyum esaslı alaşımların pekçok bakımından (ekonomik, tribolojik ve mekanik özellikler) geleneksel yatak alaşımlarından daha üstün olduğu görülmüştür. Bu nedenle, bu alaşımların yatak uygulamalarında, geleneksel yatak malzemelerinin yerine başarılı bir şekilde kullanılabilmesi belirlenmiştir. Günümüzde çinko-alüminyum esaslı alaşımların hem maliyet ve hemde performans bakımından birçok uygulamada bronz, pirinç ve dökme demir gibi geleneksel yatak malzemelerinden daha avantajlı olduğu görülmektedir. Çinko-alüminyum esaslı yatak alaşımlarının kullanımını kısıtlayan faktörlerin başında, yüksek sıcaklıklarda mukavemet değerlerinde görü-

len düşme ve özellikle bakır içeren alaşımlarda ortaya çıkan boyutsal kararsızlık gelmektedir. Bu nedenle, söz konusu alaşımların çalışma sıcaklığının 120°C 'ın altında tutulması tavsiye edilmektedir (Gervais ve diğ., 1985, S. 47). Bakır içeren üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarında görülen boyutsal kararsızlık problemi, uygun ısıl işlemlerle giderilebilir. Ancak uygulanan uzun süreli stabilizasyon işlemi söz konusu alaşımların mukavemetini bir miktar düşürmektedir. Son zamanlarda geliştirilen üçlü Zn-Al-Si alaşımlarının, aşınma dayanımı bakımından Zn-Al-Cu alaşımlarından daha üstün olduğu görülmüştür. Ancak silisyum içeren alaşımların mukavemet değerlerinin, bakırlı alaşımlara göre daha düşük olması, araştırmacıları uygun bileşim oranının belirlenmesi çalışmalarına yöneltmiştir.

Bu çalışmanın amacı, çinko-alüminyum esaslı yüksek mukavemet ve aşınma direncine sahip yeni yatak alaşımları geliştirmektir. Bunun için, çinko-alüminyum esaslı bakır ya da silisyum içeren bir dizi ikili, üçlü ve dördümlü alaşımlar üretilecek ve bunların iç yapı ve mekanik özellikleri dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumlarda incelenecektir. Ayrıca, üretilen alaşımların aşınma davranışı, laboratuvarında imal edilen yeni bir aşınma düzeneği yardımıyla incelenerek bulunan sonuçlar değerlendirilecektir. Böylece, kaymalı yatak uygulamaları için en uygun kimyasal bileşim, ısıl işlem ve çalışma şartları belirlenmeye çalışılacaktır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Alaşımların Üretimi, Kimyasal Bileşimlerinin Tayini ve Isıl İşlemler

Bu çalışmada, beş tane ikili çinko-alüminyum, dokuz adet üçlü çinko-alüminyum-bakır, bir adet üçlü çinko-alüminyum-silisyum ve bir adet dördümlü çinko-alüminyum-bakır-silisyum alaşımı, kokil döküm yöntemi ile üretildi. Alaşımların üretiminde yüksek saflıkta çinko (% 99.99) elektrolitik bakır (% 99.99) ve ticari saflıkta alüminyum (% 99.7) kullanıldı. Silisyum içeren üçlü alaşımlar için Etial-140(AlSi12) alaşımı ve bakır içeren üçlü alaşımlar için de intermetalik bakır-alüminyum alaşımı (Al Cu50) kullanıldı. Ergitme işlemi sıcaklık kontrollü elektrikli bir pota fırını içerisinde gerçekleştirildi. Ergitilen alaşımlar, kimyasal bileşim oranına göre 650-700°C sıcaklık aralığında uygun bir döküm sıcaklığından, 250°C'a kadar ısıtılmış kokil bir kalıba dökülerek katılaştırıldı. Kokil kalıp yönlendirilmiş katılaşmayı ve beslemeyi sağlamak için konik bir şekle sahip olup \varnothing 45x60x200 mm. boyutlarında imal edildi. Döküm sonrası dökülen parçanın üst kısmında çekilme boşluğu içeren 50 mm. lik kısım kesilerek atıldı. Üretilen alaşımların kimyasal bileşimlerinin belirlenmesinde gravimetrik ve volümetrik analiz yöntemleri kullanıldı. İkili Zn-Al alaşımlarında çinko, amonyum civa sülfosiyanürle gravimetrik olarak çöktürüldü ve ZnHg (SCN)₄ halinde sabit tartıma getirilerek miktarı hesaplandı. Üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarında bakır, gravimetrik olarak CuS halinde çöktürülüp yakıldıktan sonra HNO₃'de çözüldü ve İyodimetric Titrasyon yöntemiyle miktarı tayin edildi.

Bu çalışmada, dökümle üretilen alaşımlara iki türlü işlem uygulandı. Bunlardan biri kararlı bir iç yapı elde etmek amacıyla aşınma numunelerine uygulanan stabilizasyon işlemi olup, bu işlem, alaşımları 150°C sıcaklıkta 10 günlük bir süre yaşlandırarak gerçekleştirildi. Kademeli olarak yapılan ikinci tür ısıl işlemde, alaşımlar önce 350°C sıcaklıkta 48 saatlik bir süre homojenleştirme işlemine tabi tutuldu. Bu işlemden sonra alaşımların bir kısmı fırında soğutuldu, diğer kısmına ise su verildikten sonra 150°C sıcaklıkta 2 saat'lik bir süre yaşlandırıldı. Isıl işlemler elektrikle çalışan tav fırınlarında \pm 5°C'lik bir hassasiyetle gerçekleştirildi.

2.2. İçyapı İncelemeleri

İçyapı incelemeleri için gerek dökülmüş ve gerekse ısıll işlem görmüş durumdaki alaşımlardan alınan numuneler, standart metalografi yöntemi ile hazırlandıktan sonra % 5'lik Nital (alkol-% 5 nitrik asit) içerisinde dağlandı. Dađlanan numuneler ışık mikroskobunda incelenerek, içyapıyı gösteren fotoğraflar çekildi.

2.3. Mekanik Deneyler

2.3.1. Çekme Deneyi

Üretilen alaşımlardan talaşlı imalat yöntemi ile TS 138-A standardına uygun çekme numuneleri hazırlandı. Çekme deneyleri 13×10^{-2} mm/sn.'lik sabit bir çekme hızında gerçekleştirilerek söz konusu alaşımların çekme dayanımları ve % kopma uzaması değerleri belirlendi.

2.3.2. Sertlik Deneyi

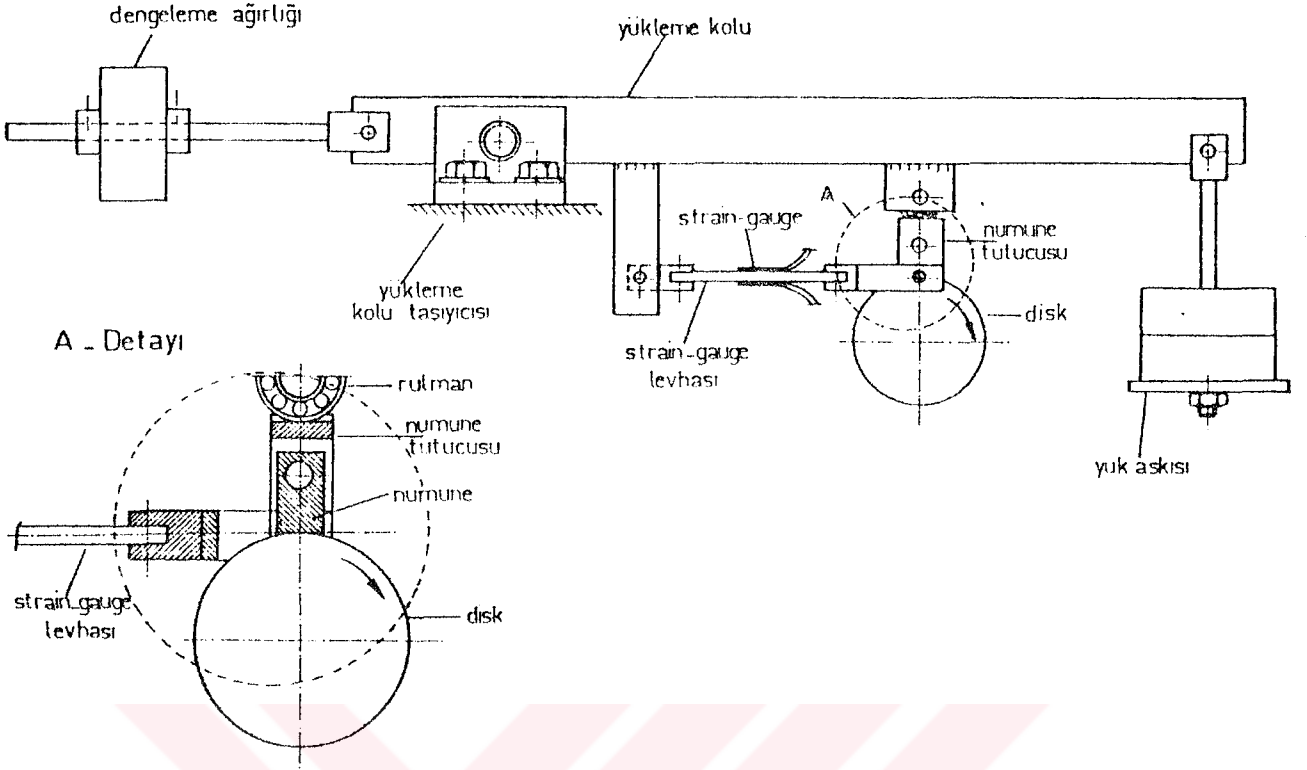
Alaşımlardan alınan numuneler, talaşlı imalat yöntemi ile yüzeyleri paralel olacak şekilde işlendikten sonra parlatıldı. Sertlik ölçümleri Brinell sertlik ölçme yöntemi ile (BSD 5 P=31.25 kg. D=2.5 mm.) gerçekleştirildi. Her numune üzerinde beş sertlik ölçümü yapılarak elde edilen değerlerin ortalaması alındı.

2.4. Yoğunluk Ölçümleri

Alaşımların yoğunluklarını tayin etmek için talaşlı imalat yöntemi ile işlenen numunelerin boyutları bir mikrometre yardımıyla hassas bir şekilde (± 0.01 mm) ölçülerek hacimleri hesaplandı. Numuneler hassas bir terazide (± 0.01 mg.) tartıldıktan sonra alaşımların yoğunlukları belirlendi.

2.5. Aşınma Deney Düzeneginin Konstrüksiyonu ve Özellikleri

Alaşımların aşınma davranışlarının belirlenmesi için laboratuarda pim-disk esaslı (pin-on disc) yeni bir aşınma deney düzeneginin konstrüksiyon ve imalatı gerçekleştirildi. Konstrüksiyon yapısı Şekil 12'de gösterilen aşınma deney düzenegi, 3 kW gücündeki bir elektrik motoru, iki adet rulmanlı yatak, kavramı mil, disk, yükleme kolu, dengeleme ağırlığı ve yağlama sistemi gibi elemanlardan oluşmaktadır.

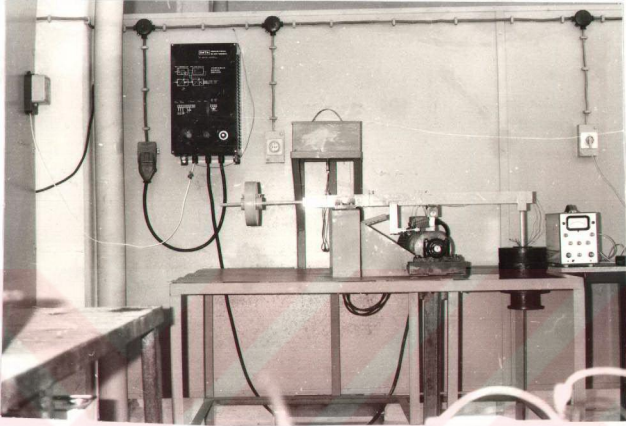


Şekil 12. Aşınma deney düzeneğinin şematik resmi

Düzenekte kullanılan disk, bir kaymalı yatak ünitesinde mi-
li, numune ise yatağı temsil etmektedir. Motorun devir sayısı sis-
teme monte edilen bir hız kontrol ünitesi ile kontrol edilmek-
tedir. Yükleme işlemi, numune tutucusunun bağlı olduğu yükleme
kolunun ucuna ağırlıklar asmak suretiyle gerçekleştirilmektedir. Yükleme
kolu bir perno ile yataklanmış olup üzerindeki dengeleme ağır-
lığı vasıtası ile dengelenmektedir. Şekil 13'teki fotoğrafta a-
şınma deney düzeneğinin genel bir görünümü yer almaktadır.

Sürtünme kuvvetini ölçmek için, numune tutucusu ile sabit
mesned arasına monte edilen, 4X20X90 mm. boyutundaki bir alümin-
yum levhanın alt ve üst yüzeylerine iki adet aktif uzama ölçer (stra-
in-gauge) yerleştirildi. Daha sonra bu aktif strain-gaugeler
diğer iki pasif strain-gauge ile tam köprü yapılarak, gösterici
(algılayıcı) devresine bağlandı. Numunenin disk üzerinde çok
küçük miktardaki ileri-geri hareketine en az dirençle izin ve-
rebilmek için, numune tutucusunun üzerine bilyalı bir rulman
yerleştirildi. Konstrüksiyon sırasında, rulman, numune

ve disk eksenleri çakıştırılarak numune yüzeyinin diske tam teması sağlandı ve temas durumu deney sırasında sürekli olarak korundu.



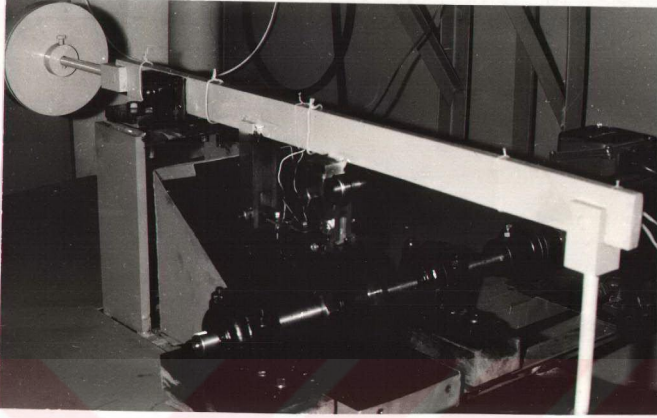
Şekil 13. Aşınma deney düzeneğinin görünümü

SAE 1070 çeliğinden imal edilen 150 mm. çapındaki disk sertleştirme (su verme) işlemi sonrası 150°C 'da 2 saatlik bir süre menevişlenerek 40RSD-C sertlik değeri elde edildi. Bu işlem sonrası $\varnothing 149.6 \pm 0.05$ mm toleransında taçlanan disk yüzeyi daha sonra 600 numaralı zımpara ve $0.5 \mu\text{m}$ alümina ile parlatıldı. Şekil 14'deki fotoğrafta disk ve numunenin yakından görünümü yer almaktadır.

Bütün deneyler 5 MPa'lık basınç altında ve 300 dev/dk.'lık ($V=2.35$ m/s) sabit devir sayısında yapıldı. Yağlama işlemi, $2 \text{ cm}^3/\text{saat}$ 'lik sabit akış hızında gerçekleştirildi. Bunun için, yüksek bir yere yerleştirilen yağ deposundan ince bir hortum yardımıyla alınan yağ, bir debi ayarlayıcısından geçirildikten sonra disk üzerine damlatıldı. Her deney için SAE 20W/50 normuna uygun dört mevsim motor yağı kullanıldı.

2.6. Aşınma Deneyleri

Alaşımlardan $9.7 \times 14.7 \times 32$ mm boyutunda talaşlı imalat yöntemi ile hazırlanan aşınma numunelerinin temas yüzeyi, disk üzerin-



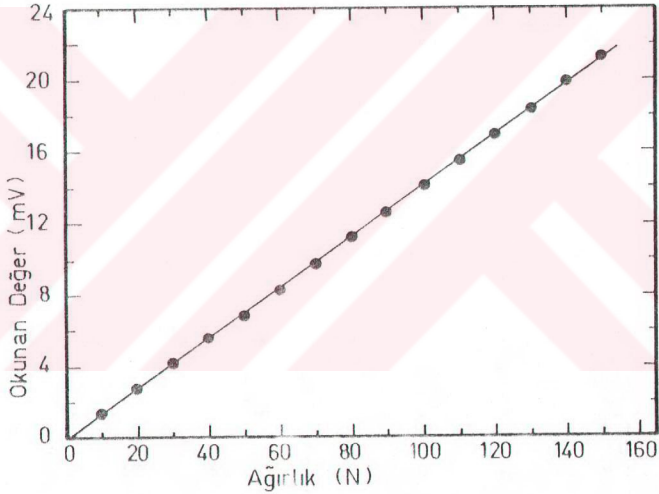
Şekil 14. Aşınma düzeneğine ait disk ve numunenin yakından görünümü

de uyumlu bir şekilde çalışabilmesi için iç çapı 149.6 ± 0.05 mm olan bir kalıpta işlendi ve işlenen yüzey daha sonra 600 numaralı ince zımpara ve $0.5 \mu\text{m}$ 'lik alümina kullanılarak parlatıldı.

Aşınma deneylerine başlamadan önce, numuneler ultrasonik bir temizleyici yardımıyla kimyasal çözücüler (karbontetraklorür, trikloretilen, aseton-alkol) içerisinde temizlendi ve 0.01 mg. hassasiyetindeki bir terazide tartılarak ağırlıkları belirlendi. Numuneler, sonradan deney düzeneğindeki numune tutucusuna yerleştirilerek gerekli deney şartları ayarlandı. Aşınma miktarını belirlemek için 175 km.'lik yola karşılık gelen her 20.45 saatlik çalışma süresi sonunda numune yerinden alınıp, kimyasal çözücüler içerisinde temizlendikten sonra tekrar tartılarak ağırlık kaybı belirlendi. Bu işleme, toplam alınan yol 1050 km.'ye ulaşmaya kadar devam edildi. Yatak uygulamalarında mil ile yatak arasında aşınma sonucu oluşan boşluk, genelde hacim kaybı olarak ifade edildiğinden, ölçülen ağırlık kayıpları alaşımların yoğunluklarına bölünerek, aşınma ile ortaya çıkan hacim kayıpları belirlendi.

Sürtünme kuvvetinin belirlenmesinde uzama ölçerler (strain-

gauge) ile bir uzama algılayıcısı (strain-indicator) kullanıldı. Deneylere başlamadan önce, strain-gauge yerleştirilen ölçme levhasına belirli ağırlıklar asılarak levhanın kuvvet-elastik uzama davranışını gösteren bir kalibrasyon doğrusu elde edildi. Bulunan kalibrasyon doğrusu yardımıyla deney sırasında numune yüzeyi ile disk arasında ortaya çıkan sürtünme kuvveti (F_s) belirlendi ve $\mu = F_s/F_n$ bağıntısından da alaşımların sürtünme katsayıları hesaplandı. Göstericiden okunan sinyal değerinin uygulanan yüke göre değişimini gösteren kalibrasyon doğrusu Şekil 15'de verilmiştir.



Şekil 15. Uzama ölçer (strain-gauge) için kalibrasyon doğrusu

Aşınma deneyi sırasında numunelerin sıcaklığı demir-konstantan'dan yapılan bir termo eleman çifti (termokupl) ile birlikte kullanılan bir sıcaklık göstercisi (sıcaklık-ölçer) yardımıyla ölçüldü. Sıcaklık ölçümleri için, termokupl, numunenin aşınma yüzeyinin 2 mm. yukarısında açılan bir deliğe yerleştirilerek numune sıcaklığının çalışma süresi ile değişimi belirlendi.

3. DENEY SONUÇLARI (BULGULAR)

3.1. Kimyasal Analiz Sonuçları

Alaşımın kimyasal bileşimleri gravimetrik ve volümetrik analiz yöntemleri ile belirlenerek sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir. Analiz sonuçlarının, döküm öncesindeki bileşim oranlarına yakın olduğu görülmüştür.

Tablo 6 Alaşımın Kimyasal Bileşimleri

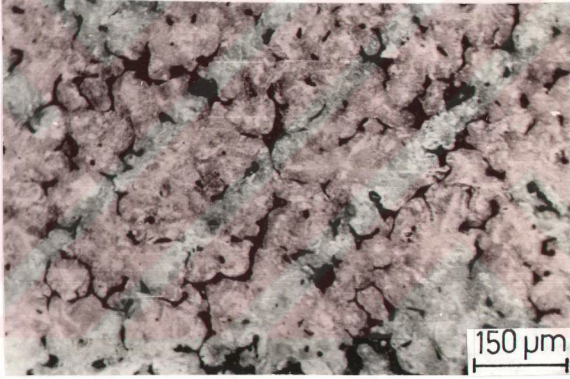
Alaşım No	Kımyasal Bileşim, % Ağırlık			
	Zn	Al	Cu	Si
1	77.4	22.6	--	--
2	59.8	40.2	--	--
3	39.6	60.4	--	--
4	25.1	74.9	--	--
5	15.3	84.7	--	--
6	75.7	21.3	3.0	--
7	37.6	59.2	3.2	--
8	16.7	80.4	2.9	--
9	57.4	41.6	1.0	--
10	57.7	40.2	2.1	--
11	57.1	39.9	3.0	--
12	55.8	40.2	4.0	--
13	69.7	28.4	1.9	--
14	57.1	40.9	2.0	--
15	56.6	41.5	--	1.9
16	55.5	40.7	1.9	1.9

3.2. Alaşımın İyapıları

Çinko-alüminyum esaslı tüm alaşımların iyapıları, gerek dökülmüş ve gerekse ısıtıl işlem görmüş durumda, ışık mikroskobu yardımıyla incelendi. Ancak, bu tezde yalnız aşınma deneyine tabi tutulan alaşımların iyapı görüntülerine yer verildi.

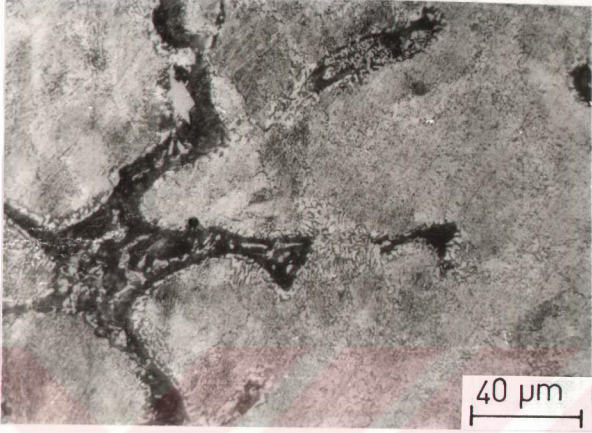
Ötektoid esaslı üçlü ZnAl25Cu2 alaşımı, dökülmüş durumda alü-

minyumca zengin göbekli α dendritleri ile bunların etrafını saran çinkoca zengin η fazı ve kalıntı β fazının dönüşüm ürünlerini içeren bir içyapı sergilemiştir. Aynı yapının dendritleri arasında kalan bölgelerde ayrıca bakırca zengin metastabil ϵ (CuZn_4) fazının yer aldığı gözlenmiştir. Bu içyapının bir görüntüsü Şekil 16'da verilmiştir. Aynı alaşımın göbekli α dendritleri arasında yer alan kalıntı β fazı, stabilizasyon işlemi sırasında çinko ve alüminyumca zengin fazlara (α ve η) dönüşerek daha kaba görünümlü parçacıklar oluşturmuştur. Uygulanan stabilizasyon işlemi sonunda oluşan içyapının bir görüntüsü Şekil 17'de verilmiştir.

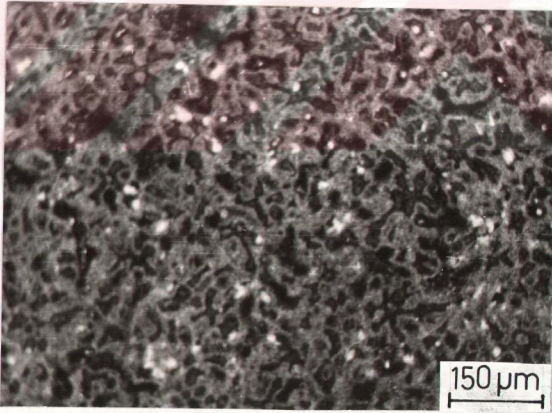


Şekil 16. ZnAl25Cu2 alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı

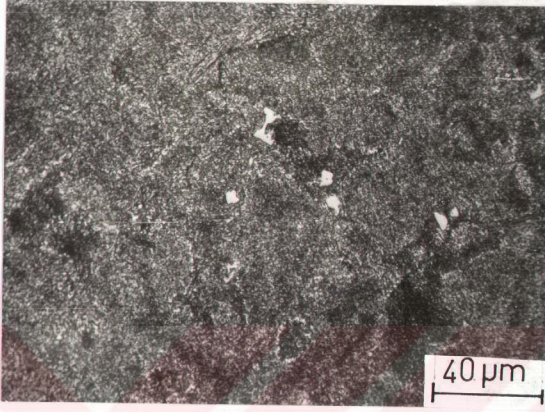
Üçlü monotektoid alaşımın (ZnAl40Cu2) dökülmüş durumdaki içyapısı Şekil 18'de görüldüğü gibi, alüminyumca zengin geniş α dendritleri ile bunları çevreleyen çinkoca zengin η ve ϵ (CuZn_4) fazlarından oluşmaktadır. Bu alaşımın göbekli dendritik yapısı stabilizasyon işlemi sonunda ortadan kalkarak, yerini alüminyumca zengin bir matriks içerisinde homojen olarak dağılmış, küçük boyutlu çinkoca zengin fazlardan oluşan bir içyapı almıştır. Bu yapının bir görüntüsü Şekil 19'da verilmiştir.



Şekil 17. Stabilize edilmiş ZnAl25Cu2 alaşımasının içyapısı



Şekil 18. ZnAl40Cu2 alaşımasının dökülmüş durumdaki içyapısı

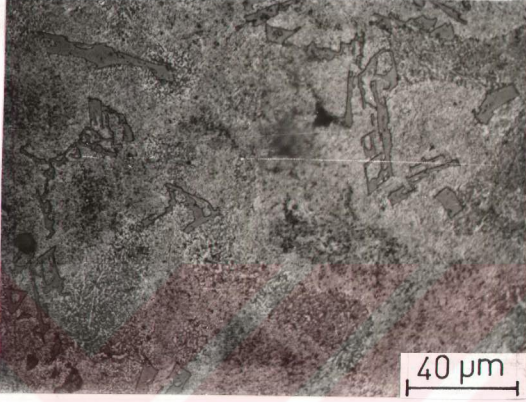


Şekil 19. ZnAl40Cu2 alaşımının stabilize edilmiş durumdaki içyapısı

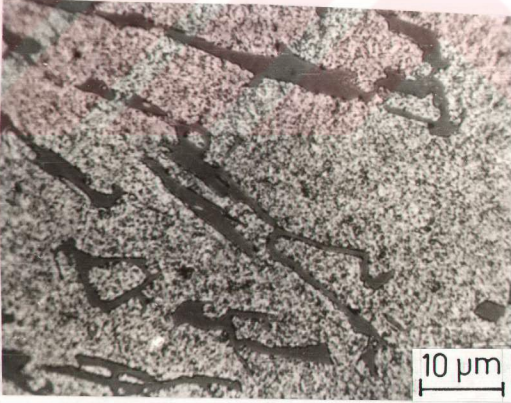
Silisyum içeren monotektoid esaslı üçlü alaşımın ($ZnAl40Si2$) dökülmüş durumdaki, içyapısının alüminyumca zengin göbekli α dendritleriyle, dendritlerarası bölgelerde yer alan çinkoca zengin η fazı ve silisyum parçacıklarından oluştuğu gözlenmiştir. Bu yapının görüntüsü Şekil 20'de verilmiştir. Stabilizasyon işleminin, silisyum parçacıklarının dağılımı ve boyutu üzerinde pek etkili olmadığı ancak, α dendritleri arasındaki bölgelerde β fazının dönüşüm ürünleri olan lamellerden başka, kaba taneler içeren bir yapı oluşturduğu gözlenmiştir. Stabilize edilmiş alaşımın içyapısının bir görüntüsü Şekil 21'de verilmiştir.

Dörtlü $ZnAl40Cu2Si2$ alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı, aynı durumdaki bakır yada silisyum içeren üçlü alaşımların içyapılarına benzemekte, ancak bu alaşımın içyapısında hem silisyum parçacıkları hemde bakırca zengin fazların yer aldığı gözlenmiştir. Bu yapının bir görüntüsü Şekil 22'de verilmiştir. Stabilizasyon işlemi sonunda, α / β tane sınırlarında nisbeten büyük boyutlu dönüşüm ürünlerinin oluştuğu gözlenmiştir. Söz konusu yapı Şekil 23'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi silisyum parça-

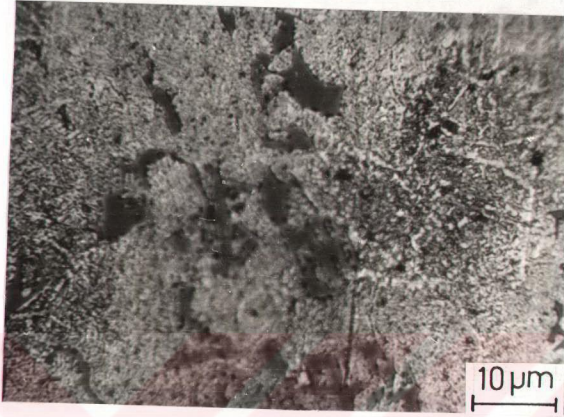
cıkları yapıda hem birincil (primer) hemde ötektik silisyum olarak yer almaktadır.



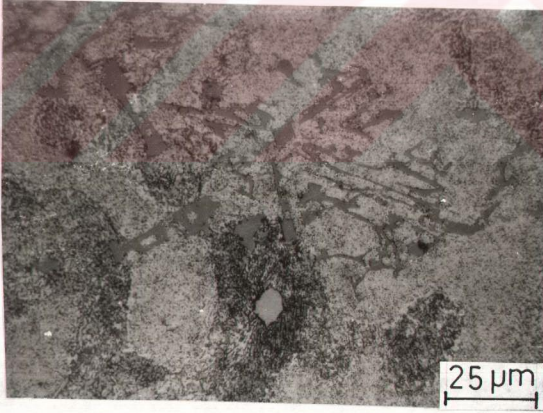
Şekil 20. ZnAl40Si2 alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



Şekil 21. ZnAl40Si2 alaşımının stabilize edilmiş durumdaki içyapısı



Şekil 22. ZnAl40Cu2Si2 alaşımlının dökülmüş durumdaki içyapısı



Şekil 23. ZnAl40Cu2Si2 alaşımlının stabilize edilmiş içyapısı

3.3. Mekanik Deney Sonuçları

Çekme deneyi ve sertlik ölçümleri sonucunda alaşımlardan, değişik durumlarda elde edilen mukavemet, kopma uzaması ve sertlik değerleri Tablo 7'de verilmiştir. Aynı tabloda ayrıca alaşımların ölçülen yoğunluk değerleri de yer almaktadır.

Bu tablodan, bakır içeren üçlü ve dörtlü alaşımların çekme dayanımı ve sertliklerinin, ikili alaşımlardan elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu görülmektedir. İkili alaşımlar ise aynı oranda çinko ve alüminyum içeren üçlü alaşımlardan daha fazla % uzama miktarı göstermiştir. 350°C sıcaklıktaki çözündürme işlemini izleyen fırında soğutma işlemi sonunda, alaşımların çekme mukavemeti ve sertlik değerlerinin bir hayli düştüğü gözlenmiştir. Nitekim dökülmüş durumdaki alaşımlar fırında soğutulan alaşımlardan daha yüksek mukavemet değerleri sergilemiştir. Su verme işlemi sonrası 150°C sıcaklıkta uygulanan 2 saat süreli yaşlandırma işlemi ise alaşımların çekme dayanımı ve sertlik değerlerini önemli ölçüde arttırmıştır.

İkili alaşımların, dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumlardaki çekme dayanımının ve sertlik değerlerinin, içerdikleri alüminyum oranına göre değişimini gösteren eğriler belirlenerek sırası ile Şekil 24, 25 ve 26'da verilmiştir. Eğrilerden görüldüğü gibi, alaşımların çekme dayanımı ve sertliği artan alüminyum oranı ile artarak, % 50-60 Al oranları arasında en yüksek değerlere ulaşmakta ve bu oranların üzerindeki bileşimlerde ise azalmaktadır.

Yaklaşık % 3 oranında bakır içeren üçlü alaşımların dökülmüş ve ısıl işlem görmüş (fırında soğutulmuş ve yapay yaşlandırılmış) durumlardaki çekme dayanımı ve sertlik değerlerinin alüminyum oranına göre değişimini gösteren eğriler sırası ile Şekil 27, 28 ve 29'da verilmiştir. Eğrilerden görüldüğü gibi, üçlü alaşımların çekme dayanımı ve sertlikleri artan alüminyum oranı ile artarak % 40 Al oranında en yüksek değerlere ulaşmakta ve bu oranın üzerindeki bileşimlerde ise tekrar azalmaktadır.

Bu çalışmada, ayrıca değişik oranlardaki bakır katkılarının monotektoid bileşimdeki ikili alaşımların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri belirlendi. Bulunan sonuçlardan yararlanarak

Tablo 7 Mekanik Deney Sonuçları

Alaşım No	İşlem Durumu	Yoğunluk (gr/ cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Sertlik (BSD-5)	% Kopma Uzaması
1	A	5.21	232	77	2.6
	B	5.22	163	59	1.5
	C	5.18	135	44	8.6
2	A	4.20	252	96	1.0
	B	4.20	190	80	1.2
	C	4.19	291	128	0.6
3	A	3.56	255	94	1.4
	B	3.55	238	101	1.2
	C	3.51	287	142	1.2
4	A	3.16	290	105	3.0
	B	3.16	249	98	3.2
	C	3.16	275	106	2.2
5	A	2.95	217	95	4.0
	B	2.95	218	72	9.0
	C	2.95	216	55	6.6
6	A	5.29	269	102	0.2
	B	5.27	252	102	0.2
	C	5.28	306	109	1.0
7	A	3.59	272	111	1.4
	B	3.60	263	102	1.2
	C	3.58	320	158	0.1
8	A	3.05	212	88	1.5
	B	3.03	209	94	1.2
	C	3.02	235	79	1.6
9	A	4.19	289	98	1.9
	C	4.18	306	134	0.8
10	A	4.15	344	114	4.1
	C	4.12	376	146	0.8
11	A	4.20	325	113	0.6
	C	4.19	392	146	0.9
12	A	4.27	306	108	1.2
	C	4.23	416	152	0.8
13	A	4.98	273	106	1.0
	D	4.95	251	85	1.6
14	A	4.28	354	112	3.0
	D	4.23	290	80	4.5
15	A	4.11	258	90	2.0
	D	4.09	168	59	2.9
16	A	4.10	307	112	1.5
	D	4.08	279	82	2.6

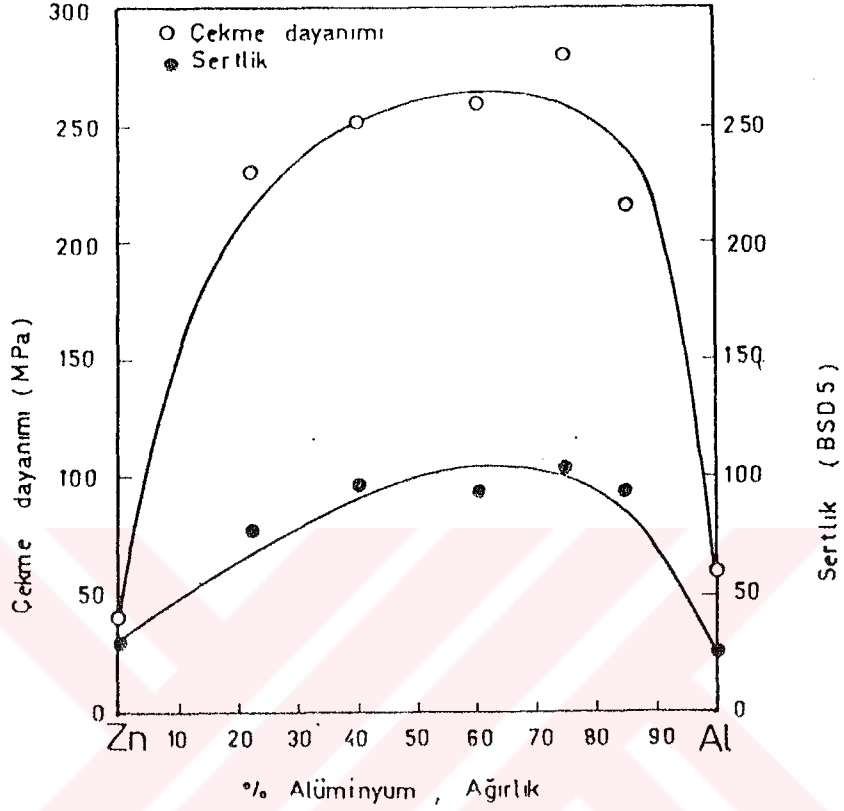
Not: Buradaki harfler uygulanan ısıl işlemi göstermektedir.

A: Dökülmüş

B: Çözündürme işlemi sonrası fırında soğutulmuş

C: Su verme işlemi sonrası yapay yaşlandırılmış

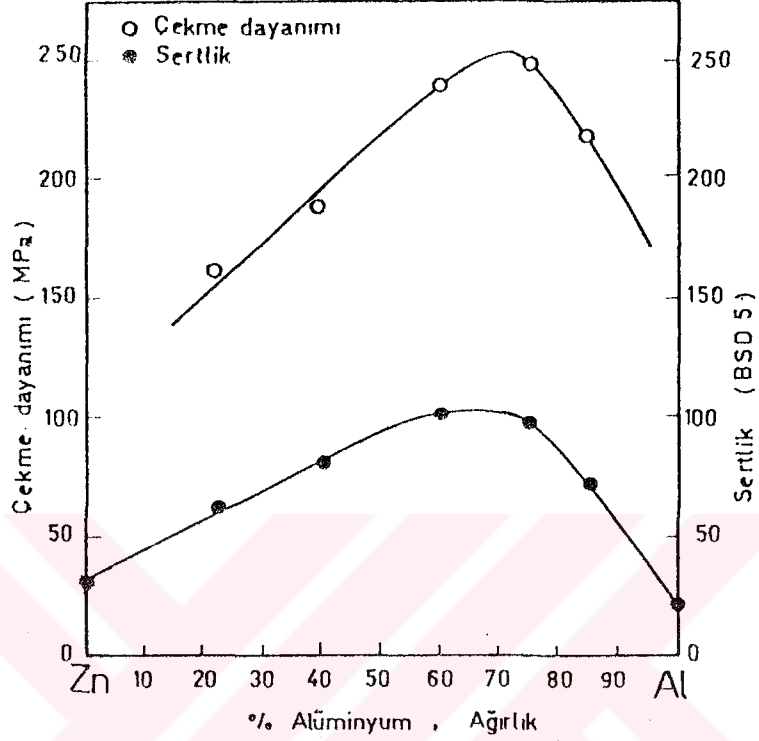
D: Stabilize edilmiş.



Şekil 24. Dökülmüş durumdaki ikili Zn-Al alaşımlarının çekme mukavemeti ve sertliğinin içerdikleri alüminyum oranına göre değişimi

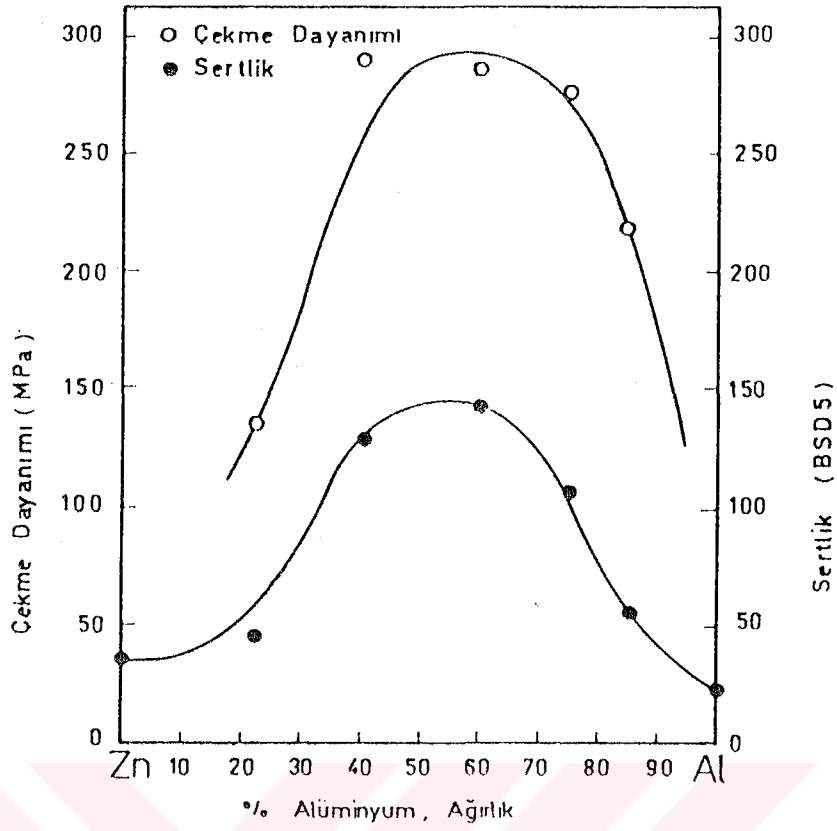
alaşımların çekme dayanımı ve sertlik değerlerinin, bakır oranına göre değişimini gösteren eğriler elde edildi. Şekil 30 ve 31' de verilen bu eğrilerden görüldüğü gibi, üçlü alaşımların mukavemeti, dökülmüş durumda, artan bakır katkısı ile artarak % 2 Cu oranında en yüksek değerlere ulaşmakta ve bu oranın üzerindeki bileşimlerde ise tekrar düşmektedir. Yaşlandırılmış durumda ise bu alaşımların çekme dayanımı ve sertlikleri artan bakır oranı ile sürekli artmaktadır. Ancak, mukavemet ve sertlik değerlerinde görülen bu artış miktarı, bakır oranı arttıkça azalmaktadır.

Bakır içeren üçlü ZnAl40Cu2 alaşımına % 2 oranında silisyum katıldığında, mukavemet değerinde bir miktar düşme görülmüş-

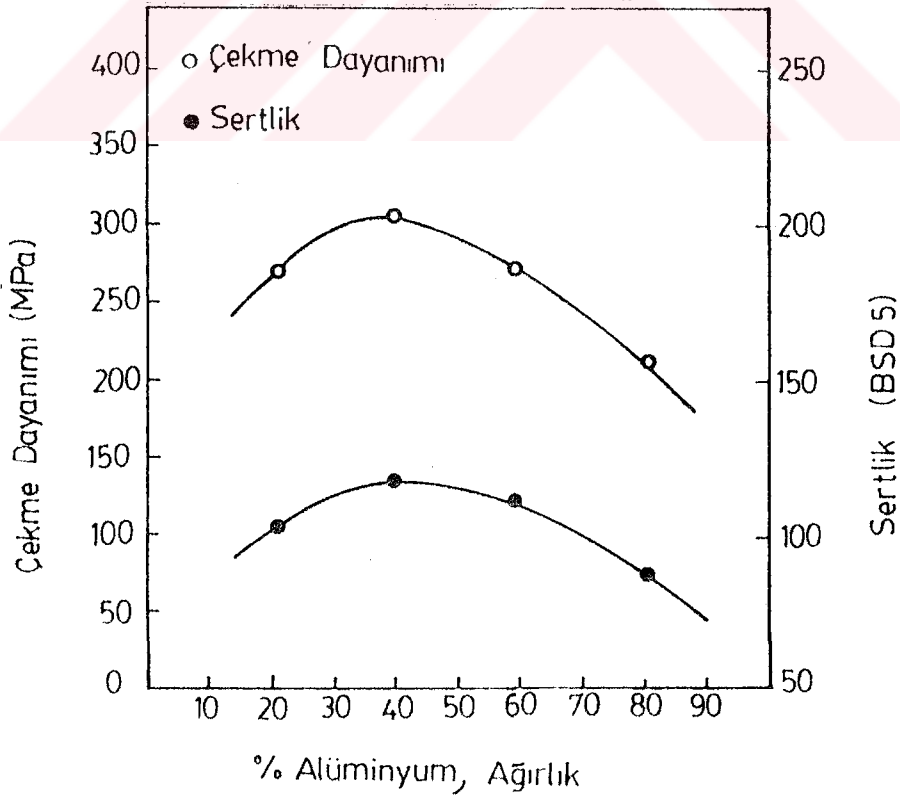


Şekil 25. Fırında soğutulan ikili alaşımların çekme mukavemeti ve sertliğinin alüminyum oranına göre değişimi

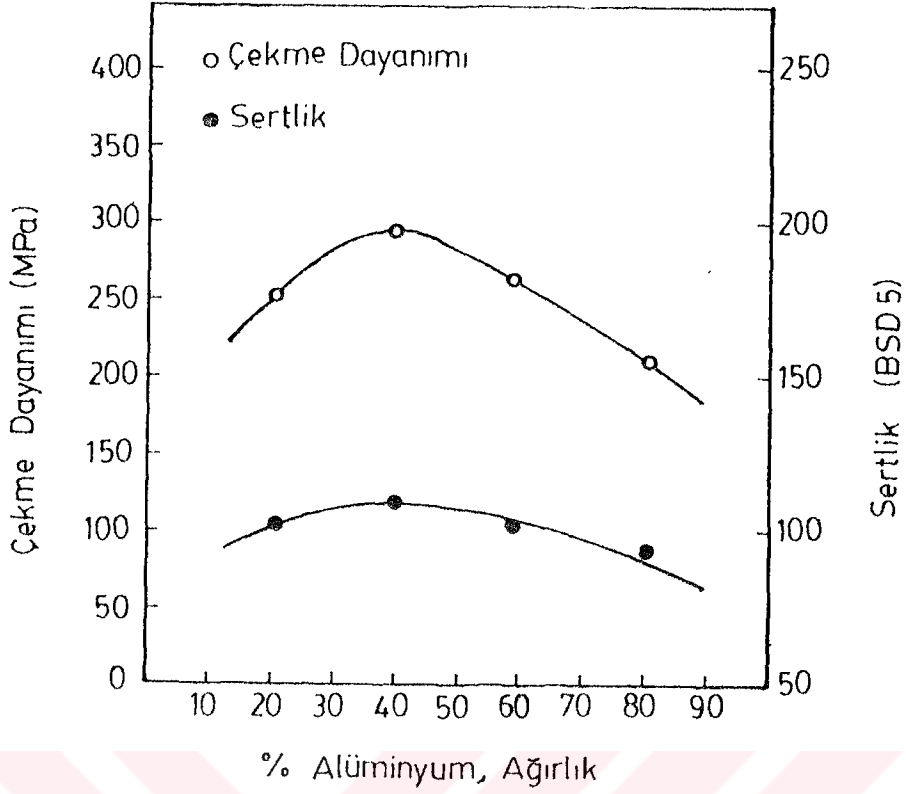
tür. Ancak, bakır ve silisyum içeren dördü ZnAl₄0Cu₂Si₂ alaşımı, hem yalnız silisyum içeren ZnAl₄0Si₂ alaşımından, hem de bakır içeren ötektoid esaslı üçlü alaşımlardan daha yüksek mukavemet değeri göstermiştir.



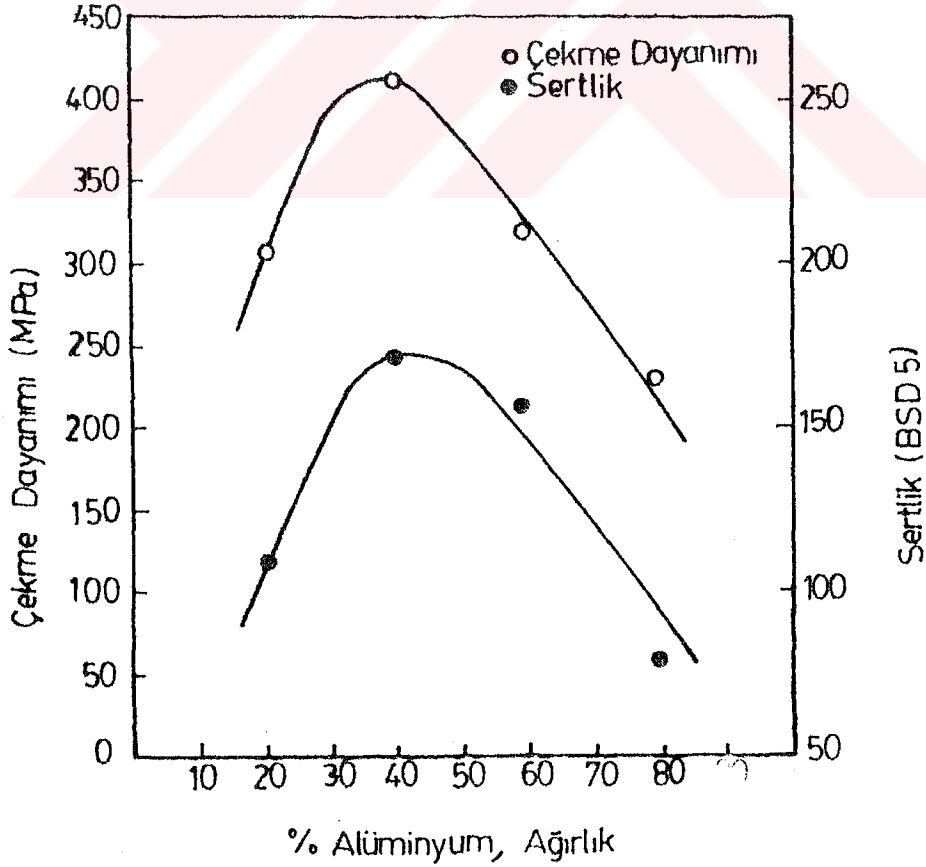
Şekil 26. Su verme işlemi sonrası yapay olarak yaşlandırılan ikili Zn-Al Alaşımlarının mukavemet değerlerinin alüminyum oranı ile değişimi



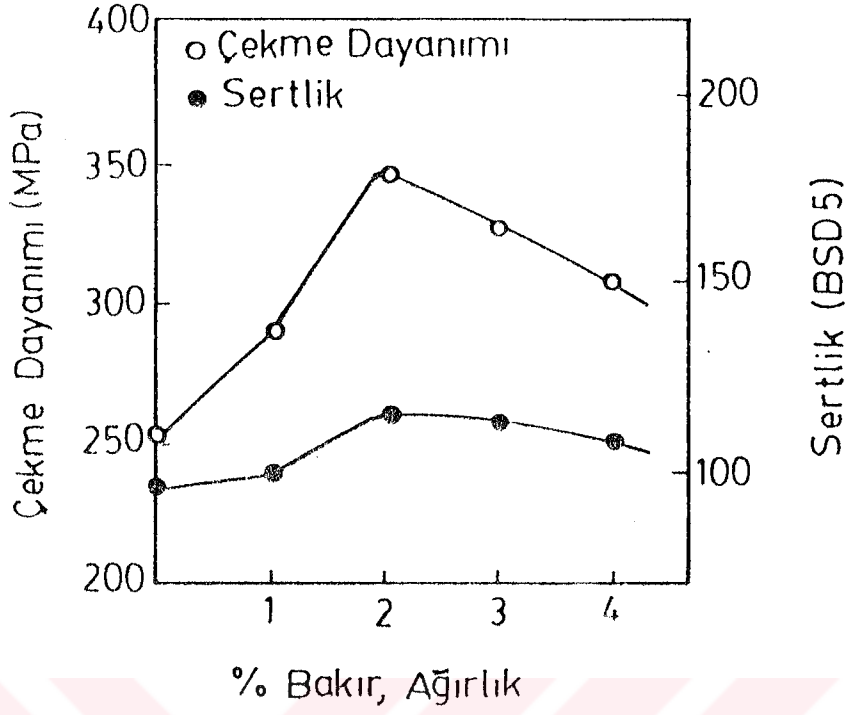
Şekil 27. Dökülmüş durumdaki üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarının çekme mukavemeti ve sertliğinin alüminyum oranına göre değişimi



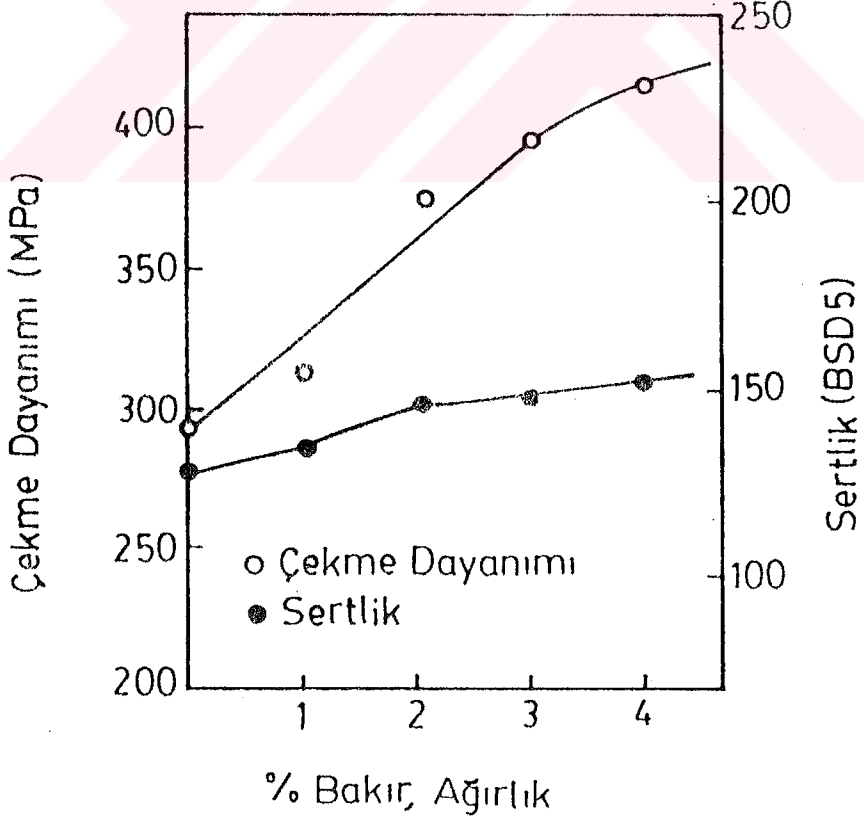
Şekil 28. Fırında soğutulan üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarının çekme mukavemeti ve sertliğinin alüminyum oranı ile değişimi.



Şekil 29. Su verme işlemi sonrası yapay olarak yaşlandırılan üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarının çekme mukavemeti ve sertliğinin alüminyum oranına göre değişimi.



Şekil 30. Bakır katkısının dökülmüş durumdaki monotektoid alaşımların mukavemetine etkisi.

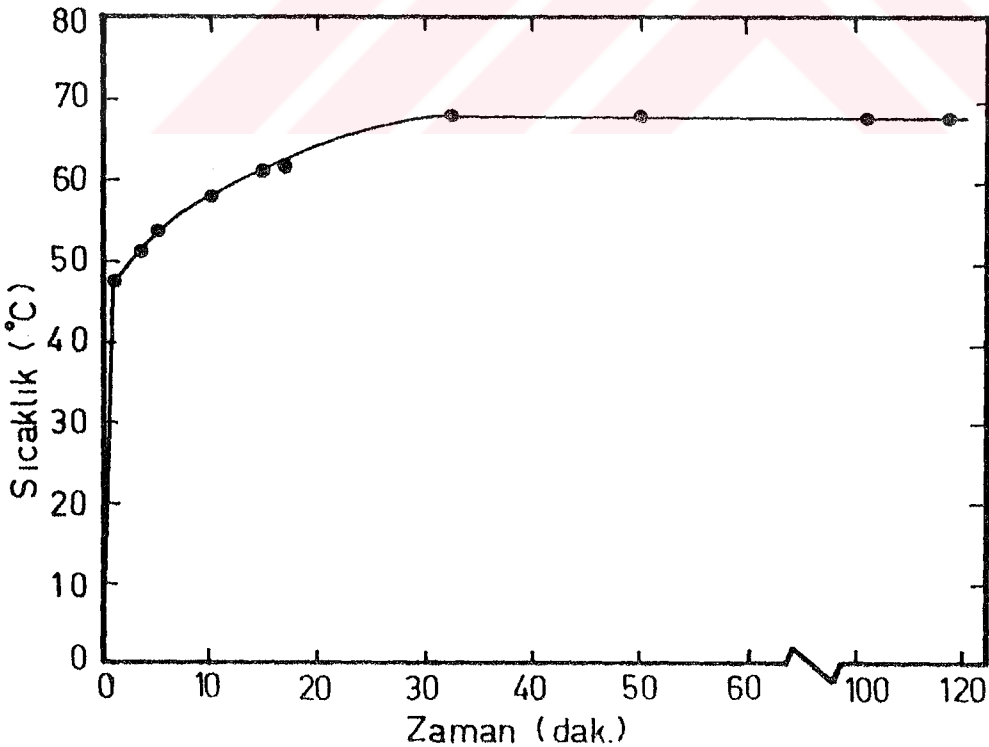


Şekil 31. Su verme işlemi sonrası yaşlandırılmış monotektoid alaşımların mukavemetinin bakır oranı ile değişimi.

3.4. Aşınma Deneyi Sonuçları

Çalışmaya başlama anından itibaren aşınma numunelerinin sıcaklığı değişik zamanlarda ölçülerek, Şekil 32'de verilen tipik bir sıcaklık-zaman eğrisi elde edilmiştir. Bu eğriden görüldüğü gibi aşınma numunesinin sıcaklığı, çalışmanın özellikle ilk 1 dakikalık başlangıç döneminde büyük bir hızla yükselmekte, ancak ilerleyen zaman içerisinde sıcaklık artış hızı azalarak, yarım saatlik çalışma süresi sonunda sabit bir değere ulaşmaktadır. Rejim durumundaki sıcaklık değerinin, bütün alaşımlar için 68°C civarında olduğu belirlenmiştir.

Aşınma deneyleri, üçlü $\text{ZnAl}_{25}\text{Cu}_2$, $\text{ZnAl}_{40}\text{Cu}_2$, $\text{ZnAl}_{40}\text{Si}_2$ ve dördümlü $\text{ZnAl}_{40}\text{Cu}_2\text{Si}_2$ alaşımları ile DIN-1705 (CuSn_{12}) normuna uygun ticari bronzdan alınan numuneler ile gerçekleştirildi. Deney sırasında, önceden belirlenen yola karşılık gelen süreler sonunda aşınma numuneleri tartılarak aşınma ile meydana gelen ağırlık kayıpları belirlendi. Bulunan sonuçlar



Şekil 32. Aşınma numunelerinin sıcaklık-zaman eğrisi

Tablo 8 Aşınma Deneyi Sonuçları

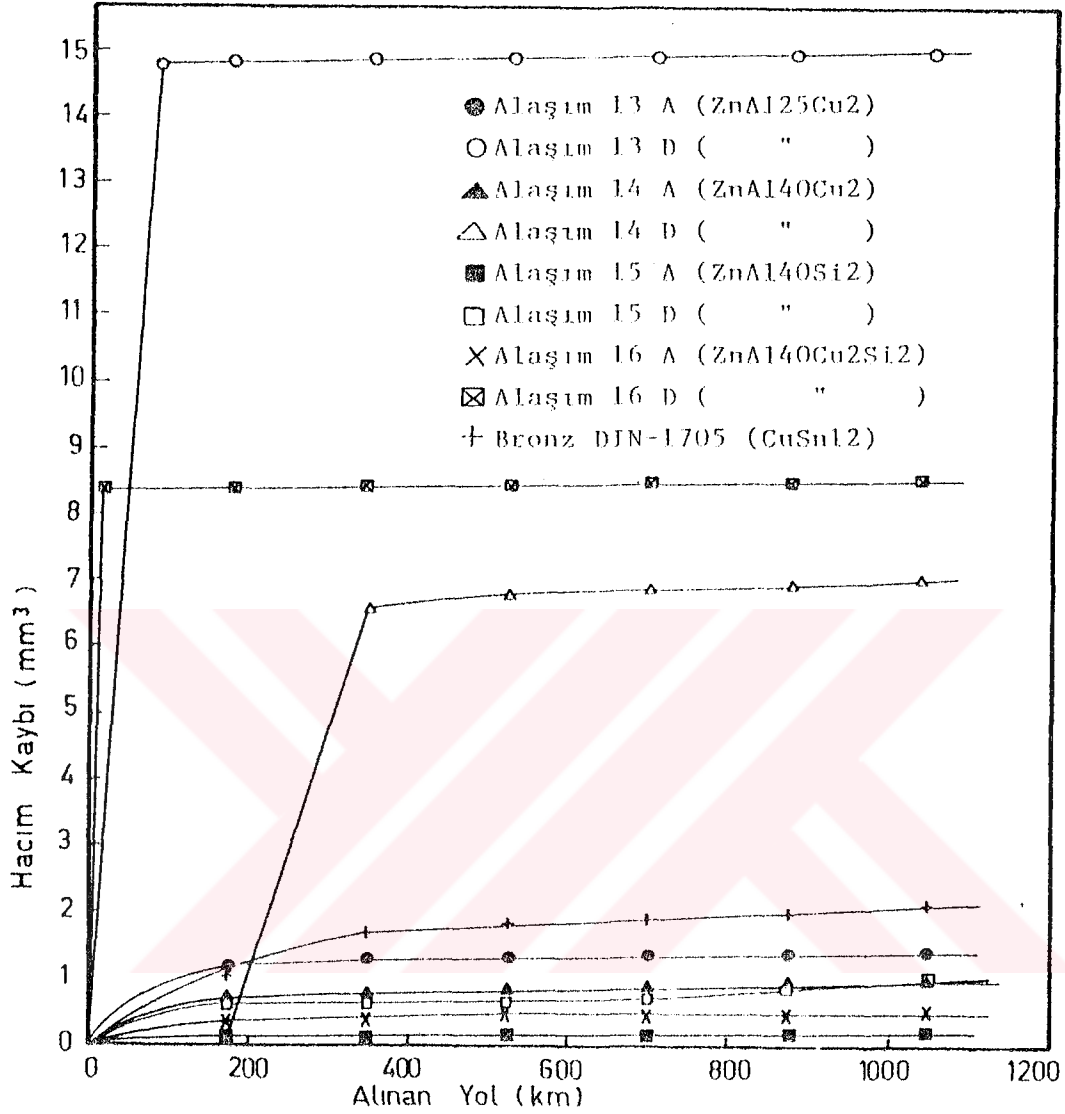
Alaşım No	Alınan Yol'a (km) karşılık gelen ağırlık kaybı (mg)							Sürtünme Kat.
	17	175	350	525	700	875	1050	
13A	--	5.8	6.4	6.7	6.8	7.0	7.2	0.024
13D	0.6	73.9	74.0	74.1	74.3	74.4	74.5	0.030
14A	--	3.2	3.5	3.7	3.9	4.0	4.1	0.025
14D	0.3	0.4	28.1	29.1	29.3	29.6	29.9	0.029
15A	--	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.019
15D	2.2	2.6	2.7	2.8	3.0	3.7	4.1	0.025
16A	--	1.5	1.7	1.9	2.0	2.0	2.1	0.019
16D	23.9	24.0	24.1	24.3	24.4	24.5	24.6	0.026
Bronz	--	9.5	14.6	16.0	17.0	17.7	18.3	0.030

A: Dökülmüş

D: 150°C sıcaklıkta 10 gün stabilize edilmiş

Tablo 8'de verilmiştir. Kaymalı yatakların ömrü mil ile yatak arasında meydana gelen boşluk miktarı ile belirlendiğinden, hacim kaybı ağırlık kaybından daha önemli bir aşınma parametresi sayılmaktadır. Bu nedenle, ölçülen ağırlık kayıpları alaşımların yoğunluklarına bölünerek aşınma ile ortaya çıkan hacim kayıpları belirlendi. Alaşımlar için belirlenen hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimini gösteren eğriler Şekil 33'de verilmiştir.

Şekildeki eğrilerden görüldüğü gibi, alaşımların çoğu rodaj olarak adlandırılan ilk aşınma devresinde yüksek bir aşınma hızı sergilemekte ve bunu, hızı çok daha düşük olan kararlı bir aşınma devresi izlemektedir.



Şekil 33. İncelenen alaşımların aşınma dayanımını gösteren eğriler

Dökülmüş durumdaki alaşımlar stabilize edilmiş alaşımlardan daha üstün aşınma davranışı sergilediler. Dökülmüş durumdaki alaşımlar içerisinde en yüksek aşınmayı DIN-1705 (Cu Sn12) bronzu göstermiştir. Bunu sırası ile ZnAl25Cu2 ve Zn Al40Cu2 alaşımları izlemektedir. Bu çalışmada en düşük aşınma miktarı, yada en yüksek aşınma direnci, dökülmüş durumdaki üçlü ZnAl40Si2 alaşımı ile elde edilmiştir.

Stabilizasyon işleminin sonrası alaşımların aşınma dirençlerinin azaldığı görüldü. Stabilize edilmiş alaşımlar içerisinde en düşük aşınma miktarı üçlü $ZnAl40Si2$ alaşımı ile en yüksek aşınma miktarı ise $ZnAl25Cu2$ alaşımı ile elde edilmiştir. Stabilize edilmiş üçlü $ZnAl140Cu2$ alaşımı, diğer tüm alaşımlardan daha farklı bir aşınma davranışı sergilemiştir. Şöyleki, rodaj devresinde çok az bir aşınma gösteren bir alaşımın aşınma miktarı, 175 ile 350 km'ler arasında hızlı bir şekilde artarak yüksek bir değere ulaşmıştır.

Alaşımların kararlı aşınma durumunda ölçülen sürtünme katsayıları Tablo 8'de verilmiştir. Rodaj devresinde süratli değişen sürtünme katsayısı değerleri, algılayıcı sistemin yetersizliği nedeniyle ölçülememiştir. Bunun için strain-gauge'lerden alınan sinyalin sürekli olarak kaydedilmesi gerekir.

Alaşımlar içerisinde en düşük sürtünme katsayısı üçlü $ZnAl40Si2$ ve dördümlü $ZnAl40CuSi2$ alaşımlarından elde edilmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı ise DIN-1705 ($CuSn12$) bronzu ile bakır içeren alaşımlardan elde edilmiştir. Stabilizasyon işleminin alaşımların sürtünme katsayısını arttırdığı görülmüştür. Stabilizasyon işlemi sonrası en yüksek sürtünme katsayısı değerini üçlü $ZnAl25Cu2$ alaşımı, en düşük sürtünme katsayısı değerini ise üçlü $ZnAl40Si2$ alaşımı göstermiştir.

4. İRDELEME

Malzemelerin mekanik özellikleri, kimyasal bileşimleri ile içyapılarına bağlıdır. İçyapı, kimyasal bileşim oranından başka, uygulanan ısıtma işlemi göre de değişir. Monotektoid bileşimdeki çinko esaslı bütün alaşımlar (% 30-50 Al) gerek dökülmüş ve gerekse ısıtma işlemi görmüş durumlarda, ötektoid alaşımlardan (% 20-30 Al) daha yüksek mukavemet ve sertlik değerleri sergilediler.

Mekanik deney sonuçlarından, ikili alaşımların çekme dayanımları ile sertliklerinin artan alüminyum oranı ile artarak % 50-60 Al oranları arasında maksimum değerlere ulaştığı ve bu oranın üzerindeki bileşimlerde ise düştüğü görüldü. İkili ötektoid alaşım, en yüksek mukavemet ve sertlik değerlerini dökülmüş durumda sergiledi. Fırında soğutma işlemi sonrası, bu alaşımın mukavemet ve sertlik değerlerinin azaldığı görüldü. Ancak, bu alaşımda en düşük mukavemet ve sertlik değerleri yaşlandırılmış durumda elde edildi. Bu durum, yaşlandırılmış ötektoid alaşımın süperplastik özelliğinden kaynaklanmaktadır. Nitekim, su verme işlemi sonrası yapay olarak yaşlandırılan, ötektoid bileşimdeki çinko-alüminyum alaşımlarının, çok ince taneli içyapıya sahip olmaları nedeni ile süperplastik davranış gösterdikleri bilinmektedir (Hutchison ve diğ., 1969, S. 1/6). İkili monotektoid alaşımlarda (% 50-70 Al) ise, en yüksek mukavemet ve sertlik değerleri yapay yaşlandırma işlemi sonrası elde edildi. Bu durum büyük ölçüde, yaşlandırma sırasında α / α' katı eriyiği içerisinde çökelen küçük boyutlu çinkoca zengin parçacıkların yoğunluğunun artmasından kaynaklanmaktadır.

Düşük oranlardaki bakır katkıları, bütün çinko-alüminyum alaşımlarının mukavemet ve sertliklerini önemli ölçüde arttırmaktadır. Bakır katkısı ayrıca, ikili alaşımlarda elde edilen çekme mukavemeti ve sertlik değerlerine ait tepe noktalarını sola doğru kaydırarak % 40Al oranına düşürmektedir. Bu durum, üçlü sistemdeki $\alpha + \beta$ karışmazlık bölgesinin ikili sis-

teme göre daha düşük alüminyum tarafına kaymasından kaynaklanmaktadır. Bakır içeren alaşımlarda, su verme sonrası yapay yaşlandırma sırasında çökelen çinko ve bakırca zengin küçük boyutlu çökelti mukavemet değerlerini arttırmaktadır. Özellikle monotektoid alaşımlarda görülen bu durum, yaşlandırma sırasında oluşan çökelti i n alaşım i çerisinde yerel distorsiyon ve iç gerilmeler oluşturarak dislokasyon hareketini engellemesinden kaynaklanmaktadır.

Düşük oranlardaki bakır katkılarının ikili monotektoid alaşımların çekme dayanımı ve sertliklerini gerek dökülmüş ve gerekse ısıl işlem görmüş durumlarda büyük ölçüde arttırdığı görülmüştür. Ancak, belirli bir oranın üzerindeki bakır katkıları ise özellikle dökülmüş durumdaki alaşımların mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir. Bu sonuçlar ayrıca, düşük oranlarda bakır içeren monotektoid esaslı üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarının mukavemet bakımından düşük karbonlu çeliklerle karşılaştırılabilir durumda olduklarını göstermektedir. Nitekim, 12 numaralı alaşımdan (ZnAl40Cu4) yaşlandırılmış durumda elde edilen 410 MPa'lık çekme dayanımı değeri, Fe-42 çeliğinin çekme dayanımına (412 MPa) yaklaşık olarak eşittir.

Aşınma deneyleri, dökülmüş durumdaki çinko-alüminyum esaslı alaşımların DIN-1705 (CuSn12) bronzundan daha üstün aşınma davranışı sergilediklerini göstermiştir. Gerek dökülmüş ve gerekse ısıl işlem görmüş alaşımlar içerisinde, en yüksek aşınma direnci silisyum içeren monotektoid esaslı ZnAl40Si2 alaşımı ile elde edilmiştir. Silisyum içeren alaşımların üstün aşınma davranışı, bu alaşımların içyapısında bulunan yük taşıyıcı sert silisyum parçacıklarına ve bu parçacıkların dağılım biçimine dayandırılarak açıklanmaktadır (Savaşkan ve Murphy, 1987, s.88).

İncelenen tüm Zn-Al esaslı alaşımlar stabilizasyon işlemi sonrası, yüksek bir aşınma hızı sergilemişlerdir. Başka bir deyişle uygulanan stabilizasyon işlemi, alaşımların aşınma davranışını olumsuz yönde etkilemiştir. Bu durum daha çok stabilizasyon işlemi sonunda, içyapı matriksinin (ana kütle) yu-

muşamasından kaynaklanmış olabilir. Stabilize edilmiş alaşımlar özellikle rodaj devresinde yüksek bir aşınma hızı göstermişlerdir. Rodaj döneminde, numune yüzeyinde yeterli yağ filmi oluşmadığı gözönüne alınırsa, bu devredeki aşınma davranışının daha çok sertlik ve mukavemet gibi malzeme özelliklerine bağlı olduğu görülür. Gözlenen bu durum, film kalınlığının yetersiz olması durumunda sertlik azaldıkça aşınma miktarının arttığını göstermektedir. Buradan, sertliğin özellikle yetersiz yağlanma durumunda malzemelerin aşınma davranışı üzerinde daha etkili olduğu ortaya çıkmaktadır.

Silisyum içeren alaşımlar, daha düşük mukavemet ve sertliğe sahip olmalarına rağmen, bütün alaşımlardan daha üstün aşınma davranışı gösterirler. Bu durum ise, malzemelerin aşınma davranışlarının her zaman sertliğe bağlı olmadığını göstermektedir. Buradan, mukavemet ve sertlik değerlerinin alaşımların yağlanmış durumdaki aşınma davranışını değerlendirmede yeterli bir ölçü olmadığı ortaya çıkmaktadır. Malzemelerde aşınma davranışı, mekanik özelliklerin yanında içyapı ve aşınma yüzeyinde oluşan film tabakası ile de yakından ilgilidir. Genellikle yatak alaşımlarının içyapısı sertlikleri farklı olan değişik fazlardan oluşmaktadır. Böylelikle, sert faz yük taşıma görevi yaparken, yumuşak faz kaymayı kolaylaştırmaktadır. Çinko-alüminyum esaslı alaşımların üstün aşınma davranışı, bu alaşımların sahip olduğu uygun içyapıdan başka, aşınma yüzeylerinde oluşan çinko ve alüminyum oksitlerine dayandırılarak açıklanmaktadır (Marczak ve Ciach, 1973, S.223/227). Sert alüminyum oksit tabakası uygulanan yükü taşıırken, daha yumuşak olan çinko oksit filmi ise kaymayı kolaylaştırmaktadır.

Yapılan incelemeler, uygulanan stabilizasyon işleminin çinko-alüminyum esaslı alaşımların mekanik özelliklerini ve aşınma davranışlarını olumsuz yönde etkilediğini göstermiştir. Ancak, silisyum içeren alaşımlar üzerinde yapılan araştırmalar (Savaşkan ve Murpy, 1987, S.88) bu alaşımların aynı sıcaklıkta iki saat gibi kısa bir süre sonunda kararlı duruma getirilebileceğini göstermiştir. Buradan, silisyum içeren alaşımlara u-

zun süreli(10 gün) stabilizasyon işlemi yerine, daha kısa süreli stabilizasyon işlemi uygulanabileceği görülmektedir. Böylece, stabilizasyon süresinin kısaltılarak, bu alaşımların daha üstün mekanik ve aşınma davranışı göstermeleri sağlanabilir. Diğer taraftan kısa süreli stabilizasyon işlemi, ekonomik bakımdan avantajlı olmakla birlikte, malzemenin ve aşınma özelliklerinin korunması açısından yararlı olabilir. Bu çalışmada ise, alaşımların mekanik ve aşınma davranışlarını aynı şartlar altında karşılaştırmalı olarak incelemek amacıyla bütün alaşımlara aynı ısı işlem uygulanmıştır.

Kararlı bir içyapı elde etmek amacıyla uygulanan stabilizasyon işlemi özellikle bakır içeren alaşımların sertliğini azaltarak, aşınma dayanımının düşmesine neden olmuştur. Ancak, yatak alaşımlarının kararlı bir içyapıya sahip olması gerektiğinden stabilizasyon işleminin aşınma davranışı üzerindeki bu olumsuz etkisi kaçınılmaz bir durum gibi gözükmektedir. Ancak gözlenen bu olumsuz etki, belki daha uygun bir kimyasal bileşim seçerek ya da stabilizasyon işleminin süresini kısaltarak azaltılabilir. Bu nedenle, bu konu daha ayrıntılı bir çalışmada ele alınacaktır.

Alaşımların kararlı aşınma bölgesinde ölçülen sürtünme katsayısı değerlerinin 0.019-0.030 arasında değiştiği gözlenmiştir. Ölçülen bu değerler, önceki araştırmacılar tarafından (Barnhurst ve diğ., 1987, S. 1402) 6.9 MPa'lık basınç altında ve 0.15 m/s`lik çalışma hızında ZA-27 alaşımından rodaj devresinde elde edilen değerlerden(0.03-0.07) daha düşüktür.

Bu çalışmada, alaşımların rodaj devresindeki sürtünme katsayıları ölçülemediği görülmüştür. Ancak, alaşımların aşınma miktarı ile kararlı aşınma safhasında ölçülen sürtünme katsayıları arasında yakın bir ilişki gözlenmiştir. Şöyleki, sürtünme katsayısı yüksek olan alaşımlar, yüksek miktarda aşınma göstermiştir. Nitekim, en yüksek aşınma miktarı, sürtünme katsayısı en yüksek olan ($\mu=0.30$) DIN- 1705(CuSn12) bronzundan elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük aşınma miktarı ise, sürtünme katsayısı değeri en düşük olan ($\mu=0.019$) silisyum içeren ala-

şımdan (16 A) elde edilmiştir. Stabilizasyon işlemi sonrası bütün alaşımların sürtünme katsayılarında artış gözlenmiş ve buna paralel olarak da aşınma miktarları artmıştır. Nitekim, stabilize edilmiş alaşımlar içerisinde en yüksek aşınma, sürtünme katsayısı en yüksek olan ($\mu = 0.030$) $ZnAl_{25}Cu_2$ alaşımında ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmada, en üstün mekanik özellikler bakır içeren monotektoid esaslı üçlü alaşımlardan, en üstün aşınma davranışı ise silisyum içeren üçlü alaşımlardan elde edilmiştir. Başka bir deyişle, bakır katkısı alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirirken, silisyum katkısı aşınma dayanımlarını büyük ölçüde arttırmıştır. Buradan, alaşımların hem mukavemet ve hem de aşınma direncini yükseltmek bakımından, bakır ve silisyumun çok uygun alaşım elementleri olduğu görülmektedir. Nitekim, hem bakır ve hem de silisyum içeren $ZnAl_{40}Cu_2Si_2$ alaşımı, yalnız bakır içeren monotektoid esaslı üçlü $ZnAl_{40}Cu_2$ alaşımına göre daha düşük, ancak yalnız silisyum içeren üçlü $ZnAl_{40}Si_2$ alaşımından daha yüksek mukavemet değeri sergilemiştir. Söz konusu dörtlü alaşım ($ZnAl_{40}Cu_2Si_2$), yalnız bakır içeren $ZnAl_{40}Cu_2$ alaşımından daha üstün, ancak yalnız silisyum içeren üçlü alaşımdan ($ZnAl_{40}Si_2$) daha düşük aşınma dayanımı göstermiştir. Dörtlü alaşımın gerek mekanik özelliklerinin, gerekse aşınma davranışının içyapıya dayandırılarak açıklanması gerekir. Ancak bu çalışmada, söz konusu alaşımın içyapısı, araştırma imkanlarının kısıtlı olması nedeniyle ayrıntılı olarak incelenememiştir. Ayrıca Zn-Al-Cu-Si alaşım sisteminin faz diyagramı henüz belirlenmemiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, dörtlü Zn-Al-Cu-Si alaşımlarının hem mukavemet ve hem de aşınma dayanımını daha da arttırmak için kimyasal bileşimlerinin özellikle bakır ve silisyum oranlarının iyi seçilmesi gerektiğini göstermektedir.

SONUÇLAR

1) İkili çinko-alüminyum alaşımlarının mukavemet ve sertlikleri artan alüminyum oranı ile artarak yaklaşık % 60 Al oranında en yüksek değerlere ulaşmakta ve bu oranın üzerindeki bileşimlerde ise tekrar azalmaktadır.

2) Düşük oranlardaki bakır katkıları, ikili çinko-alüminyum alaşımlarının çekme mukavemeti ile sertlik değerlerini büyük ölçüde arttırmaktadır. Ancak, belirli bir oranın üzerindeki bakır katkıları bu alaşımların mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir.

3) Düşük oranlarda bakır içeren üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarında, en yüksek çekme dayanımı ve sertlik değerleri, yaklaşık % 40 Al oranında elde edilmektedir.

4) Monotektoid bileşimdeki Zn-Al esaslı alaşımların çekme mukavemeti ve sertliği uygun ısıl işlemlerle arttırılabilir. Ötektoid bileşimdeki alaşımların mukavemet ve sertliği ise ısıl işlem sonrası azalmaktadır.

5) Bakır yada silisyum içeren üçlü ve dördü Zn-Al esaslı alaşımlar aşınma davranışı bakımından, genelde geleneksel bir yatak malzemesi olan DIN-1705 (CuSn12) bronzundan daha üstündür.

6) Kararlı bir içyapı elde etmek amacıyla uygulanan stabilizasyon işlemi, alaşımların mekanik özelliklerinden başka, aşınma davranışını da olumsuz yönde etkilemektedir.

7) Silisyum katkısı çinko-alüminyum esaslı alaşımların aşınma dayanımını bakırdan daha fazla arttırmaktadır. Nitekim, silisyum içeren monotektoid esaslı üçlü ve dördü alaşımlar, bakır içeren Zn-Al esaslı alaşımlardan ve DIN-1705 (CuSn12) bronzundan daha üstün aşınma davranışı sergilerler.

8) Dördü ZnAl40Cu2Si2 alaşımı, mukavemet yönünden üçlü ZnAl40Si2 alaşımından, aşınma dayanımı bakımından ise, bakır içeren monotektoid ve ötektoid esaslı üçlü alaşımlardan daha üstündür.

9) Çinko-alüminyum alaşımlarında, sertlik ve mukavemet de-

gerleri aşınma dayanımının belirlenmesinde her zaman yeterli bir ölçü değildir. Ancak, yetersiz yağlama durumunda sertlik aşınma davranışı üzerinde daha etkili olmaktadır.



KAYNAKLAR

- Savaşkan, T., ve Murphy, S., "Mechanical Properties and Lubricated Wear of Zn-25Al-Based Alloys" *Wear*, 116(1987)211-224.
- Lee, P.P., Savaşkan, T., ve Laufer, E., "Wear, Resistance and Microstructure of Zn-Al-Si and Zn-Al-Cu Alloys" *Wear*, 117 (1987)79-89.
- Murphy, S., ve Savaşkan, T., "Comparative Wear Behaviour of Zn-Al-Based Alloys in an Automotive Engine Application" *Wear*, 98(1984)151-161.
- Murphy, S., ve Savaşkan, T., "Practical Metallography" *Prakt. Met.*24(1987) 204-221.
- Savaşkan, T., ve Murphy, S., "Creep Behaviour of Zn-Al-Cu Bearing Alloys" *Z. Metallkde.* Bd.74(1983) 76-82.
- Zhu, Y.H., Savaşkan, T., ve Murphy, S., "Phase Transformations in Quench-Aged Zn-Al-Si Alloys" *Materials Research Society Synop. Proc.*, Vol. 21, Elsevier, New York, (1984) 835-840.
- Savaşkan T., ve Murphy, S., "Zn-Al Esaslı Yatak Alaşımlarındaki Faz Dönüşümleri" 4. Ulusal Metalurji Kongresi Bildiriler Kitabı, Cilt 1, Ankara, Ekim 1986, 532-555.
- Gervais, E., "ZA Alloys-A Challenge to the Metals Industry" *CIM Bulletin*, April 1987, Vol. 80, No. 900, 67-72.
- Gervais, E., Barnhurst, R.J., ve Loong, C.A., "An Analysis of Selected Properties of ZA Alloys" *Journal of Metals*, Vol. 37, No.11, November 1985, 43-47.
- Gervais, E., ve Loong, C.A., "New ZA Alloys in Die Casting" 11 th International Pressure Die Casting Conference, Lyon, France, 19-22 June 1984, 1-25
- Risdon, T.J., Barnhurst, R.J., ve Mihaichuk, W.M., "Comparative Wear Rate Evaluation of Zinc Aluminum (ZA) and Bronze Alloys Through Block on Ring Testing and Field Applications" *Society of Automotive Engineers, Inc.* 1987, No.860064, 1400-1405.

- Skenazi, A.F., Pelerin, J., Coutsouradis, D., Magnus, B., ve Meeus, M., "Some Recent Developments in the Improvement of the Mechanical Properties of Zinc Foundry Alloys" Metall, 37, Jahrgang, Heft 9, September, 1983, 898-902.
- Lamberigts, M., Walmag, G., Coutsouradis, D., Delneuville, P., ve Meeus, M., "Friction and Ductility Behaviors of a High Strength Zinc Foundry Alloy" AFS Transactions.
- Marczak, R.J., ve Ciach, R., "Tribological Properties of the Concentrated Al-Zn Alloys" Prac. 1st Europ. Tribology Congress (1973) Inst. Mech. Eng. London, 223-227.
- Altorfer, K.J., "Zinc Alloys Compete with Bronze in Bearings and Bushings" Metal Progress-November 1982, 29-31.
- Ling, F.F., "Position Paper on Tribology" Journal of Tribology, January 1984, Vol. 106/25.
- Pinkus, C., ve Wilcock, D.F., "Strategy for Energy Conservation through Tribology" ASME, New York, 1977.
- Anderson, E.A., ve Werley, G.L., "A New Zinc Alloy for Gravity Casting" ILZRO Research Summary, Project ZM-5, July 1962.
- Presnyakov, A.A., Gorban, YU.A., ve Chernyakova, V.V., Russ. J. Phys. Chem. 35(6) (1961) 632/633.
- Murphy, S., "Solid-Phase Reactions in Low-Copper Part of the Al-Zn-Cu System", Z.Metallkd., 71(1980) 96-102.
- Goldak, G.R., ve Parr, J.G., J.Inst. Metals 92(1964) 230.
- Lohberg, K., Z.Metallkd., 74(1983) 456-457.
- Galayag, Tong., ve Ferres, Dean., "High-Performance, High-Aluminum Zinc Alloys for Low-Speed Bearings and Bushings" SAE paper 8200643.
- Zhu, Y.H., PhD. Thesis "Phase Relationships in Zn-Al Based Alloys" University of Aston in Birmingham, May 1983.
- Carpenter, G.J.C., ve Garwood, R.D., Met. Sci.J.1, (1967)202.
- Krol, J., ve Tosior, K.W., Arctiwan Hutnictwa XVI, 2(1971) 199-218.
- Koster, P., Z.F. Metallk., 8-9, (1941), p.289.
- ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division I-Pressure Vessels, 1977 Edition and Addenda (1979).
- Hutchison, M.M., ve Ball, A., "Superplasticity in the Aluminum-Zinc Eutectoid", Metal Scie. J., 3(1969) 1-6.

ÖZGEÇMİŞ

1965 yılında Trabzon'da doğdu. İlk ve Ortaokulu aynı ilde tamamladıktan sonra Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümünü birincilikle bitirdi. 1982 yılında kontenjandan girdiği K.T.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Bölümünde yüksek öğrenimine başladı. Dört yıllık lisans öğrenimini başarıyla tamamlayarak 1986 yılında bu bölümden Makina Mühendisi ünvanı ile mezun oldu. Aynı yıl K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında master öğrenimine başladı. Halen yüksek lisans öğrenimine devam etmekte olup K.T.Ü. Makina Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

T. C.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi