KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AL-Sİ-XTİ ALAŞIMLARININ DÖKÜMÜ VE MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS

Metalurji Müh. Erdem KARAKULAK

Anabilim Dalı: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Danısman: Doç. Dr. Muzaffer ZEREN

KOCAELİ, 2007

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AL-Si-XTi ALAŞIMLARININ DÖKÜMÜ VE MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji Müh. Erdem KARAKULAK

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 04 Haziran 2007
Tezin Savunulduğu Tarih: 23 Temmuz 2007

Tez Danışmanı	Üye	Üye
Doç. Dr. Muzzaffer ZEREN	Prof. Dr. Şadi KARAGÖZ	Doç. Dr. Ahmet KARAASLAN
(.....)	(.....)	(.....)

KOCAELİ, 2007

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Ülkemizde ve dünyada en çok kullanılan demir dışı metal olan alüminyumun özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılan bu çalışmada alüminyum içerisine titanyum ilavesi yapılıp farklı sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların bazıları oldukça tatmin ediciyken bazı sonuçlar malzeme üzerinde daha fazla çalışmanın gerektirdiğini vurgulamaktadır. Dünya çapında henüz çok yeni bir alaşım olan Al-Si-Ti üçlü alaşımı ile ilgili daha geniş çalışmalar yapılmalıdır.

Bu tez çalışması sırasında beni yönlendirip çalışmamın her aşamasında yardımını esirgemeyen hocam Sn. Doç. Dr. Muzaffer ZEREN' e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca başta Bölüm Başkanı Sn. Prof. Dr. Şadi KARAGÖZ olmak üzere tüm KOU Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü çalışanlarına yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni destekleyip bugünlere gelmemi sağlayan annem Mine KARAKULAK, babam Ekrem KARAKULAK' a ve desteğini sürekli yanımda hissettiğim eşim Fatma KARAKULAK' a teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER DİZİNİ viii
AL-Sİ-XTİ ALAŞIMLARININ DÖKÜMÜ VE MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONU ix
CASTING AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF AL-SI-XTI ALLOYS x
1.GİRİŞ 1
2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ 3
2.1. Element Olarak Alüminyumun Özellikleri 3
2.2. Endüstriyel Metal Olarak Alüminyum 3
2.3. Alüminyum Metalinin Üretimi 5
2.4. Alüminyum Alaşımları 6
2.5. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması 7
2.5.1. Hadde alaşımlarının sınıflandırılması 7
2.5.2. Döküm alaşımlarının sınıflandırılması 10
2.6. Alüminyuma İlave Edilen Alaşım Elementlerinin Etkileri 11
3. AL-Sİ ALAŞIMLARI 14
3.1. Tarihsel Perspektif 14
3.2. Genel Özellikler 15
3.3. Alüminyum-Silisyum Faz Diyagramı ve Dengeli Soğuma 17
3.3.1. α-Al katı çözeltisi'nin özellikleri 18
3.3.2. Silisyum kristallerinin özellikleri 18
3.3.3. Farklı silisyum içeriklerinin etkisi 19
3.3.3.1. % 0'dan 0,01'e silisyum içeriği 19
3.3.3.2. % 0,01'den 1,65'e silisyum içeriği 20
3.3.3.3. %1,65'in üzerindeki silisyum içeriği 20
3.4. Al-Si Modifikasyonu 20
3.4.1. Al-Si ötektiğinin mikroyapısı 20
4. AL-Sİ-Tİ ALAŞIMLARI 24
4.1. Alüminyum Alaşımlarına Titanyum İlavesinin Etkileri 24
4.1.2. Titanyumun alüminyum alaşımlarında tane inceltici olarak kullanılması 25
4.1.3. Titanyumun alüminyum alaşımlarında alaşım elementi olarak kullanılması 27
4.2. Ti-Al İkili Sistemi 28
4.3. Ti-Al-Si Üçlü Sistemi 31
4.4. Al-Ti ve Al-Si-Ti Sistemlerinde İntermetalik Fazların Morfolojisi 36
5. DENEYSEL ÇALIŞMA 38
5.1 Al-Si-Ti Alaşımlarının Dökümü 38
5.1.1 Döküm laboratuvarının kurulumu 40
5.2 Mikroyapısal İnceleme 41

5.2.1 Işık mikroskobu 41
5.2.2 Tarama elektron mikroskobu (SEM) ve EDX analizi.....51
5.3. Görüntü Analizi 56
5.4. Isıl İşlem Uygulamaları.....62
5.5. Mikrosertlik Ölçümleri.....77
5.6. Haddeleme.....80
5.7. Aşınma Testi.....82
5.7.1. Aşınma yüzeyi incelemeleri 86
5.7.2. Sürtünme katsayısı değişimi.....93
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....96
KAYNAKLAR.....99
KİŞİSEL YAYINLAR.....101
ÖZGEÇMİŞ.....102

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Alüminyumdan üretilmiş içecek kutuları 4
Şekil 2.2: Alüminyumdan üretilmiş çeşitli makine parçaları 5
Şekil 2.3: Hurda Alüminyum balyaları 6
Şekil 3.1: Al-Si faz diyagramı 16
Şekil 3.2: Ticari alüminyum silisyum alaşımları (a) Ötektik altı Al-Si alaşımı mikroyapısı, (b) Ötektik Al-Si alaşımı mikroyapısı, (c) Ötektik üstü Al-Si alaşımı mikroyapısı 18
Şekil 3.3: Al-Si alaşımında Si içeriğine bağlı çekme mukavemeti değişimi 19
Şekil 3.4: (A) modifiye edilmemiş, (B) stronsiyum ile modifiye edilmiş 21
Şekil 3.5: Birincil alüminyum dentritleri boyunca büyümüş Si kristalleri 211
Şekil 3.6: Modifiye edilmemiş Al-Si alaşımındaki yapraksı Si partikülünün SEM görüntüsü 22
Şekil 3.7: Döküm yapısında derin dağlamayla elde edilen fiber yapıdaki Si kristalleri 23
Şekil 3.8: Sr ile modifiye edilmiş Al-Si mikroyapısı, solda düşük büyütme, sağda yüksek büyütme ve derin dağlama 23
Şekil 4.1: Al - %12 Si ticari alaşımı. Döküm yapısında oluşan dentritik Al taneleri görülmektedir 26
Şekil 4.2: %0,03 Ti içeren Al - %12Si ticari alaşımı. Ti etkisiyle dentritik Al tanelerinin hücreler halinde katılaştığı görülmektdir 26
Şekil 4.3: 900˚C'de tavlanan numunenin kompozisyon-uzaklık grafiği ve oluşan intermetalik fazlar 29
Şekil 4.4: Alüminyum-titanyum faz diyagramı 30
Şekil 4.5: 1000˚C'de 1,25 saat tavlanmış ve havada soğutulmuş Ti-Al-Si difüzyon çifti numunesinin mikro yapısı, $TiAl_3$ dentritleri ve Al-Si ötektiği 31
Şekil 4.6: 1000˚C'de 1,25 saat tavlanmış ve havada soğutulmuş Ti-Al-Si difüzyon çifti numunesinin mikro yapısı,τ_2 fazı plakaları ve Al-Si ötektik yapısı. 32
Şekil 4.7: 1000 °C'de tavlanan difüzyon çiftlerinin kompozisyonlarının Gibbs Üçgeninde gösterilmesi 33
Şekil 4.8: 900˚C'de 9 saat tavlanan Ti-AlSi difüzyon çiftinde $TiAl_3$, Ti_9Al_{23}, $TiAl_2$, TiAl, Ti_3Al sırasıyla oluşan intermetalik fazlar 35
Şekil 4.9: 900 ˚C'de 9 saat tavlanan Ti-AlSi difüzyon çiftinde küresel $TiAl_3$ ve köşeli kristaller halinde Ti_5Si_3 bileşiği 36
Şekil 4.10: %1 Ti İçeren Al-Si ötektik alaşımında oluşmuş yapraksı morfolojideki $TiAl_3$ intermetaliği 37
Şekil 4.11: % 5 Ti İçeren Al-Si ötektik alaşımında oluşmuş plaka tipi morfolojideki $TiAl_3$ intermetaliği 37
Şekil 5.1: Dökümden sonraki numunelerin görüntüsü 39
Şekil 5.2: Döküm işlemlerinin gerçekleştirildiği mini indüksiyon ocağı 39
Şekil 5.3: Döküm laboratuvarına tez çalışmasıyla paralel olarak kazandırılan İnductotherm indüksiyon ocakları (A) 25 kw 15 kg kapasiteli ocak, 15 kw 8 kg kapasiteli ocak 41
Şekil 5.4: Mikroyapısal incelemelerin yapıldığı ışık mikroskobu 42

Şekil 5.5: Al-Si ötektik numunesinin parlatılmış konumda mikroyapısı.....43
Şekil 5.6: % 0,1 titanyum içeren Al-Si ötektik numunesinin mikroyapısında görülen $TiAl_3$ intermetalik fazları 44
Şekil 5.7: % 1 titanyum içeren alaşımın mikroyapısındaki $TiAl_3$ yaprakçıklarının iki farklı büyütmedeki görüntüleri.....45
Şekil 5.8: % 2 titanyum içeren alaşımın dağlanmış ve parlatılmış konumdaki mikroyapıları 46
Şekil 5.9: % 3 titanyum içeren alaşımın dağlanmış konumda farklı büyütmelerde mikroyapıları 47
Şekil 5.10: % 5 oranında titanyum içeren alaşımın dağlanmış ve parlatılmış konumda farklı büyütmelerdeki mikro yapısı 48
Şekil 5.11: % 10 titanyum içeren alaşımın parlatılmış ve dağlanmış konumdaki mikroyapıları 49
Şekil 5.12: % 5 titanyum içeren alaşımda oluşan intermetaliklerin işaretlenmiş hali 51
Şekil 5.13: Mikroyapısal incelemelerin yapıldığı tarama elektron mikroskobu ve Enerji-Dispersif X Işın Analizinin yapıldığı EDX sistemi 52
Şekil 5.14: % 2 Ti içeren alaşımın SEM görüntüsü, mikroyapıda siyah fazlar Si kristallerini, açık gri fazlar Ti intermetaliklerini, koyu gri matris ise alüminyumu göstermektedir.....52
Şekil 5.15: Mikroyapı içindeki birincil Si kristali ve yanındaki intermetalik plakalar 53
Şekil 5.16: % 3 Ti içeren alaşımın SEM görüntüleri.....54
Şekil 5.17: İntermetalik kristalin EDX analizi spektrumu.....55
Şekil 5.18: Malzemenin matrisinden alınan EDX analizi spektrumu.....56
Şekil 5.19: A Görüntü analizinde kullanılan Al-Si-0,1Ti alaşımı mikroyapısı B Görüntü analizinde kullanılan Al-Si-10Ti alaşımı mikroyapısı.....57
Şekil 5.20: Al içinde oluşan $TiAl_3$ miktarının titanyum miktarına bağlı artışı 62
Şekil 5.21: (A) Al-Si-1Ti alaşımı için , (B) Al-Si-2Ti alaşımı için, (C) Al-Si-3Ti alaşımı için, (D) Al-Si-5Ti alaşımı için ve (E) Al-Si-10Ti alaşımı için çizilen intermetalik boyut dağılım grafikleri.....65
Şekil 5.22: Al-Si-1Ti, Al-Si-5Ti ve Al-Si-10Ti alaşımları için çizilen intermetalik boyut dağılım grafiklerinin aynı grafik üzerinde gösterilmesi.....65
Şekil 5.23: Yan yana sıralanmış küçük boyutlu intermetalik kristaller.....66
Şekil 5.24: Titanyum içeriğine bağlı olarak şekil faktörü değişimi 67
Şekil 5.25: Şekilde Al-Si-2Ti alaşımının ısıl işlemden önce + ile işaretlenmiş bölümü 69
Şekil 5.26: Al-Si-2Ti alaşımının ısıl işlemden sonra + ile işaretlenmiş bölümü görülmektedir 70
5.27: Al-Si-3Ti alaşımından ısıl işlem öncesi alınan görüntüler.....71
Şekil 5.28: Al-Si-3Ti alaşımın ısıl işlem sonrasında alınan görüntüleri.....72
Şekil 5.29: Titanyum içermeyen AlSi ötektik alaşımından ısıl işlem öncesinde alınan görüntüler 73
Şekil 5.30: Titanyum içermeyen AlSi ötektik alaşımından ısıl işlem sonrasında alınan görüntüler 74
Şekil 5.31: 800 °C' de 8 saat tutulup suda soğutulan Al-Si-2Ti numunesinin 200 °C' de 8 saat tutulup fırında soğutulmasının ardından işaretli bölgeden alınan görüntüler 76
Şekil 5.32: Mikrosertlik ölçümlerinin yapıldığı sertlik ölçüm cihazı.....77

Şekil 5.33: Sırasıyla % 2 Ti ve % 10 Ti içeren alaşımların mikroyapıları ve sertlik ölçümü sırasında oluşan izler 78
Şekil 5.34: Titanyum ilavesine bağlı olarak sertlik değişimi 79
Şekil 5.35: Haddeleme sırasında kırılan Al-Si-3Ti alaşımının görüntüsü 80
Şekil 5.36: Isıl işlem sonrasında haddeleme sırasında kırılan malzemenin görüntüsü 81
Şekil 5.37: Haddeleme sırasında kırılan Al-Si ötektik alaşımının görüntüsü 82
Şekil 5.38: Aşınma testlerinin gerçekleştirildiği Pin-On-Disk tipi aşınma cihazı 83
Şekil 5.39: Kullanılan aşınma cihazının şematik gösterimi 84
Şekil 5.40: Ti içeriğine bağlı olarak aşınmada ağırlık kaybı değerleri 86
Şekil 5.41: Al-Si-0,1Ti içeren alaşımın aşınma yüzeyinin küçük büyütmedeki SEM görüntüsü 87
Şekil 5.42: Al-Si-0,1Ti içeren alaşımın aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü 88
Şekil 5.43: AlSi5Ti alaşımının aşınma yüzeyinden alınan SEM görüntüsü 88
Şekil 5.44: Al-Si-10Ti alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü 89
Şekil 5.45: Al-Si-5Ti alaşımının aşınma yüzeyinde bulunan partikül ve arka planda görünen parlatılmış yüzeyde görünen intermetalik kristaller....90
Şekil 5.46: Al-Si-5Ti içeren alaşımın aşınma yüzeyinde bulunan partikülün SEM görüntüsü ve aynı partikülün EDX (Mapping) analizi 91
Şekil 5.47: Al-Si-10Ti alaşımının aşınma yüzeyinde bulunan partikülün SEM görüntüsü ve EDX (Mapping) analizi....92
Şekil 5.48: Al-Si-10Ti alaşımının aşınma yüzeyinde bulunan partikülün SEM görüntüsü ve EDX (Mapping) analizi....92
Şekil 5.49: Al-Si-5Ti içeren alaşımın aşınma testi sonucu elde edilen Zaman-Sürtünme Katsayısı diyagramı 93
Şekil 5.50: % Ti oranına bağlı ortalama sürtünme katsayısı değişimi....94
Şekil 5.51: Her bir alaşım için sadeleştirilmiş Sürtünme Mesafesi- Sürtünme Katsayısı grafiklerinin tek diyagramda gösterilmesi 95

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 4.1. Üçlü Al-Si-Ti sisteminin alüminyumca zengin köşesinde oluşabilecek fazlar 32
Tablo 4.2 Ti-Al-Si difüzyon çiftlerinde oluşan ikili ve üçlü intermetalik fazların % at. Olarak kompozisyonları ve oluşmaları için gereken sıcaklık ile soğuma şartları.....34
Tablo 5.1 Al-Si-5Ti içeren alaşım için yapılan görüntü analizi işleminde bir görüntüden elde edilen intermetalik faz değerleri (Feature Tablosu).....58
Tablo 5.2 Al-Si-5Ti alaşımı için Feature Tablosunda bulunan intermetalik faz değerlerinin ortalamasının bulunduğu tablo (Field Tablosu).……..……..59
Tablo 5.3 Al-Si-XTi alaşımlarına uygulanan görüntü analizi işlemi sonucunda elde edilen verilerin tablo halinde gösterilmesi 60
Tablo 5.3 Al-Si-XTi alaşımlarına uygulanan görüntü analizi işlemi sonucunda elde edilen verilerin tablo halinde gösterilmesi(Devam) 61
Tablo 5.4 Farklı miktarlarda titanyum içeren alaşımların mikrosertlik değerleri 79
Tablo 5.5 Aşınma cihazının parçalarının açıklaması.....84
Tablo 5.6 Alaşımlarda aşınma testi sonucu oluşan ağırlık kaybı değerleri 86

SİMGELER DİZİNİ

A	: Amper
Al	: Alüminyum
B	: Bor
C	: Karbon
Ca	: Kalsiyum
Cu	: Bakır
F	: Flor
Fe	: Demir
H	: Hidrojen
kWh	: Kilowatt. Saat
kg	: Kilogram
m	: Metre
mg	: Miligram
Mg	: Magnezyum
Mn	: Mangan
mm	: Milimetre
N	: Newton
Na	: Sodyum
Ni	: Nikel
Si	: Silisyum
Ti	: Titanyum
v	: Volt
V	: Vanadyum
Zn	: Çinko
Zr	: Zirkonyum
μm	: Mikrometre

Kısaltmalar

AA	: Aluminium Association
Alcoa	: Aluminium Company of Amrica
EDX	: Energy Dirpersive X-Ray Analysis (Enerji Dispersive X Işın Analizi)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Tarama Elektron Mikroskobu)
TEM	: Transmission Electron Microscope (Transmisyon Elektron Mikroskobu)
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik

AL-Sİ-XTİ ALAŞIMLARININ DÖKÜMÜ VE MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONU

Erdem KARAKULAK

Anahtar Kelimeler: Al-Si alaşımı, Titanyum, $TiAl_3$, Titanyum İçeriği, Sertlik, Aşınma Dayanımı,

Özet: Yurdumuzda ve dünyada hafiflik, korozyon dayanımı, düşük maliyeti gibi özellikleri nedeniyle en çok kullanılan demir dışı alaşım alüminyumdur. Alüminyum alaşımları genellikle aşınma altında çalıştıklarından sertlik ve aşınma dayanımı özellikleri büyük önem taşır. Bu çalışmada Al-Si alaşımının sertlik ve aşınma özelliklerini iyileştirmek için Ti ilavesi yapılmıştır. Yapılan Ti ilavesi sonucu yapıda $TiAl_3$ intermetaliklerinin oluştuğu görülmüştür. Mikroyapısal incelemeler sonucu farklı titanyum içeriklerinde oluşan intermetalik morfolojisinin değiştiği belirlenmiştir. Ayrıca malzeme içerisindeki titanyum oranının artmasıyla sertlik değerlerinin arttığı saptanmıştır. Yapılan aşınma testlerinde ise belli bir noktadan sonra artan titanyumun malzemenin aşınma direncini düşürdüğü bunun sebebinin ise intermetalik morfolojisi olduğu belirlenmiştir. Yapılan görüntü analizi çalışmaları sonucunda artan titanyum miktarıyla birlikte yapıdaki intermetalik kristallerin sayısının ve boyutunun arttığı belirlenmiştir.

CASTING AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF

AL-SI-XTI ALLOYS

Erdem KARAKULAK

Keywords: Al-Si Alloys, Titanium, $TiAl_3$, Titanium Content, Hardness, Wear Resistant

Abstract: Aluminium is the most used non-ferrous metal in our country also in the world, because of its lightness, perfect corrosion resistance and low cost. Generally aluminium alloys work under wear conditions because of that hardness and wear properties are very important for these alloys. In this study, to improve hardness and wear properties of Al-Si its alloyed with Ti. After Ti addition $TiAl_3$ intermetallic crystals are found on the microstructure of alloys. And after microstructural studies its seen that the morphology of the intermetallics changes with the titanium content. Also with increasing titanium content the hardness of alloys increase. After the wear tests its found that with the increasing titanium content wear resistant first increases and after a Ti content in starts to decrease. The reason for the deacrese in the wear resistance is the morphology of the intermetallic crystals. After the image analyzing studies its seen that with increasing Ti amount in the alloy the number and the sizes of the $TiAl_3$ intermetallic particles increases.

1.GİRİŞ

Alüminyum doğada çok bulunması, fiziksel ve kimyasal özellikleri ve üretim kolaylığı gibi avantajları nedeniyle çelikten sonra en fazla kullanılan metal malzemedir. Oksijen ve silisyumdan sonra yer kabuğunda en çok bulunan üçüncü elementtir. Yer kabuğunun ağırlıkça % 8'i alüminyumdan oluşur. Boksit cevherinden üretilen alüminyumum en büyük özelliği hafifliğidir. 2,7 g/cm^3 yoğunluğu ile çelikten yaklaşık üçte bir oranında hafiftir. Bunun yanında yüzeyinde oluşan Al_2O_3 tabakası nedeniyle yüksek korozyon dayanımına sahiptir. İyi elektrik ve ısıl iletkenliği alüminyumu cazip hale getiren diğer önemli özelliklerdir. Ancak bu avantajların yanı sıra mukavemet değerinin çeliğe göre düşük olması en büyük handikaptır. Özellikle saf haldeyken çok düşük mukavemeti olduğundan alüminyum genelde alaşımlanarak kullanılır. Saf haldeyken yalnızca elektrik iletkenliğinin önemli olduğu uygulamalarda kullanılır. Alaşımlanmış konumda ise Si, Cu ve Mg elementleri ile öncelikli çalışılır.

Al-Si ikili sistemi yaklaşık ağ-% 12,6'da bir ötektik gösterir. Al-Si alaşımları yüksek aşınma direnci, düşük ısıl genleşme katsayısı, iyi korozyon direnci ve geniş bir sıcaklık aralığındaki gelişmiş mekanik özellikleri nedeniyle çok kullanılan malzemelerdir. Bu özellikleri Al-Si alaşımının otomotiv sektöründe, özellikle de silindir gövdeleri, silindir kafaları ve piston gibi parçaların üretiminde kullanılmasını sağlar. Genel kullanım alanı öncelikle aşınma etkisine yönelik olduğundan çalışmalar malzemenin sertliğini artırıp aşınma direncini iyileştirme yönünde yoğunlaşmıştır. Bu amaçla Al içine sert faz oluşturabilecek bazı alaşım elementleri katılmıştır. Bu elementlerden biri de Ti'dir. Ti, Al içine az miktarda ilave edilince Al ile birleşip bazı intermetalik fazlar oluşturur.[1] Yapılan bu çalışmada alüminyum içerisine mukavemet sağlamak amacıyla alaşım elementi olarak titanyum ilave edilmiştir.

Titanyum ilavesi sonucu yapıda oluşacak değişiklikleri belirlemek amacıyla % 0,1–10 aralığında farklı titanyum içeriğine sahip Al-Si alaşımları dökülmüştür. Titanyum

ilavesi sonucu yapıda oluşan yüksek sertlikli intermetalik kristaller sayesinde malzemenin genel sertlik ve mukavemet değerlerinde artış sağlanmıştır. Yapılan aşınma testlerinde ise malzemenin sertliğindeki artışa rağmen oluşan intermetalik fazların morfolojisine bağlı olarak aşınma özelliklerinin değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Dökülen numunelere ayrıca görüntü analizi işlemi uygulanmıştır. Görüntü analizi sonuçlarına göre yapıdaki titanyum miktarı arttıkça oluşan intermetaliklerin boyutlarında ve malzeme içindeki toplam intermetalik hacim oranlarında artış gözlenmiştir.

Bilimsel olarak titanyumun alüminyum alaşımlarında tane inceltici olarak kullanılması hakkında birçok çalışma mevcuttur. Ancak titanyumun mukavemet artırıcı alaşım elementi olarak ilavesi ve oluşturduğu intermetalikler hakkında literatürde oldukça kısıtlı kaynak mevcuttur.

Al-Si-Ti alaşımlarının geliştirilmesi konusu henüz çok yeni olduğundan optimum özelliklerin yakalanması için bu konu üzerinde daha fazla çalışılmalıdır. Yapılan bu çalışmanın ilerideki çalışmalar için bir kaynak olmasını umuyoruz.

2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ

2.1. Element Olarak Alüminyumun Özellikleri

Alüminyum Al sembolü ile gösterilen, atom numarası 13, atom ağırlığı 27 olan metalik bir elementtir. Atom çekirdeğinde 13 proton ve 14 nötron bulunur. Oksijen ve silisyumdan sonra yer kabuğunda en çok bulunan üçüncü elementtir. Yer kabuğunun ağırlıkça % 8'i alüminyumdan oluşur.[2] Oluşturduğu bileşiklerde metalik bağ yapar ve 3 elektron vererek +3 değerlikli hale geçer.

2.2. Endüstriyel Metal Olarak Alüminyum

Alüminyumun endüstriyel bir metal olarak kullanımı metal tasfiye prosesinin 1886'da bulunmasıyla başlamıştır. Bronz, bakır, demir, kurşun gibi metallerle karşılaştırıldığında kullanımı çok yeni olmasına rağmen günümüzde demir dışı metaller içinde en çok kullanılan malzemedir. Hafiflik, parlaklık ve korozyon dayanımı gibi özellikleri nedeniyle birçok kullanım alanında çeliğin yerini almıştır. Günümüzde kullanım alanı çok geniştir ve genişlemeye de hızla devam etmektedir. Şu anda yıllık tüketim 20 milyon ton civarındadır.[2]

Bazı kullanım alanları:

- ulaşım sektörü (otomobil parçaları, kaporta, uçak ve tren parçaları)
- ambalaj sanayi (içecek kutuları, folyolar) (Şekil 2.1)
- inşaat sektörü (çerçeve, kapı, dış cephe kaplaması)
- dayanıklı tüketim aletleri (cihazlar ve mutfak gereçleri gövdesi ve parçaları)

- elektrik iletim hatları (düşük yoğunluk nedeniyle)
- makine parçalarında (Şekil 2.2)
- yüksek saflıkta alüminyum elektronik sektöründe
- toz halinde alüminyum boya sektöründe
- yüksek ısı iletimleri nedeniyle yeni bilgisayar işlemcilerinde ısı uzaklaştırıcı olarak[3]
- uzay mekikleri ve uyduların üretiminde ve uzay mekiklerinde katı yakıt olarak



Şekil 2.1: Alüminyumdan üretilmiş içecek kutuları



Şekil 2.2: Alüminyumdan üretilmiş çeşitli makine parçaları

2.3. Alüminyum Metalinin Üretimi

Alüminyum ingotların üretimi basit olarak üç adımdan oluşur. (1) Boksit cevherinin madenden çıkarılması (2) Boksitten Alüminanın elde edilmesi (3) Alüminadan saf Al üretimi

Boksit birçok ülke topraklarında bol miktarda bulunan bir cevherdir. Boksitten alümina (Al_2O_3) üretim Bayer Prosesi ile yapılır. Bu proseste 1 kg alümina üretimi için yaklaşık olarak 2 kg boksit, 2 kg kömür ve 0,5 kg kostik soda kullanılır.[2]

Alüminadan metalik Al eldesi içinse Hall-Heraoult prosesi adı verilen bir elektroliz prosesi kullanılır. Bu proseste kriolit ismi verilen bir elektrolit ve karbon elektrotlar kullanılır. Kullanılan karbon elektrotlar anot olarak proses sırasında harcanırken elektroliz hücresinin tabanı katot olarak kaplanır ve oluşan metalik alüminyum elektroliz hücresinin tabanında toplanır. Metal yaklaşık 900 ºC'de ve yüksek saflıkta (% 99,5–99,8) elde edilir. Bu üretim için her elektroliz hücresi başına 5V'luk ve

100–150 kA'lık bir doğru akıma ihtiyaç vardır. Bir kg alüminyum metali üretmek için yaklaşık 2 kg alümina, 0,5 kg karbon ve 15 kWh elektrik enerjisi harcanır. Elektrolit olarak kullanılan kriolit (Na_3AlF_6)'in büyük bir kısmı kullanılmadığı için tekrar tekrar kullanılabilir.[2]

Cevherden yapılan üretimin yanı sıra hurdadan da üretim yapılmaktadır (Şekil 2.3). Hurdalar genellikle alüminyum işleyen tesislerin artıklarından ve az miktarda insanlar tarafından kullanılan alüminyum malzemelerin artıklarından oluşur. Hurdadan üretilecek metalin özelliklerini etkileyen en önemli parametre hurdanın kimyasal kompozisyonudur. Hurdadan üretimde en çok tercih edilen hurdalar saf ya da en az alaşım elementini içeren hurdalardır.



Şekil 2.3: Hurda Alüminyum balyaları

2.4. Alüminyum Alaşımları

Saf alüminyumun mekanik özellikleri düşüktür. Üretim şartlarına bağlı olarak saf alüminyumun çekme mukavemeti 90–140 $N/mm^{2'}$dir. Bu haliyle elektriksel iletken

olarak kullanılabilir. Bunun dışındaki uygulamalarda kullanılabilmesi için alaşımlanması gerekir. Uygun alaşımlama ile alüminyumun çekme dayanımı 500 $N/mm^{2,}$ye kadar çıkarılabilmektedir. [2]

En sık kullanılan alaşım elementleri, önceden de belirtildiği gibi Si, Cu, Mg'dir. Si içeren alaşımlarda ötektik bir yapı oluşur. Ayrıca oluşan birincil silisyum kristalleri sayesinde malzemenin mukavemetinde artış elde edilir. Cu ve Mg içeren alaşımlarda ise intermetalik kristaller oluşarak sertlik ve mukavemetin artmasını sağlarlar.

2.5. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları iki farklı koşula göre genel ikişer sınıfa ayrılır. Birinci ayırımda hadde alaşımları ve döküm alaşımları olarak ayrılır. İkinci durumda ise ısıl işlem uygulanabilir ve uygulanamaz diye ikiye ayrılırlar.

2.5.1. Hadde alaşımlarının sınıflandırılması

Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasında dünya genelinde Aluminium Association (AA) tarafından yapılan sınıflandırma sistemi kullanılmaktadır. Bu sistemde alaşımlar dört haneli rakamlarla isimlendirilir. Bu rakamlar alaşımın kimyasal kompozisyonu ile ilgili bilgi verir. Bunun dışında bu dört haneli rakamların yanında alaşımın ısıl işlem durumu ile ilgili bilgiler harfler yardımıyla belirtilir.

Bu sınıflandırılmaya göre alüminyum alaşımları 7 seri olarak verilir. Bunun dışında diğer serilere uymayan Li alaşımlı 8xxx serisi de mevcuttur. Fakat çok sınırlı kullanımı olduğundan genel sınıflandırılmada kullanılmaz. Serileri gösteren dört haneli sayının ilk rakamı esas alaşım elementini gösterir. Sonra gelen harf ve rakamlar ise alaşıma uygulanan ısıl işlemleri ya da alaşımla ilgili özel durumları belirtmek için kullanılır.[2]

1xxx	Saf Alüminyum	Isıl İşlem Uygulanamaz
2xxx	Bakır	Isıl İşlem Uygulanabilir
3xxx	Mangan	Isıl İşlem Uygulanamaz
4xxx	Silisyum	Isıl İşlem Uygulanamaz
5xxx	Magnezyum	Isıl İşlem Uygulanamaz
6xxx	Magnezyum ve Silisyum	Isıl İşlem Uygulanabilir
7xxx	Çinko ve Magnezyum	Isıl İşlem Uygulanamaz

1xxx Alaşım Serisi :

Bu serideki Alüminyum alaşımları ticari saflıktadır. Alaşımı simgeleyen dört haneli rakamın üçüncü ve dördüncü basamakları alaşımın % 99,0'dan sonra gelen saflık derecesini gösterir. Örneğin 1050 ile simgelen alaşımın saflık derecesi %99.50'dir. Bu serideki alaşımların saflık derecesi % 99.00 ile % 99.99 arasında değişir.

2xxx Alaşım Serisi :

Bu serideki alaşımların hepsi bakır içermektedir. Bakırın yanında Mg, Mn, Si gibi alaşım elementlerini de içerirler. 2xxx serisi alaşımları yüksek mukavemet değerlerine sahiptirler. Bu nedenle uçak sanayinde kullanımları yüksektir. Doğal yaşlanma işlemine tabi tutulduktan sonra bu alaşımların mekanik özellikleri hemen hemen çelikle aynıdır. Yaklaşık 400 N/mm^2 çekme dayanımı ve yüksek tokluk özelliklerine sahiptirler. Yüksek mukavemetli 2xxx alaşımlarının olumsuz yönleri ise düşük korozyon dayanımı, zor şekillendirilmesi, ark kaynağına uygun olmayışı ve yüksek maliyettir.

3xxx Alaşım Serisi :

Düşük miktarlarda mangan içeren bu serideki (bazı durumlarda magnezyum da) alaşımların çekme dayanımı 200 N/mm^2'nin üzerindedir. İlave edilen alaşım elementi miktarı az olduğundan korozyon dayanımında fazla bir düşüş olmaz. Genelde dış cephe kaplamaları ve kaynakla birleştirilen boru hatlarında kullanılırlar.

4xxx Alaşım Serisi :

Alüminyumun en çok kullanılan alaşım tiplerinden biridir. Silisyum alüminyum içine katılan en önemli alaşım elementidir. Silisyum alüminyumla bir ötektik oluşturur ve böylece dökülebilirlik ve mukavemeti iyileştirilir. Bu serideki alaşımlar döküm parça üretiminde ve kaynak dolgu teli üretiminde kullanılır.

5xxx Alaşım Serisi :

% 1–5 arası magnezyum ve genellikle mangan içerirler. Bu seride farklı uygulamalar için farklı mukavemet ve tokluk değerlerine sahip alaşımlar mevcuttur. Alaşımların korozyon dayanımları genelde oldukça iyidir. Bu alaşım grubundan genellikle sac ya da folyo üretimi yapılır. Düşük alaşım elementi içeren alaşımların şekillendirilebilirliği oldukça iyidir, bu nedenle folyo üretiminde kullanılırlar. Yüksek alaşım elementi içeren alaşımlar ise kaynaklı sac konstrüksiyonlarda kullanılırlar ve 300N/mm^2'nin üzerinde çekme dayanımına sahiptirler.

6xxx Alaşım Serisi :

Bu alaşım serisinde ise temel alaşım elementi olarak Mg ve Si bulunur. Isıl işlem uygulanabilir alaşım serileri içinde en yüksek kullanıma sahip seri 6xxx serisidir. İyi korozyon dayanımı ve şekillendirilebilirliğin yanında göz ardı edilemeyecek mukavemet değerlerine sahiptirler. Düşük mukavemetli 6xxx serisi alaşımları ekstrüzyon işlemi için çok uygundurlar.

7xxx Alaşım Serisi :

Bu alaşım serisi temel alaşım elementleri olarak çinko ve magnezyum içerir. 6xxx serisinde olduğu gibi 7xxx serisinde de mukavemet bakımında güçlü ve zayıf alaşımlar mevcuttur. Serinin yüksek mukavemetli alaşımları tüm alüminyum alaşımları arasındaki en yüksek mukavemete sahiptir. Bu alaşımların çekme dayanımı 550 N/mm^2'ye kadar çıkmaktadır. En fazla uçak sanayinde kullanılır. Şekillendirilebilirliği ve korozyon dayanımları kötüdür.[2]

2.5.2. Döküm alaşımlarının sınıflandırılması

Döküm alaşımlarının sınıflandırılması üç haneli bir sayı ve bu sayının sonundaki ondalıklı bir rakam ile gösterilir. Üç basamaklı kısım alaşımın bileşimini gösterirken ondalıklı kısım özel ihtiyaçlarla ilgili bilgi verir.

1xx.x Serisi :

Alaşım elementi içermeyen saf alüminyum için kullanılan seridir. Kullanım alanları kısıtlıdır. Çoğunlukla rotor üretiminde kullanılırlar.

2xx.x Serisi :

Ana alaşım elementi olarak bakır içerirler. Ancak bakırın yanında başka alaşım elementleri de içerebilirler.

3xx.x Serisi :

Temel alaşım elementi olarak silisyum içeren seridir. Silisyumun yanında bakır ve magnezyum gibi elementlerde içerebilir.

4xx.x Serisi :

Sadece silisyum içeren alaşımların bulunduğu seridir.

5xx.x Serisi :

Temel alaşım elementi olarak magnezyum içeren seridir.

6xx.x Serisi :

Kullanılmayan seri

7xx.x Serisi :

Temel alaşım elementi olarak çinko içeren alaşımların serisidir. Çinkonun yanında alaşım elementi olarak bakır ve magnezyum da içerirler.

8xx.x Serisi :

Temel alaşım elementi olarak kalay içeren seridir.

9xx.x Serisi :

Kullanılmayan seri [5]

2.6. Alüminyuma İlave Edilen Alaşım Elementlerinin Etkileri

Kalsiyum: Alüminyum içerisinde çok düşük bir çözünürlüğü vardır ve alüminyum ile $CaAl_4$ intermetaliğini oluşturur. %5 Ca ve %5 Zn içeren bir grup alaşım süper plastik özelliğe sahiptir. Silisyumla beraber bulunduğunda $CaSi_2$ intermetaliğini oluşturur. Al-Mg-Si alaşımlarında kalsiyum yaşlanma sertleşmesi etkisini olumsuz olarak etkiler. Al-Si alaşımlarında ise mukavemeti artırıcı ve uzamayı azaltıcı etki yaratırlar ancak bu alaşım serisini ısıl işlenebilir hale getirmezler.

Bakır: %2 ile 10 arası bakır içeren Al-Cu alaşımları önemli bir alaşım grubu oluşturur. Tüm döküm ya da hadde Al-Cu alaşımları çözeltiye alma işlemine uygundur. Bu işlemin ardından mukavemet artışı ve uzama düşüşüyle sonuçlanan çökelti sertleşmesi oluşur. Sertleşme maksimum %4–6 bakır içeriğinde oluşur.

Bakır- Magnezyum: Al içerisine magnezyum ilavesindeki en önemli fayda ısıl işlem ve su verme işlemleriyle elde edilen mukavemet artışıdır. Bu bileşimdeki bazı hadde alaşımlarında doğal yaşlanma ile yüksek sertlik ve tokluk değerleri beraber elde edilir. Yapay yaşlandırma uygulanırsa sertlikte daha fazla artış elde edilir, ancak tokluktan fedakârlık etmek gerekir.

Bakır- Magnezyum ve Diğer Elementler: Demir içeren Al-Cu-Mg alaşımları boyutsal stabilite, gelişmiş yataklama özellikleri, yüksek sıcaklıklardaki yüksek mukavemet ve yüksek sertlikleriyle karakterize edilirler. Ancak ak- %4 Cu-%0,5 Mg içeren hadde alaşımında %0,5 Fe bulunması ısıl işlemlenmiş koşulda çekme dayanımını kötü yönde etkiler.

Kurşun: Normalde ticari saflıkta alüminyum içerisinde eser miktarda bulunur. Ancak bazı alaşımlara (2011–6262) işlenebilirliği artırmak amacıyla bizmutla beraber %0,5 oranında katılır.

Magnezyum: 5xxx serisi alüminyum alaşımlarının temel alaşım elementidir. Al içinde katı halde maksimum % 17,4 çözünürlüğü vardır. Ancak günümüzde hadde Al alaşımlarında Mg miktarı % 5,5'i geçmez. Mg ilavesi tokluğu kötü yönde etkilemeden Al alaşımlarının sertliğini artırır.

Magnezyum-Mangan: Hadde alaşımlarında bu sistem işlenerek sertliğin arttığı konumda yüksek mukavemete sahiptir. Ayrıca yüksek korozyon direnci ve iyi kaynak kabiliyeti vardır. Magnezyum ya da mangandan herhangi birinin miktarını artırmak işlenmesini zorlaştırır ve sıcak haddeleme sırasında çatlamalara neden olabilir.

Magnezyum-Silisyum: 6xxx serisi hadde alaşımları yaklaşık %1,5 oranında magnezyum ve silisyum içerirler. Böylece yaklaşık bileşimi Mg_2Si olan intermetalik bileşiğin oluşması sağlanır. Maksimum Mg_2Si çözünürlüğü % 1,85'tir. Yaşlanma işlemiyle partiküller oluşturup sertliğin artmasını sağlarlar.

Silisyum: Elektrolitik ticari saflıktaki alüminyumda demirden sonra en fazla bulunan empürite elementidir. Bunun dışında birçok alaşımda (özellikle döküm alaşımları ve 6xxx serisinde) kullanılır. Al ile bir ötektik oluşturarak döküm alaşımları açısından önemli bir avantaj oluşturur.

Çinko: Alüminyum çinko alaşımları yıllardır bilinmesine rağmen dökümden sonra sıcak yırtılmalar ve gerilmeli korozyon çatlağına karşı hassasiyetleri nedeniyle

kullanımı azalmıştır. Bu alaşım grubu hadde alaşımları içindeki en yüksek çekme mukavemetine sahiptir.

Nikel: Alüminyum içinde nikelin % 0,04 çözünürlüğü mevcuttur. Bu değerin üstündeki nikel ilaveleri yapıda çözünmeyen intermetalikler oluşmasına neden olur. % 2'ye kadar nikel yüksek saflıkta alüminyumun mukavemetini artırır, ancak tokluk değerinin düşmesine neden olur. İkili Al-Ni alaşımları günümüzde kullanılmazken, nikel Al-Cu ve Al-Si alaşımlarına yüksek sıcaklıkta sertlik ve genleşme katsayısının düşürülmesi için katılır.

Demir: Alüminyum içerisinde en çok rastlanan empürite elementidir. Ergiyik haldeki alüminyum içerisinde yüksek çözünürlüğü bulunmaktadır. Ancak katı haldeki çözünürlüğü oldukça düşüktür (~% 0,04). Bu nedenle bu değerin üzerinde demir içeren alaşımlarda demir intermetalik ikinci faz olarak bulunur.[6]

3. AL-Sİ ALAŞIMLARI

3.1. Tarihsel Perspektif

Al-Si alaşımları üzerindeki teknik incelemeler 1856 yılından beri yapılmakta olmasına rağmen alaşımların ticari ilgiyi çekmeleri 1921 yılından sonra olmuştur. 1920 yılında Amerika Birleşik Devletlerinde Pacz % 15 silisyum içeren ve "Alpax" olarak adlandırılan Al-Si alaşımını ortaya çıkardı. Bu alaşımın geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar Al-Si alaşımları ve özellikle Al-Si ötektiği üzerindeki çalışmaları başlatmış oldu. O yıllarda Almanya ve Fransa'da otomotiv parçaları için yapılan dökümlerde "Silumin" ve "Aladar" adıyla yüksek miktarda Al-Si alaşımı kullanılması çok ilginçtir. Ayrıca o dönemde alaşımların bir alkali fulorid ya da sodyum veya potasyumla modifiye edilmesi ve modifiye edilmeyen alaşımlarda silisyumun büyük plakalar ya da iğnesel olduğunun bilinmesi bunun yanında modifikasyon sonucunda silisyumun yapıya ince dağılmış olduğunun bilinmesi de oldukça şaşırtıcıdır. Modifiye edilmiş ve edilmemiş alaşımların patentleri Pacz ve Aluminum Company of America (ALCOA) tarafından alınmıştır. Pacz tarafından alınan patentlerde alüminyum ve silisyum beraber eritilip ergiyiğe alkali florid tipik olarak sodyum florid katılarak modifikasyon işlemi yapılırdı. ALCOA tarafından alınan patentlerde ise sıvı haldeki alaşımlar az miktarda sodyum veya potasyum ilaveleriyle modifiye edilirdi. 1922 yılında Jeffries Al-Si alaşımları içine katılan fluksların alaşımın morfolojisini değiştirdiğini ve silisyumun ötektik içinde daha iyi dağılmasını sağladığını belirledi. Böylece modifiye edilmemiş ötektiğin karakteristik mikroyapısındaki iğnesel morfolojiden daha ince taneli bir morfolojiye geçiş olmaktaydı. Jeffries ayrıca modifikasyon işleminin ötektik noktanın yüksek silisyum içeriğine doğru kaymasına neden olduğunu buldu. Bu buluştan bir kaç yıl sonra ise Archer ve Kempf kimyasal modifikasyonun ötektik noktayı sağa kaydırmasının yanında ötektik sıcaklığıda 577 ºC'den 564 ºC'ye düşürdüğünü buldu.[7]

3.2. Genel Özellikler

Al döküm alaşımlarında en çok kullanılan alaşım elementi silisyumdur.[4] Al-Si alaşımları dökülebilirlik ve korozyon dayanımının yüksek olması gereken koşullarda uygulanır.[4] Silisyum, alüminyumun dökülebilirliğini, mukavemet ve sertlik değerlerini artırır. Şekil 3.2'de verilen alüminyum-silisyum ikili denge diyagramının en önemli özelliği ağırlıkça yaklaşık %12,6'daki ötektik noktadır.[4] 577 ºC'de oluşan bu ötektik reaksiyon alüminyum silisyum alaşımlarının ergime derecesini oldukça aşağılara çeker ve böylece maliyetlerini azaltır. Silisyum içeren alüminyum alaşımları üç grupta incelenir. Bu gruplar ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü alaşımlardır. Bu üç farklı grupta ki alaşımların mikroyapıları ve dolayısıyla mekanik ve fiziksel özellikleri oldukça farklıdır.[4]

Ötektik altı Al-Si alaşımları %12,6'dan daha az Si içerirler. Mikroyapıları incelendiğinde birincil alüminyum tanelerinin yanında Al-Si ötektik fazı gözlemlenir. Alaşım içindeki Si miktarı arttıkça birincil Al taneleri miktarı azalır, ötektik fazın miktarı ise artar.[4]

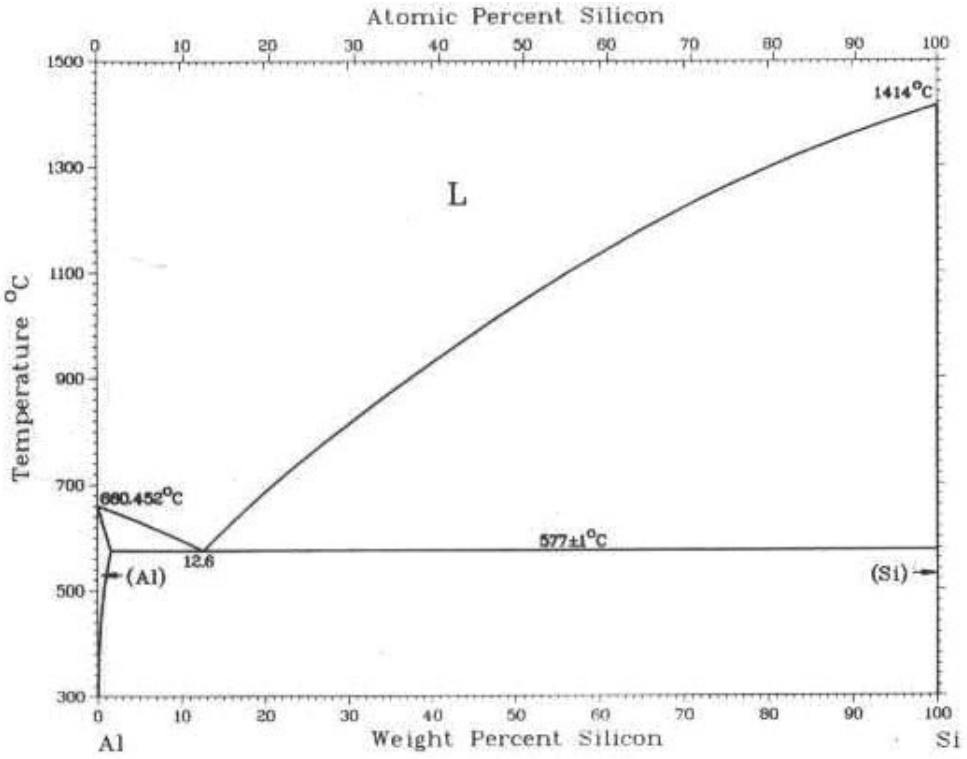
Ötektik Al-Si alaşımları ise %12,6 civarında silisyum içerir. Yapı büyük oranda ötektik fazdan oluşur. Bunun yanında birincil alüminyum ya da birincil silisyum kristallerine az miktarda rastlanması da olasıdır.[4]

Ötektik üstü alaşımlarda ise silisyum miktarı ötektik noktanın üzerindedir. Silisyum miktarının % 24–26 civarına kadar çıktığı uygulamalar mevcuttur. Bu tarz bir alaşımın mikroyapısında ise birincil silisyum kristalleri ve ötektik faz bir arada bulunur. Birincil silisyum kristalleri fasetli yapıda, geometrik şekilli ve normal ışık altında incelendiğinde gri renklidir. Bu özellikleri mikroyapı içinde kolayca tanınmalarını sağlar.[4]

Hiç bir uygulamaya tabi tutulmayan alüminyum silisyum ötektik fazı iğnesel bir yapı sergiler. İğnesel yapı malzemelerin tokluğunu düşürdüğünden bu durum uygulamada istenmez. Bu handikaptan kurtulmak için alaşımlar dökümden hemen önce modifiye edilir. Modifikasyon işlemi sıvı haldeki alaşım içerisine az miktarlarda sodyum ya da

stronsiyum ilavesi ile yapılır. Modifikasyon işlemi sonucunda mikroyapı daha küçük boyutlu ve yaklaşık olarak eş eksenli tanelerden oluşur. Böylece alaşımın tokluk değerinde bir düşüş yaşanmaz.[4]

Eğer mukavemet değerlerinin daha da artırılması gerekirse bu alaşımlara magnezyum ilavesi yapılır ve ısıl işlem uygulanır. Kullanılan alaşımların silisyum içeriği genellikle % 5–13 arasındadır. Özellikle yüksek Si içeren alaşımların mukavemet ve tokluk özellikleri ötektik yapının modifikasyonu ile sağlanır.[2]



Şekil 3.1: Al-Si faz diyagramı [5]

3.3. Alüminyum-Silisyum Faz Diyagramı ve Dengeli Soğuma

Al-Si sistemi Al içinde silisyumun, silisyum içinde alüminyumun sınırlı bir çözünürlüğü olan basit bir ikili ötektik sistemidir. Al içinde Si çözünürlüğü ötektik sıcaklıkta atomik olarak % 1,5 gibi bir maksimuma ulaşır. Silisyum içerisindeki alüminyum çözünürlüğü ise sıcaklıkla beraber artar ve 1190ºC'de atomik olarak % 0,0016'ya ulaşır. Şekil 3.1'de görünen Al-Si faz diyagramında sabit olan tek reaksiyon

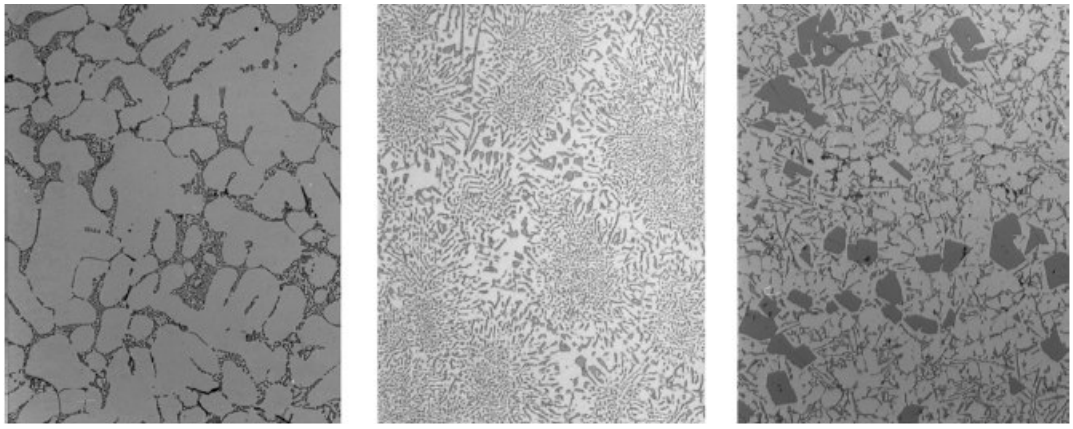
$L \rightarrow \alpha + \beta$ (ötektik) (1) reaksiyonudur.

1 numaralı eşitlikte α alüminyum ve β ise silisyumdur. Şu anda genel olarak kabul edilen koşula göre ötektik reaksiyon 577 ºC'de ve % 12,6 silisyum içeriğinde oluşur. Faz diyagramından da görülebileceği gibi Al-Si ötektiği aşağıdaki durumlarda oluşabilir:

1 - Silisyum konsantrasyonunun % 12,6 olması durumunda direkt olarak sıvıdan (tam ötektik Al-Si alaşımları için; Şekil 3.2b)

2 - Silisyum içeriğinin % 12,6'dan az olması durumunda birincil alüminyumun mevcudiyetinde (ötektik altı Al-Si alaşımları için; Şekil 3.2a)

3 – Silisyum içeriğinin % 12,6'dan fazla olması durumunda birincil silisyum kristallerinin mevcudiyetinde (ötektik üstü Al-Si alaşımları için; Şekil 3.2c)[7]



(a) (b) (c)

Şekil 3.2: Ticari alüminyum silisyum alaşımları (a) Ötektik altı Al-Si alaşımı mikroyapısı, (b) Ötektik Al-Si alaşımı mikroyapısı, (c) Ötektik üstü Al-Si alaşımı mikroyapısı [8]

3.3.1. α-Al katı çözeltisi'nin özellikleri

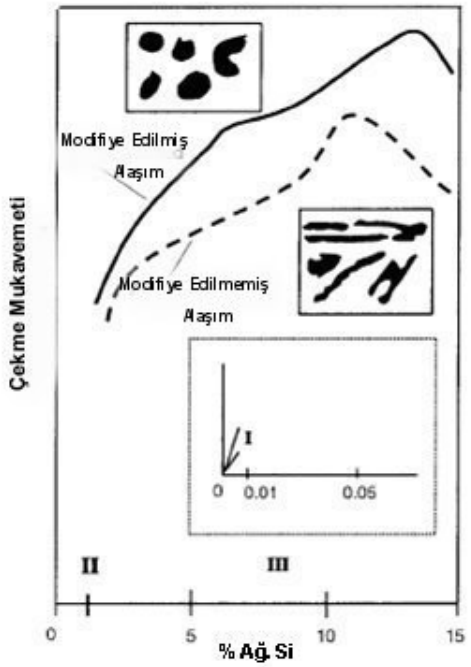
α-Al katı çözeltisi Al-Si dökümlerinin matrisidir. Alüminyum kafesinde fasetsiz dentritler halinde kristalize olur. Bu kafes yüzey merkezli kübiktir (YMK) ve A1 sembolüyle gösterilir. Koordinasyon numarası 12'dir ve ve herbir kafeste 4 atom bulunur. A1 kafesi 0,74 dolgu faktörüyle en sıkı paketlerden biridir. Bu kafesteki en sıkı düzlem {111} düzlemi iken en sıkı yön <110> yönüdür. Atomlar metlik bağ ile bağlanmıştır ve bu bağlantı için her atom elektron bulutuna 3 elektron verir. Dışardan gelen bir yük altında Al iyonları aralarındaki bağı koparmadan belli bir oranda yerlerini değiştirebilirler. Plastik deformasyon olayı bu yer değiştirmenin makro etkisidir.[8]

3.3.2. Silisyum kristallerinin özellikleri

Ticari Al-Si alaşımlarında silisyum neredeyse saf bir halde ve fasetli kristaller olarak ayrışır. Silisyum kristal kafesi A4 olarak adlandırılır ve elmas tipi kübik yapıdadır. Her atom diğer dört atoma kovalent bağ ile bağlanarak bir tetrahedron oluşturur. Silisyum kristalinin dolgu faktörü 0,34'tür. Her atom 4 valans elektronu vererek hibrit bir orbital oluşturur.[8]

3.3.3. Farklı silisyum içeriklerinin etkisi

Şekil 3.1 ve 3.3 da gösterilen denge diyagramlarında bir çok farklı Si içeriği incelenebilir. Ancak Şekil 3.3 da gösterilen I,II, III seviyeleri için silisyum etkisinin 3 farklı mekanizması mevcuttur.[8]



Şekil 3.3: Al-Si alaşımında Si içeriğine bağlı çekme mukavemeti değişimi [8]

3.3.3.1. % 0'dan 0,01'e silisyum içeriği

I seviyesinde Si atomları Al içinde katı çözelti olarak bulunur. Si atomları α-Al kafes yerlerine otururlar. Al ile Si atom çapları arasındaki farktan kaynaklanan deformasyon dislokasyon hareketlerini zorlaştırır, bu da mukavemeti artırır. Diğer alaşım elementleri de benzer şekilde etki edebilir. Ancak diğer elementlerin α-Al içindeki çözünürlükleri çok azdır. Bu nedenle eser miktarda alaşım elementi Al-Si alaşımlarının mekanik özelliklerini önemli derecede değiştirebilir. Bunun nedeni dislokasyonların yer alan atomların oluşturduğu gerilim zonlarıyla etkileşimidir.[8]

3.3.3.2. % 0,01'den 1,65'e silisyum içeriği

II seviyesinde Al içinde Si sıçaklığa bağlı bir katı çözelti oluşturur ve ince dağılımlı çökelme ile mukavemet artışı sağlar. α-Al katı çözeltisi hızlı soğuma sonucu aşırı doygun hale gelebilir. Bunun ardından dengeye ulaşma isteği sonucunda ince dağılımlı silisyum partikülleri oluşabilir. Benzer bir oluşum bakır, manganez ve magnezyum atomlarının varlığında da olur. İntermetalik ince dağılımlı partiküller de aşırı doymuş α-Al katı çözeltisinden ayrışabilir.[8]

3.3.3.3. %1,65'in üzerindeki silisyum içeriği

III seviyesindeki durumda artık iki fazlı mikroyapıya sahip malzemeler söz konusudur. Silisyum ayrı taneler olarak oluşur.[8]

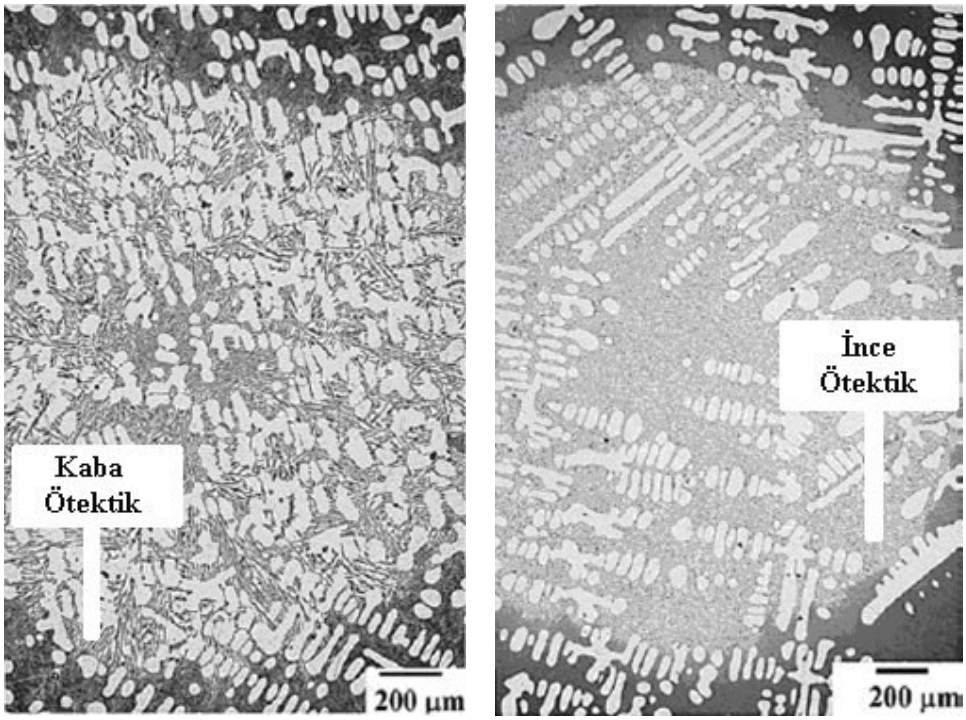
3.4. Al-Si Modifikasyonu

3.4.1. Al-Si ötektiğinin mikroyapısı

Günümüzde Al-Si ötektiğinin modifiye edilmiş ve edilmemiş olarak iki farklı mikroyapıda olabileceği bilinmektedir. Modifiye edilmemiş morfoloji kaba ve iğneseldir, yavaş soğuyan ve kimyasal modifiye ediciler kullanılmayan alaşımlarda görülür(Şekil 3.4a). Modifiye edilmemiş yapılarda derin dağlama ve yüksek büyütmelerle inceleme yapıldığında silisyum partiküllerinin yapıyla bağlantısı kopmuş izlenimi elde edilir. Başlangıçta bu görünüş sonucu her silisyum partikülünün isole halde tek bir kristal olduğuna inanılırdı. Daha sonra Gurtler isimli araştırmacı radyal silisyum partiküllerinin birincil alüminyum dendtritleri boyunca büyüdüğünü belirledi (Şekil 3.5). Ve böyle bir durumun oluşması için silisyum partiküllerinin üç boyutta da büyümesinin şart olduğunu belirledi.[8]

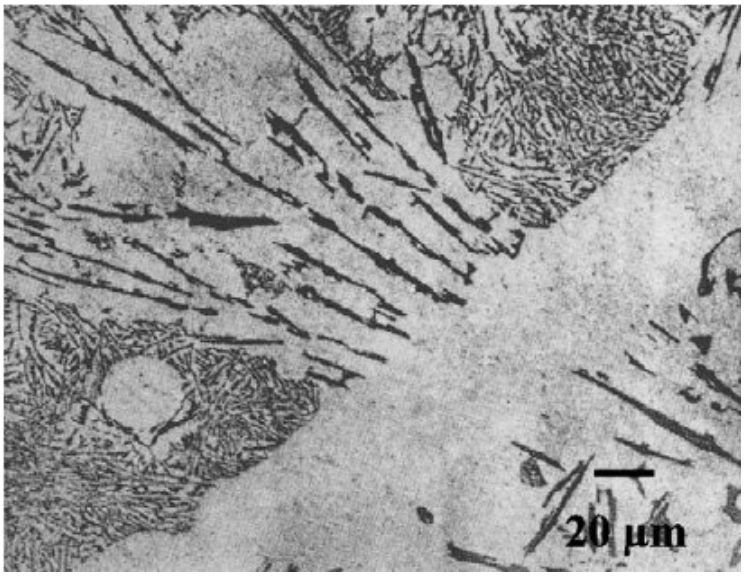
Modifikasyon işlemi sıvı haldeki alaşımın içerisine düşük miktarlarda sodyum ya da stronsiyum ilavesiyle olur. Maliyet açısından daha uygun olduğundan genel olarak ticari uygulamalarda sodyum kullanılmaktadır. Modifikasyonun oluşumu hakkında

pek çok teori bulunmaktadır. Bunlar içinden en fazla desteklenen teori sodyumun Si kristallerinin katılaşmasını geciktirmesi, böylece aşırı soğumanın artması sonucu oluşan çekirdekçik sayısının artmasıyla daha ince taneli bir yapı oluşmasıdır.



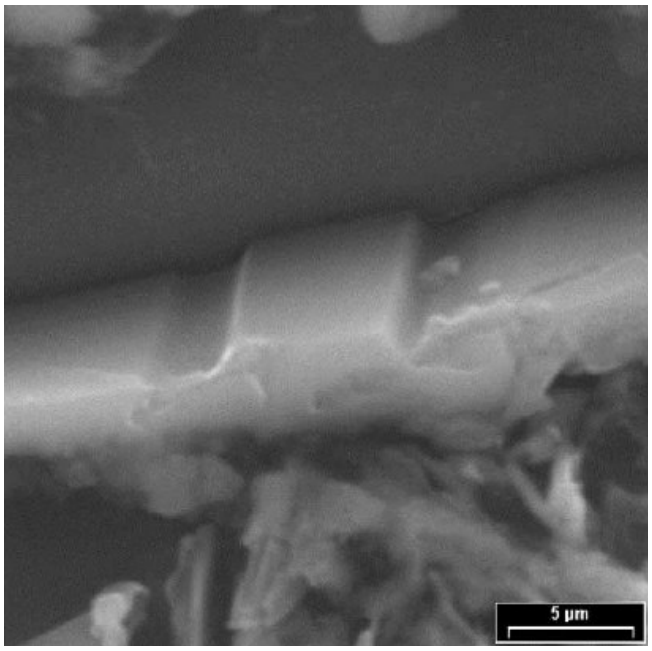
A B

Şekil 3.4: (A) modifiye edilmemiş, (B) stronsiyum ile modifiye edilmiş [8]



Şekil 3.5: Birincil alüminyum dentritleri boyunca büyümüş Si kristalleri[7]

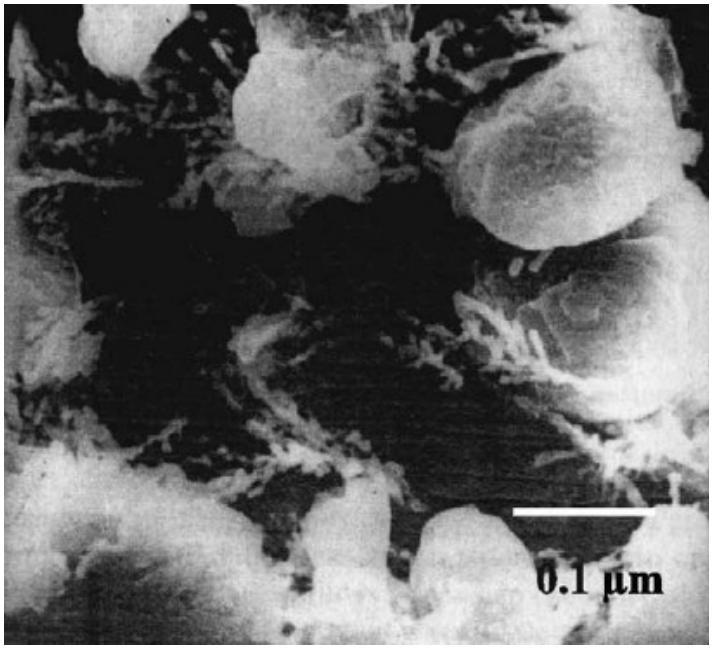
Daha sonra Crosley ve Mondolfo modifiye edilmeyen alaşımlardaki iğnesel silisyum partiküllerinin plakalar ya da yapraklar şeklinde olduğunu belirtti. Günümüzde elektron mikroskoplarının yardımıyla modifiye edilmemiş silisyum partiküllerinin yaprakçık şeklinde olduğu kesinleşmiştir. (Şekil 3.6).[7]



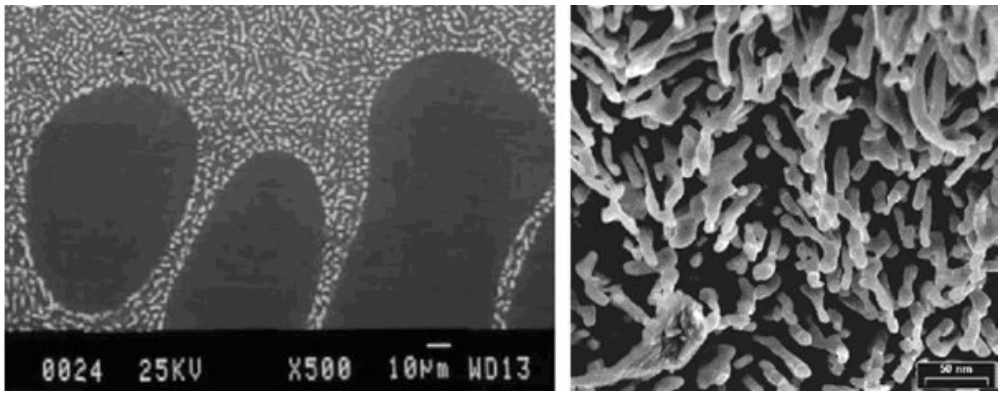
Şekil 3.6: Modifiye edilmemiş Al-Si alaşımındaki yapraksı Si partikülünün SEM görüntüsü[7]

Eğer alaşım metal kalıba döküm gibi koşullarda daha hızlı soğutulursa Al-Si ötektiği daha ince taneli ve ötektik silisyum fibersi morfolojide oluşur (Şekil 3.7).[7]

Şekil 3.8' de kimyasal olarak modifiye edilmiş bir alaşımın mikro yapısı gözükmektedir. Düşük büyütmede çekilen Şekil 3.8a'daki mikroyapıda silisyum partikülleri birbirinden izole küresel kristaller olarak görünmektedir. Ancak elektron mikroskobunda derin dağlama sonucu yapılan incelemede silisyum partiküllerinin fibersi yapısı görülmektedir (Şekil 3.8b). Kimyasal olarak modifiye edilmiş ve hızlı soğutulmuş alaşımlarda silisyumun büyüme mekanizmasının farklı olduğuna dikkat edilmelidir. [7]



Şekil 3.7: Döküm yapısında derin dağlamayla elde edilen fiber yapıdaki Si kristalleri[7]



a. b.

Şekil 3.8: Sr ile modifiye edilmiş Al-Si mikroyapısı, solda düşük büyütme, sağda yüksek büyütme ve derin dağlama [7]

4. AL-Sİ-Tİ ALAŞIMLARI

4.1. Alüminyum Alaşımlarına Titanyum İlavesinin Etkileri

Günümüzde alüminyum alaşımlarına titanyum ilavesi giderek artmaktadır. Özellikle son yıllarda titanyumun alüminyum alaşımlarındaki tane inceltme potansiyelinin belirlenmesinin ardından bu artış büyük bir ivme kazanmıştır. Titanyumdan önce alüminyum alaşımlarında tane inceltme işlemi için yoğun olarak bor ağırlıklı ön alaşımlar kullanılmaktaydı. Al hadde alaşımlarında kullanılan tane iyileştirme sistemi uzun süredir Al-Si alaşımları içinde kullanılmaktaydı. Ti, B ve Zr içeren Al-Ti, %5 Ti-%1B-Al, Al-Ti-C alaşımlarının sıvı Al içine ilavesiyle tatmin edici sonuçlar elde edilememiştir.[10] Bu çalışmaların ardından alüminyum içerisine tane inceltici olarak sadece Ti içeren ön alaşımlar katıldı. Ti ilavesinin (özelikle yaklaşık ağ % 2) aşınma direnci, çekme mukavemeti ve sertlik gibi mekanik özellikleri efektif olarak artırdığı saptanmıştır. Ancak ağ % 3 Ti ilavesi yapıldığında su verilmiş konumda birincil $Ti_7Al_5Si_{12}$ fazının ayrışması nedeniyle tatmin edici sonuçlar elde edilmemiştir. TEM analizlerine göre Ti ile alaşımlanmış Al-Si-Fe bazlı alaşımların özelliklerinin artması matris içine iyi biçimde dağılan $(Al,Si)_3Ti$ fazından kaynaklanmaktadır.[11]

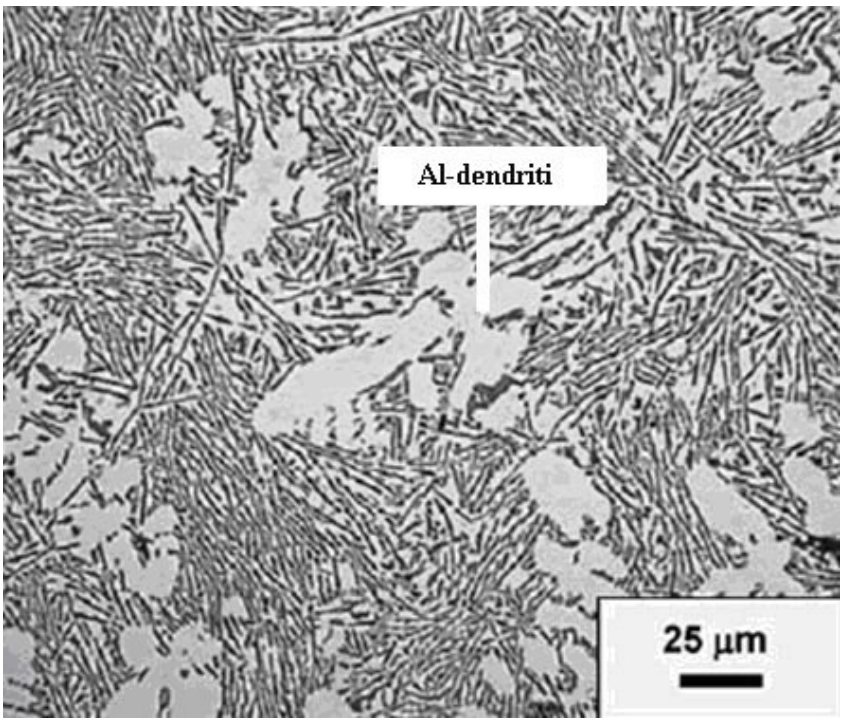
Bu güne kadar yapılan çalışmalar, titanyumun alüminyum alaşımlarına olan en büyük etkisinin tane incelmesini sağlamak olduğunu göstermiştir. Ancak tane inceltme işleminin oluşması sırasındaki en önemli nokta titanyumun alüminyumla birleşerek intermetalik kristaller oluşturması ve bu kristallerin de çekirdekleyici olarak rol oynamasıdır. Oluşan intermetalik kristallerin özelliklerine bakıldığında olayın farklı bir boyutu daha ortaya çıkmaktadır. Oluşan intermetalik fazların sertlik değerleri alüminyumdan çok daha fazladır. Bunun sonucunda bu fazların malzeme içerisinde bulunması malzemenin sertliğini artırmaktadır.

4.1.2. Titanyumun alüminyum alaşımlarında tane inceltici olarak kullanılması

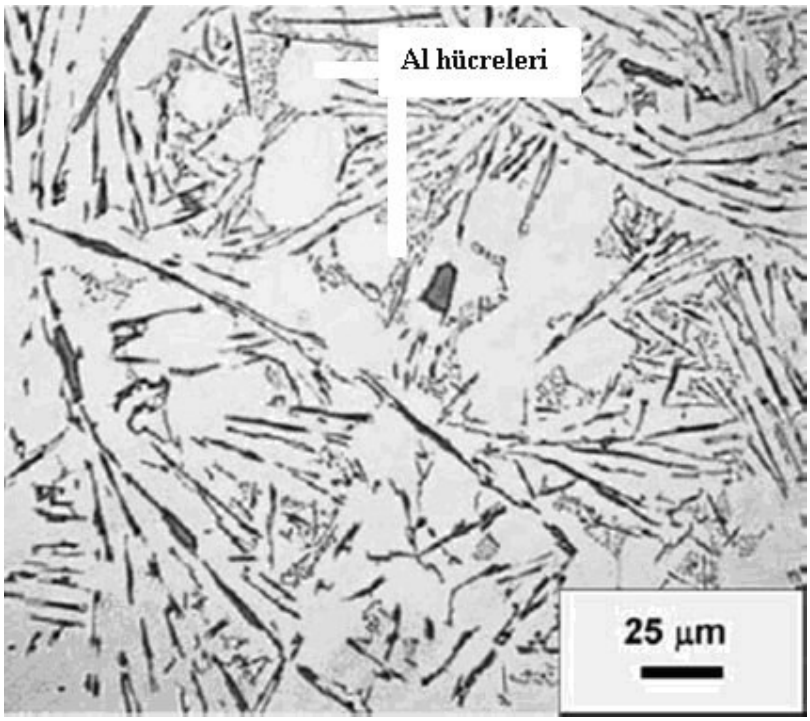
Günümüzde ticari olarak en çok kullanılan Al-Si alaşımları ya ötektik altı ya da ötektik civarı alaşımlardır. %12 Si içeren Al alaşımlarının mikro yapısı α-Al dentritleri, silisyum kristalleri ve iğnesel ya da laminar yapıdaki ötektikten oluşur.[12] Özellikle yavaş soğumanın oluştuğu koşullarda (kum kalıba döküm gibi) hem Al dentritlerinin hem de ötektik iğnesel Si tanelerinin boyutları büyümektedir. Bu durumda alaşımın mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir (Şekil 4.1).

Bu durumu ortadan kaldırmak için Al-Si ötektik yapısının modifiye edilmesi gerekmektedir. Modifikasyon işlemi için Na ya da Sr kullanıldığından daha önce bahsedilmişti. Ancak modifikasyon işleminin yanı sıra Al dentritlerinin tane boyutunun da daha küçük hale getirilmesi gerekir. Bu işlem için tane incelticiler kullanılır. Al-Si alaşımlarında sıklıkla kullanılan tane incelticiler titanyum ve bordur. Bu iki element alaşım içine önceden hazırlanmış master alaşımlar olarak verilir. Sadece Ti içeren ya da sadece B içeren tane inceltici master alaşımların olmasına rağmen en efektif sonuçlar titanyum ve borun beraber kullanılmasıyla elde edilir (Şekil 4.2).

Uygulamada tane inceltme potansiyeli nedeniyle Al-Si döküm alaşımlarına Ti ilavesi yaygın kullanılan bir yöntemdir. Ancak Ti varlığı döküm mikroyapısında büyük boyutlu intermetaliklerin ayrışmasına neden olabilir. Bu durumda sıvı metalin işlenmesinde sorunlar yaratabilir ve dökümde hatalara neden olabilir. İkili Al-Ti sisteminde TiAl intermetaliklerinin oluşmasıyla ilgili birçok kaynak mevcuttur, ancak bulunanların çoğu tane inceltmesi üzerinedir. Çok kullanılan Al-Si döküm alaşımlarındaki TiAlSi intermetaliklerinin oluşumu ve büyümesi üzerine literatürde çok az çalışma mevcuttur.[13]



Şekil 4.1: Al - %12 Si ticari alaşımı. Döküm yapısında oluşan dentritik Al taneleri görülmektedir[12]



Şekil 4.2: %0,03 Ti içeren Al - %12Si ticari alaşımı. Ti etkisiyle dentritik Al tanelerinin hücreler halinde katılaştığı görülmektdir[12]

Tane inceltme işleminin mekanizmasında sıvı metal içinde döküm sıcaklığında bile katı halde bulunacak intermetalik parçacıklar oluşması istenir. Katı haldeki bu partiküller döküm sonrasında alaşımın üzerinde katılaşacağı heterojen çekirdek bölgeleri oluşturur. Sıvı metal içinde döküm işlemi sonrasında ne kadar çok partikül oluşursa oluşan tane sayısı o kadar fazla olur. Tane sayısının artması ise kaçınılmaz olarak tane boyutunun küçülmesiyle sonuçlanır. Titanyum ve borun beraber kullanıldığı tane incelticilerde TiB_2 partikülü, sadece titanyumun kullanıldığı tane incelticilerde ise Al_3Ti intermetalikleri çekirdekleyici olarak görev yapar. Ancak alaşım içerisinde yüksek miktarda silisyumun bulunduğu koşullarda silisyumun Al_3Ti çekirdeklenme yörelerini etkilediği ve titanyumun tane inceltme yeteneğini olumsuz olarak etkilediği belirlenmiştir**.**[14]

Teorik olarak TiB_2 intermetaliğinin oluşması için gereken Ti/B ağırlık oranı yaklaşık 2,2/1'dir. Ancak ticari olarak üretilen tane iyileştiriciler 3Ti-1B,5Ti-1B,5Ti- 0,2B gibi daha yüksek Ti/B oranlarına sahiptir.[12]

Ticari uygulamalarda % 0,015'e kadar kullanılan normal Ti içeriklerinin tane inceltmek için kullanışlı olmakla beraber % 0,15 civarındaki Ti ilaveleri tane yapısının kabalaşmasına neden olduğu gözlenmiştir.[15] Ancak TiB_2 partiküllerinin aglomerasyonu özellikle folyo ve elektrik iletkenliği için kullanılacak malzemelerde problem yaratır. Al-Ti-B alaşımlarının bu handikapları nedeniyle Al-Ti-C master alaşımları geliştirilmiştir. Al-Ti-B alaşımlarına kıyasla Al-Ti-C alaşımlarında TiC bileşiğini tane inceltici olarak kullanarak az da olsa gelişme sağlanmıştır. Al-Ti-C master alaşımlarında en büyük sorun Al-Ti eriyiği ile karbonu alaşımlamaktır. Bunun yanında TiC'ün tane inceltme potansiyelini azaltan Al_4C ve Ti_3AlC_5 gibi bileşiklerin oluşumu da problem yaratmaktadır.[16]

4.1.3. Titanyumun alüminyum alaşımlarında alaşım elementi olarak kullanılması

Titanyumun Al içerisinde alaşım elementi olarak kullanımı günümüzde yeni yeni kullanılan bir yöntemdir. Ticari olarak kullanımı çok az olmakla beraber bu alaşımlar

üzerinde yapılan bilimsel çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Tane inceltici olarak kullanıldığında titanyumun en önemli özelliği oluşturduğu intermetalik kristallerin çekirdekleyici olarak görev yapmasıydı. Alaşım elementi olarak kullanıldığında da yine en büyük önem oluşan intermetaliklerdedir. Çünkü yumuşak alüminyum matrisi içinde oluşacak olan sert titanyum intermetalikleri yapının mukavemet ve sertlik gibi özelliklerini artıracaktır. Bu nedenle Al-Si ötektik alaşımlarında titanyumun alaşım elementi olarak kullanılmasının amacı ve etkilerini anlayabilmek için bu sistem içerisinde oluşan intermetalik yapıların bilinmesi gerekir.

Bu fazların kimyasal kompozisyonu malzeme içindeki Ti oranına göre değişiklik gösterir. Oluşan intermetalikler üç gruba ayrılabilir:

Al-Ti bileşikleri ($TiAl_2$, Ti_9Al_{23}, TiAl..vb.)
Si-Ti bileşikleri (Ti_5Si_4 ve Ti_5Si_3)
Al-Si-Ti bileşikleri ($Ti_3Al_2Si_5$ ve Ti_3AlSi_5) [1]

4.2. Ti-Al İkili Sistemi

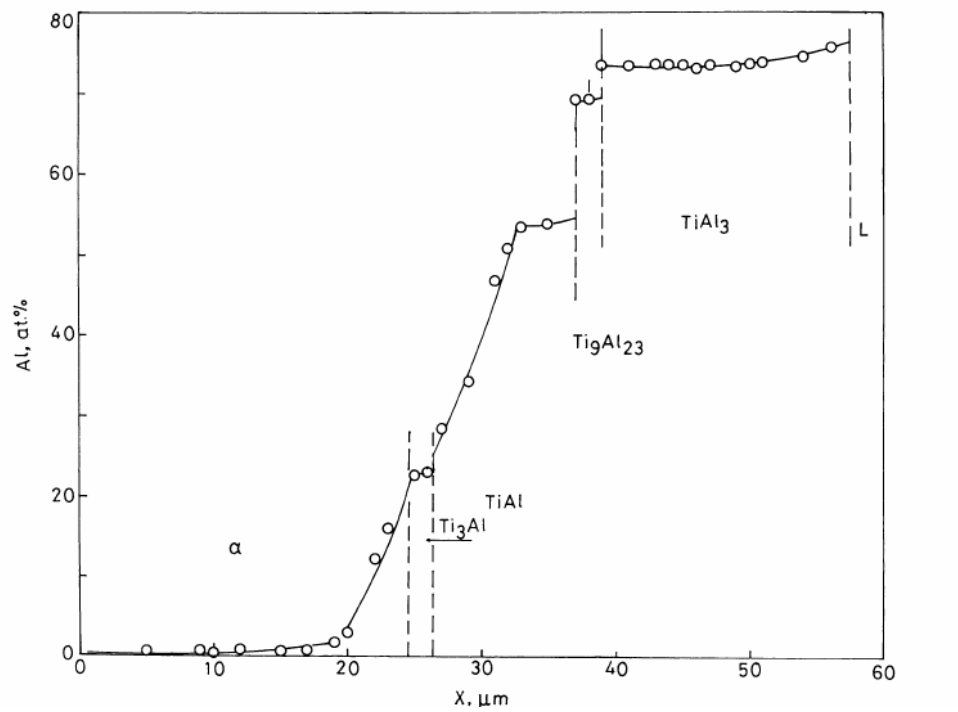
İkili Al-Ti sisteminde $TiAl_3$ intermetaliğinin oluşumu pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalar genel olarak titanyum alüminidlerin tane inceltici etkisi üzerine olmuştur. İkili konumda alaşım Al ve Ti'den oluşmaktadır. Sistemin Al'ca zengin köşesinde yaklaşık olarak % 1,2 Ti bileşimi ve 665°C sıcaklıkta $L + TiAl_3 \leftrightarrow \alpha$-Al peritektik reaksiyonu oluşur. $TiAl_3$ intermetalikleri ağırlıkça % 36,5–37,5 arası Ti içerirler ve 3370kg/m^3 yoğunluğa sahiptirler. Al ile olan büyük yoğunluk farkında dolayı $TiAl_3$ partikülleri sıvı Al içinde dibe doğru gitme eğilimindedirler.[17]

Sıvı Al içinde Ti çözünürlüğü literatürdeki bilgilerde %0,12 ile 0,15 arasında değişmektedir. Bu miktardan fazla katılan titanyum alüminyum ile birleşerek yapıda ikincil intermetalik fazları oluşturmaktadır.

$TiAl_3$ intermetaliklerinin katılaşma koşulları ve alaşımın ısıl geçmişine göre üç farklı şekilde oluştuğu belirlenmiştir (yaprak, iğnesel ve blokvari). Yüksek sıcaklıktan yavaş soğutma yapraksı partiküllere neden olur. Hızlı soğutma ve yüksek ısıl

gradiyent iğnesel oluşumlara neden olur. Eğer alaşım göreceli düşük sıcaklıkta üretildiyse ve yüksek Ti içeriyorsa kübikten uzun tabakalara değişkenlik gösteren bloklar oluşur.[13]

Genel olarak alüminyum titanyum alaşımlarında titanyum miktarı düşük olduğundan oluşma ihtimali yüksek olan intermetalik bileşik $TiAl_3$'tür. Ancak Ti-Al ikili sisteminde daha farklı bileşimlerde de intermetalikler oluşmaktadır. Bu intermetalikleri belirlemek için Shant Prakash Gupta oldukça geniş çaplı bir çalışma yapmıştır. Çalışmasında titanyum ve alüminyum metallerini temas halinde farklı sıcaklıklarda farklı süreler tutarak oluşan intermetalikleri incelemiştir. Gupta aynı işlemleri Ti-AlSi ötektik çifti içinde tekrarlamış ve bu sistemde oluşan üçlü ötektikleri de incelemiştir. Gupta'nın 900 °C'de yaptığı test sonucu elde ettiği verilerden oluşturduğu bileşim uzaklık grafiği Şekil 4.3'te görünmektedir. Şeklin sol tarafı titanyum metalini sağ tarafı ise alüminyumu göstermektedir. 900 °C'de alüminyum sıvı halde olduğundan grafikte L (liquid) ile gösterilmiştir. Grafikte ayrıca difüzyon çiftinde oluşan intermetalik bileşikler de belirtilmiştir.[18]

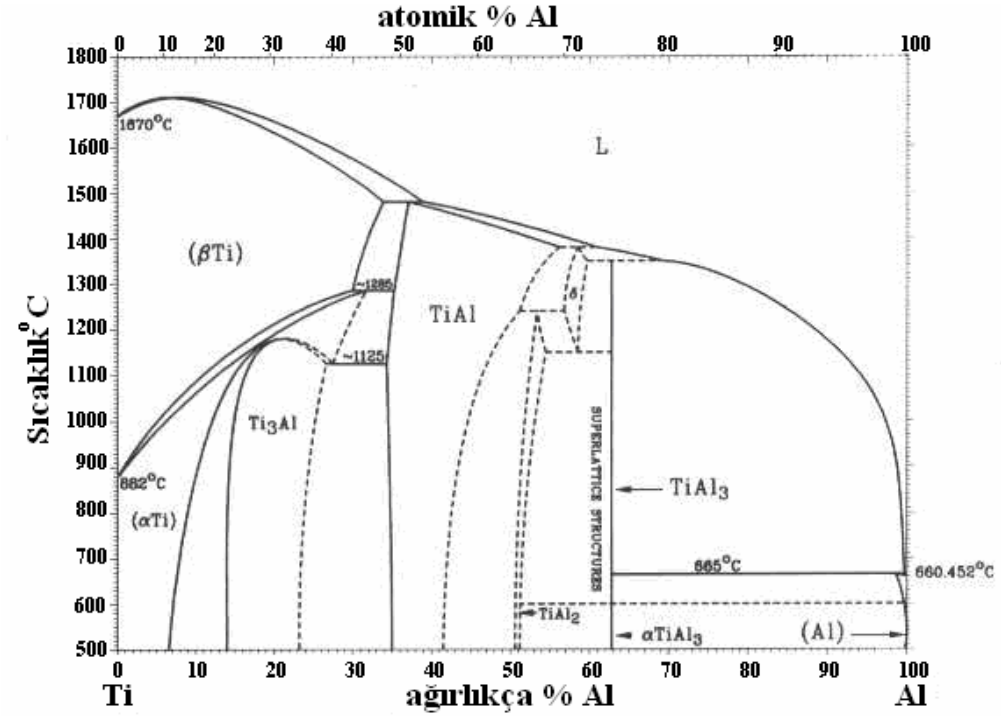


Şekil 4.3: 900°C'de tavlanan numunenin kompozisyon-uzaklık grafiği ve oluşan intermetalik fazlar[18]

Titanyum ve Al-Si alaşımı temas halinde yüksek sıcaklıklara çıkarıldığında çok farklı bileşimlerde intermetalik fazlar oluşabilmektedir.

Saf Al-Ti difüzyon çifti 900˚C'ye çıkınca Al metali sıvı hale geçer. Sıvı Al Ti yüzeyine yayılıp ince bir film oluşturur. Ti-Al faz diyagramına (Şekil 4.4) göre 900˚C için şu fazların oluşması gerekir: Sıvı (Al), $TiAl_3$, Ti_9Al_{23}, $TiAl_2$, TiAl, Ti_3Al, (Ti).[18]

Gupta tarafından yapılan deneysel çalışma sonucu difüzyon çiftinin üst kısmında koyu bir matris (Al) içinde küreler halinde $TiAl_3$ fazı görülmüştür. Sürekli soğuma ile birlikte $TiAl_3$ fazının relatif miktarı artmaktadır. Sıvı faz Al tarafından zenginleştirilir ve $TiAl_3$ ile reaksiyona girip Al katı çözeltisi oluşturacak peritektik kompozisyonu yakalar. Katılaşmış sıvıya komşu olarak bazı ara fazlarda oluşur. Testte kullanılan numunede intermetalik tabakalar faz diyagramına benzer olarak şu sırayla oluşmuştur: Sıvı (Al), $TiAl_3$, Ti_9Al_{23}, TiAl, Ti_3Al. Deneyde kullanılan numunede faz diyagramında oluşumu gözüken $TiAl_2$ fazına rastlanmamıştır.[18]



Şekil 4.4: Alüminyum-titanyum faz diyagramı[19]

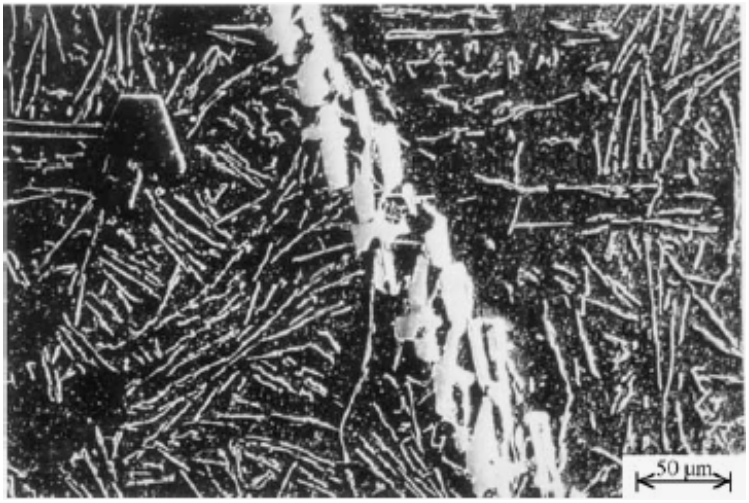
4.3. Ti-Al-Si Üçlü Sistemi

Üçlü Al-Si-Ti sisteminin alüminyumca zengin köşesinde üç tip titanyum alüminid oluşumu muhtemeldir:

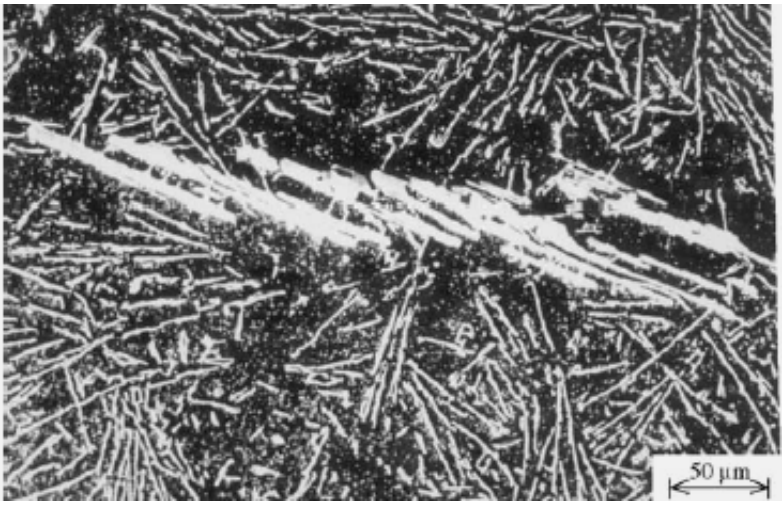
1.$TiAl_3$: $TiAl_3$ kafes yapısında alüminyum % 15'e kadar Si ile yer değiştirebilir. Bunun sonucunda farklı kimyasal kompozisyonlar ve belli bir aralıkta değişkenlik gösteren kafes parametreleri gözlenir. Bu faz genel olarak $Ti(AlSi)_3$ olarak gösterilir (Şekil 4.5).

2.τ_1: Genel olarak $Ti_7Al_5Si_{12}$ formülü ile gösterilir. Bu faz 900 °C'nin altında kararlıdır.

3.τ_2: Genel olarak $Ti(AlSi)_2$ olarak gösterilir. Yüksek miktarda silisyum varlığında oluşan bir fazdır ve % 38–46 Si içeriğine sahiptir (Şekil 4.6).[17]



Şekil 4.5: 1000˚C'de 1,25 saat tavlanmış ve havada soğutulmuş Ti-Al-Si difüzyon çifti numunesinin mikro yapısı, $TiAl_3$ dentritleri ve Al-Si ötektiği[18]



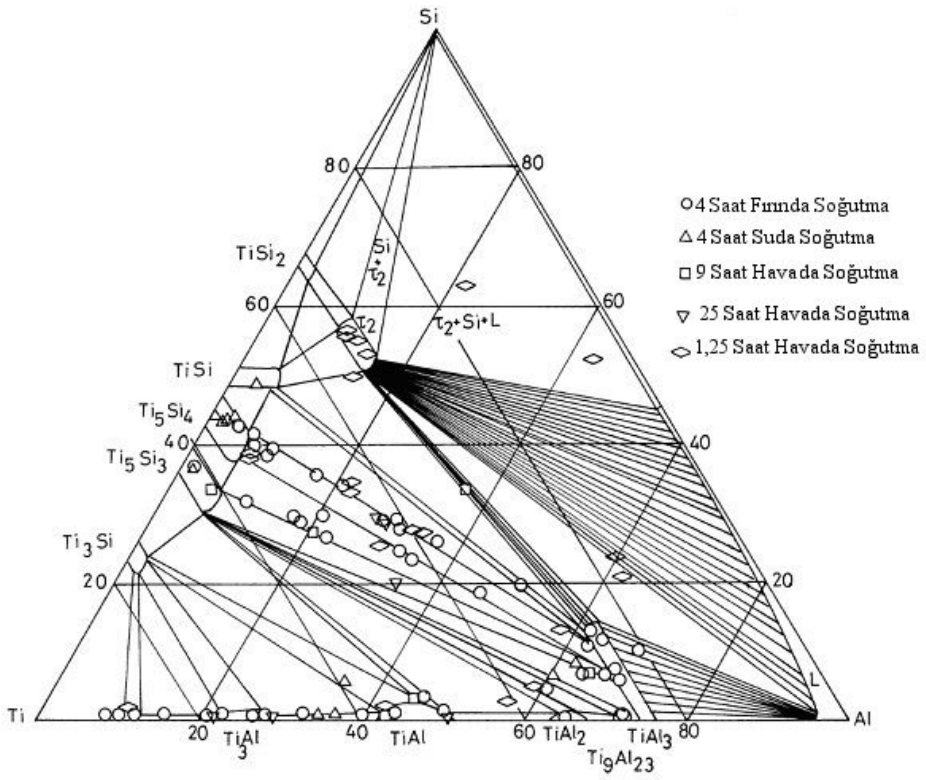
Şekil 4.6: 1000˚C'de 1,25 saat tavlanmış ve havada soğutulmuş Ti-Al-Si difüzyon çifti numunesinin mikro yapısı,τ_2 fazı plakaları ve Al-Si ötektik yapısı[18]

Sistemin Al köşesinde oluşabilecek fazlar Tablo 4.1'de özetlenmiştir. Oluşan üçlü fazların hepsinin kimyasal kompozisyonlarının ve kafes parametrelerinin belli aralıklar içinde değişkenlik göstermesi bu fazların belirlenmesini güçleştirmektedir. Döküm alaşımlarındaki TiAlSi üçlü intermetaliklerinin morfolojisinin ikili $TiAl_3$ intermetaliğine benzer olduğu belirlenmiştir (örn: plakalar, bloklar gibi). Ancak halen bu morfolojilerin hangi koşullarda oluşmayı tercih ettikleri belirlenememiştir.[17]

Tablo 4.1: Üçlü Al-Si-Ti sisteminin alüminyumca zengin köşesinde oluşabilecek fazlar[17]

Yaygın İsim	**Faz Kimliği**	**Kimyasal Aralık**
$Ti(AlSi)_3$	$Ti(Al_{1-x}Si_x)_3$	$0 \leq x \leq 0,15$
τ_1 ya da $Ti_7Al_5Si_{12}$	$(Ti_{1-x}Al_x)_8(Al_ySi_{1-y})_{16}$	$x \approx 0,12$, $0,06 \leq y \leq 0,25$
τ_2 ya da $Ti(AlSi)_2$	$Ti(Al_xSi_{1-x})_2$	$0,15 \leq x \leq 0,30$

Şekil 4.7'te 1000 °C' de farklı süre ve farklı soğuma koşullarında gerçekleştirilen bir difüzyon testinde elde edilen kompozisyonların Ti-Al-Si Gibbs üçgeninde gösterilmesi verilmiştir. Bu şekilden hangi fazların ne tarz koşullarda oluştuğu hakkında fikir yürütmek mümkündür. Ancak konuyla ilgili fazla çalışma olmadığından kesin bir hükme varmak mümkün değildir.



Şekil 4.7: 1000 °C'de tavlanan difüzyon çiftlerinin kompozisyonlarının Gibbs Üçgeninde gösterilmesi[18]

Yukarıda sayılan ve özellikleri açıklanan intermetalik bileşikler Al-Ti-Si üçlü faz sisteminin alüminyum köşesinde oluşan yapılardır. Bu sistemde titanyum ve silisyumun daha çok bulunduğu faz alanlarında daha farklı bileşimlerde ikili ve üçlü intermetalikler oluşmaktadır. Bu intermetaliklerin bileşimleri Gupta tarafından yapılan bir dizi difüzyon testiyle belirlenmiştir. Tablo 4.2'de Al-Ti-Si sisteminin tüm intermetalikleri farklı sıcaklık ve soğuma şartlarındaki bileşimleriyle birlikte verilmiştir.

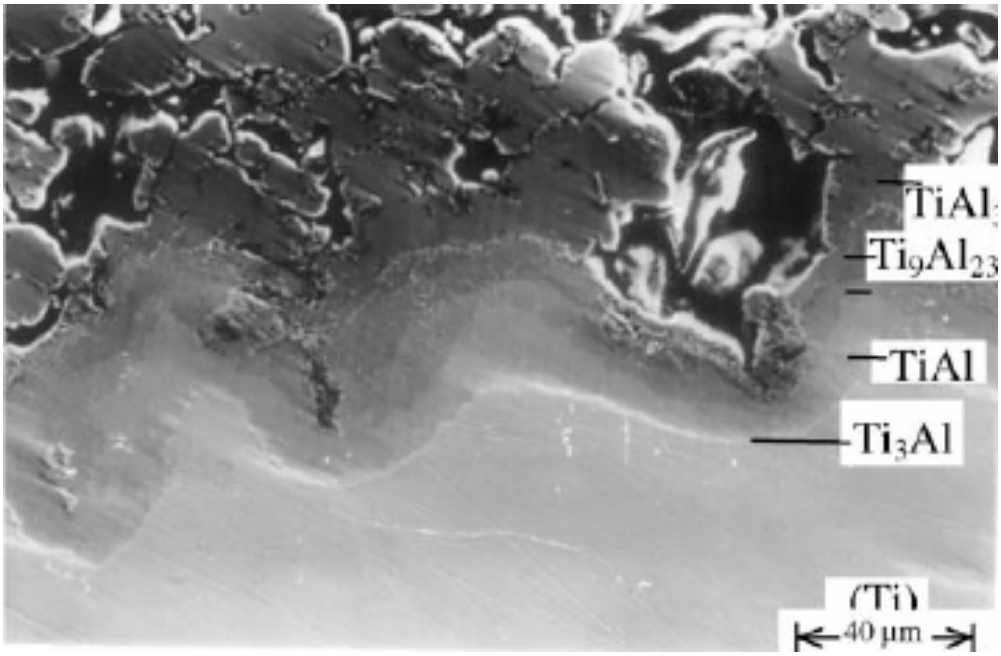
Tablo 4.2: Ti-Al-Si difüzyon çiftlerinde oluşan ikili ve üçlü intermetalik fazların atom-% olarak kompozisyonları ve oluşmaları için gereken sıcaklık ile soğuma şartları[18]

Fazlar		700 °C 16 saat	800 °C 6 saat	800 °C 25 saat	900 °C 3 saat A*	1000 °C 1025 saat A*	1000 °C 4 saat FC*
$TiAl_3$	Ti	24,93	25,23	25,32	24,58	24,75	24,24
	Al	64,91	60,42	65,47	64,637	61,95	63,81
	Si	13,15	14,34	9,20	13,78	13,29	1,95
τ_2	Ti	33,41	32,71		32,96	32,94	
	Al	12,29	12,55		12,81	11,20	
	Si	54,55	54,74		54,22	55,85	
TiAl	Ti	54,04	46,85		49,55	47,53	
	Al	44,50	51,78		49,00	51,48	
	Si	01,45	01,36		01,45	00,98	
Ti_3Si_5	Ti				61,05		61,47
	Al				05,12		06,98
	Si				33,82		31,54
T_1	Ti	30,90				31,30	
	Al	17,75				15,73	
	Si	51,34				52,96	
$TiAl_2$	Ti				35,30	36,20	
	Al				62,89	59,24	
	Si				01,80	04,55	
Ti_5Si_4	Ti					54,12	53,76
	Al					07,89	07,58
	Si					37,97	38,64
Ti_9Al_{23}	Ti				27,93	29,38	
	Al				65,19	63,79	
	Si				06,87	06,80	
Ti_3Al	Ti		75,14		73,31	73,31	
	Al		23,75		26,13	26,26	
	Si		01,106		00,56	00,60	

* A: Havada soğutulmuş

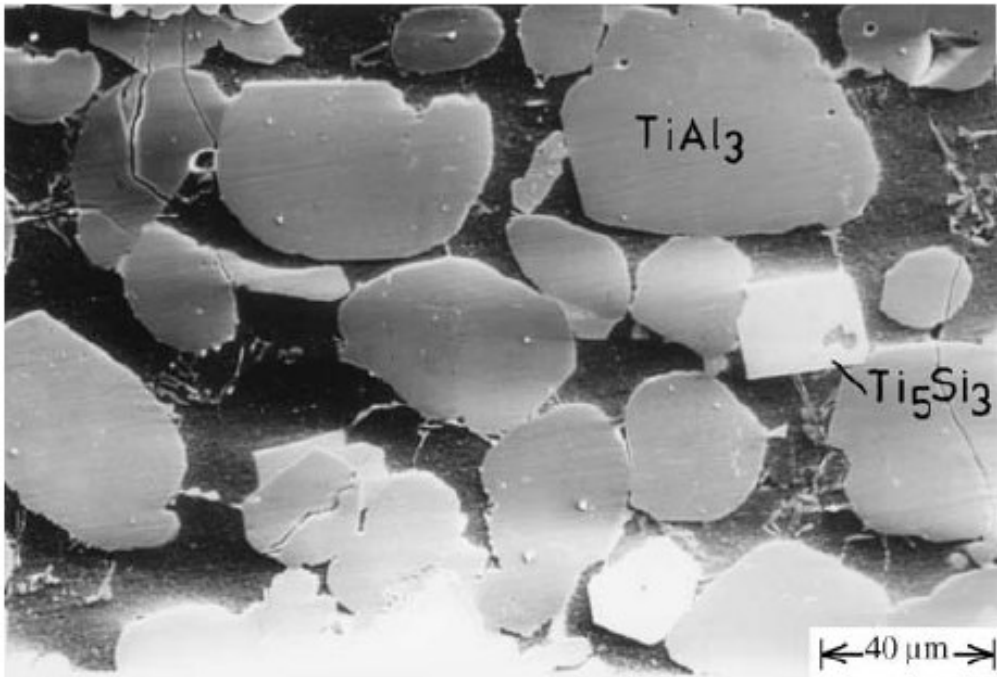
** FC: Fırında soğutulmuş

Al-Ti-Si üçlü sisteminde oluşan intermetalikler bileşimlerine ve malzemenin ısıl geçmişine göre çok farklı morfolojilerde olabilmektedir. Şekil 4.8'de 900 ˚C'de 9 saat tavlanmış Ti-Al-Si difüzyon çiftinde $TiAl_3$, Ti_9Al_{23}, $TiAl_2$, TiAl, Ti_3Al sırasıyla oluşan intermetalik lamelleri gözükmektedir.



Şekil 4.8: 900˚C'de 9 saat tavlanan Ti-AlSi difüzyon çiftinde $TiAl_3$, Ti_9Al_{23}, $TiAl_2$, TiAl, Ti_3Al sırasıyla oluşan intermetalik fazlar[18]

Şekil 4.9' da ise 900˚C'de 9 saat tavlanan numunede oluşan küresel $TiAl_3$ ve köşeli kristaller halinde Ti_5Si_3 intermetaliklerinin görüldüğü mikroyapı bulunmaktadır.



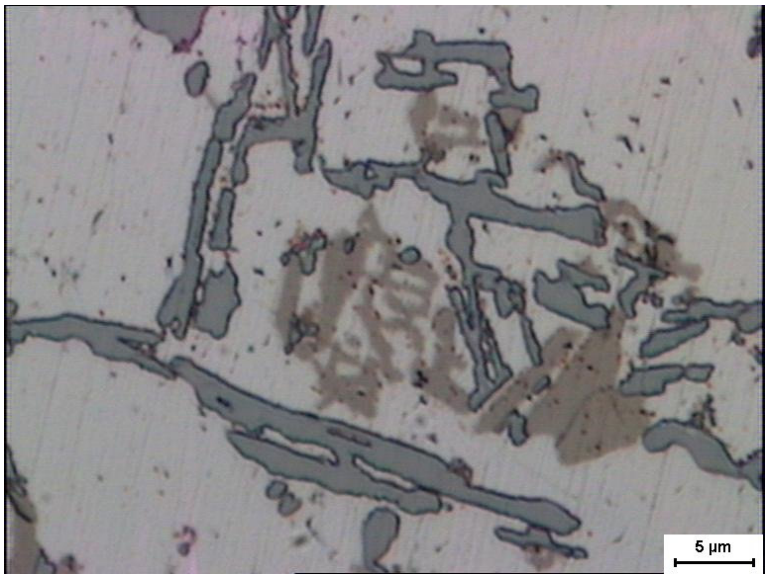
Şekil 4.9: 900 ˚C'de 9 saat tavlanan Ti-AlSi difüzyon çiftinde küresel $TiAl_3$ ve köşeli kristaller halinde Ti_5Si_3 bileşiği[18]

4.4. Al-Ti ve Al-Si-Ti Sistemlerinde İntermetalik Fazların Morfolojisi

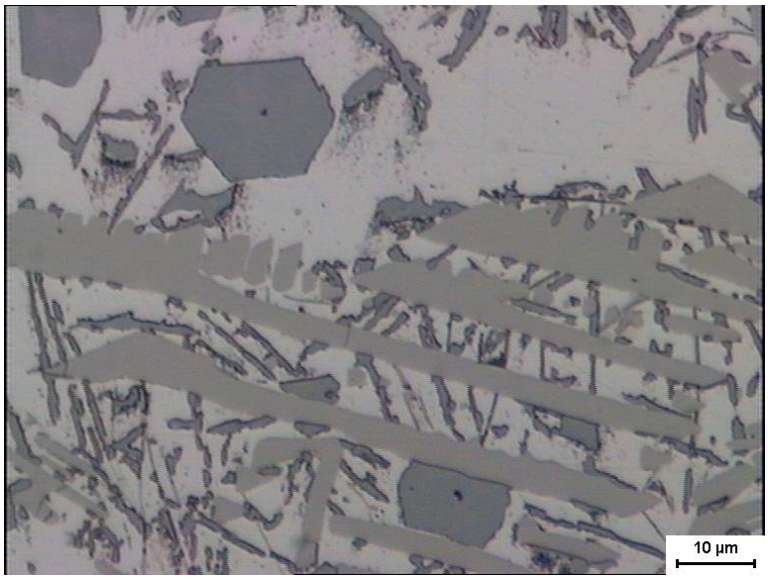
$TiAl_3$ intermetaliklerinin katılaşma koşulları ve alaşımın ısıl geçmişine göre üç farklı morfolojide oluştuğu belirlenmiştir. Bu morfolojiler yaprak tipi, iğnesel tip ve blokvari tip morfoloji olarak tanımlanabilir. Yüksek sıcaklıktan yavaş soğutma yapraksı partiküllere neden olur. Hızlı soğutma ve yüksek ısıl gradiyent iğnesel oluşumlara neden olur. Eğer alaşım göreceli düşük sıcaklıkta üretildiyse ve yüksek Ti içeriyorsa kübikten uzun tabakalara değişkenlik gösteren bloklar oluşur.[17]

Yapılan deneysel çalışmada aynı döküm ve soğuma şartlarında alaşımın titanyum içeriğinin de intermetalik fazların morfolojisini etkilediği belirlenmiştir. % 0,1 ve 1 titanyum içeren alaşımlarda yapraksı morfolojiye sahip intermetalik kristalleri bulunurken, % 2 ve yukarısında titanyum içeren alaşımlarda plaka (iğnesel) tipi intermetalikler belirlenmiştir.

Şekil 4.10 %1 titanyum içeren Al-Si ötektik alaşımının mikroyapısı gözükmektedir. Yapıda beyaz alanlar alüminyum matris, gri alanlar ötektik silisyum ve kahverengi faz ise $TiAl_3$ fazıdır. Şekil 4.11'da ise % 5 titanyum içeren Al-Si ötektik alaşımı mikroyapısı gözükmektedir. Yapıda açık kahverengi uzun plakalar halinde gözükenler $TiAl_3$ intermetalikleridir.



Şekil 4.10: %1 Ti İçeren Al-Si ötektik alaşımında oluşmuş yapraksı morfolojideki $TiAl_3$ intermetaliği



Şekil 4.11: % 5 Ti İçeren Al-Si ötektik alaşımında oluşmuş plaka tipi morfolojideki $TiAl_3$ intermetaliği

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1 Al-Si-Ti Alaşımlarının Dökümü

Deneysel çalışmada kullanılan alaşımların dökümünde Repamet markalı grafit potalı indüksiyon ocağı kullanılmıştır. Bu ocağın döküm kapasitesi 100–120 gr alüminyum aralığında olup çıkabildiği maksimum sıcaklık ise 1100 °C'dir.

Alaşımlama için gerekli olan titanyum bölümümüzde bulunan PREP (Plazma Destekli Dönel Elektrot Prosesi) mekanizmasında kullanılan Ti6Al4V çubuklarından sağlanmıştır. Bu sistemde toz üretimi için kullanılan elektrot çubukların yatağa bağlandığı yaklaşık 15 cm'lik bölgesi kullanılamamaktadır. PREP sisteminden artan bu 15 cm uzunluğundaki çubuklar önce torna ile 1 cm kalınlığında dilimlere ayrılmış ardından da hassas kesme ile uygun boyutlara getirilerek eriyiğe ilave edilmiştir.

Döküm işleminde öncelikle grafit pota yüksek sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Ardından ötektik bileşimdeki Al-Si alaşımı ocağa atılmış Al-Si alaşımı tamamen sıvı hale geldikten sonra ise içerisine alaşım çeşidine göre istenilen oranda Ti ilavesi yapılmıştır. Titanyumun tamamen ergimesi için 15–20 dakika beklenip döküm metal kalıba yapılmıştır. Yapılan ilk dökümlerde titanyum ilavesinden sonra 15-20 dakika beklenmesine rağmen titanyumun sıvı metal içinde çözünmeden kaldığı görülmüştür. Bu durumun sebebi olarak titanyumun uygun boyutlara getirilmek için kesilirken soğutma amaçlı kullanılan su teması nedeniyle oksitlenmiş olabileceği akla gelmiştir. Daha sonra tekrar edilen döküm işlemlerinde sıvı metal içerisine atılacak olan titanyum parçacığı yüzeyi kuru şekilde zımparalanarak temizlenmiştir. Temizlenmiş konumda sıvı metal içerisine atılan titanyum parçacık eriyikte çözünmüştür. Döküm işlemi sırasında sıvı metal yaklaşık 1100 °C'dir. % 0,1 , % 1, % 2, % 3, % 5, %10 Ti içeren ve hiç titanyum içermeyen alaşımların dökümleri gerçekleştirilmiştir. Döküm işleminden sonra malzeme kendi halinde soğumaya bırakılmış ve tamamen oda

sıcaklığına geldiğinde kalıp açılmıştır. Şekil 5.1'de dökümden çıkmış numuneler resmi görülmektedir. Şekil 5.2'de ise döküm işleminin gerçekleştirildiği mini indüksiyon ocağı görülmektedir.



Şekil 5.1: Dökümden sonraki numunelerin görüntüsü



Şekil 5.2: Döküm işlemlerinin gerçekleştirildiği mini indüksiyon ocağı

5.1.1 Döküm laboratuvarının kurulumu

Bu tez çalışması sırasında döküm işlemlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla Bölümümüze üç adet indüksiyon ocağı alınmıştır. Alınan bu ocaklardan ilki İnductotherm marka olup 8 kilogram çelik dökme kapasitesine sahiptir. 15 KW gücünde olan bu ocağın satın alınmasından sonra kurulumu ve devreye alınması gerçekleştirilmiş ve bu ocakta yapılan ergitme işlemleriyle dökümler gerçekleştirilmiştir.

Bölümümüze alınan ikinci indüksiyon ocağı ise Repamet markalı olup 100-120 gr alüminyum döküm kapasitesine sahip mini bir ocaktır. Tez çalışması sırasında yapılan dökümler için bu ocak kullanılmıştır. Ocağın çıkabileceği maksimum sıcaklık 1100 °C olup bu ocakla bakır metali ve alaşımları dökümü de gerçekleştirilmiştir.

Bölümümüz döküm laboratuvarlarına son olarak kazandırılan ocak ise yine İnductotherm marka bir indüksiyon ocağıdır. Satın alınan bu üçüncü ocak 15 kilogram çelik döküm kapasitesine sahip olup 25 KW gücündedir. Şekil 5.3'te İnductotherm markalı ocaklar görülmektedir.

Alınan bu üç ocaktan ikisi devreye alınıp çalıştırılmıştır. Son alınana 15 kg'lık ocak ise taşınma gerekçesiyle henüz devreye alınamamıştır. Ocaklar dışında döküm sonrası temizleme için bölümümüze bir adet kumlama cihazı alınıp devreye sokulmuştur. Tüm bu çalışmalar yapılan bu tez çalışmasıyla paralel bir şekilde yürütülmüştür.



A B

Şekil 5.3: Döküm laboratuvarına tez çalışmasıyla paralel olarak kazandırılan İnductotherm indüksiyon ocakları (A) 25 kw 15 kg kapasiteli ocak, 15 kw 8 kg kapasiteli ocak

5.2 Mikroyapısal İnceleme

5.2.1 Işık mikroskobu

Döküm yapılan tüm numunelerde ilk olarak mikroyapısal inceleme yapılmıştır. Mikroyapısal inceleme için numuneler uygun boyut ve şekillerde kesilip metalografik işlemlere hazır hale getirilmiştir. Metalografik inceleme için numune hazırlamada 320, 600 ve 1000 mesh numaralı SiC zımparalar kullanılmıştır. Zımparalama işleme döner disklerde sürekli su akışıyla birlikte yapılmıştır. İnce zımparalama (1000 mesh nolu.) işlemi tamamlandıktan sonra numuneler parlatma işlemine tabii tutulmuştur. Parlatma işlemi yine döner disk üzerinde 3 μm boyutlu elmas pasta kullanılarak yapılmıştır. Metalografik numune hazırlamada tamamlanan her aşamada bir sonraki işlem aşamasına geçmeden önce numune musluk suyu, saf su ve etil alkol ile yıkanıp fan yardımıyla kurutulmuştur.

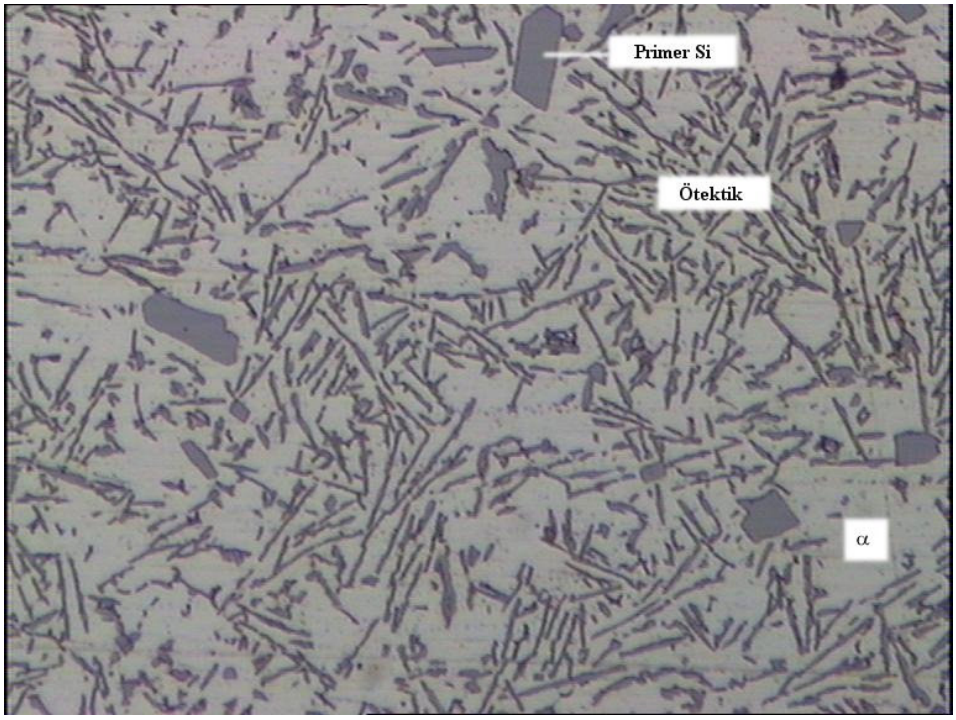
Hazırlanan numuneler optik mikroskoplarda değişik büyütmelerde incelenip titanyumun mikroyapıya etkisi incelenmiştir. Numuneler incelenmesinde Zeiss

Axiophot ışık mikroskobu kullanılmıştır (Şekil 5.4). Optik mikroskopta yapılan inceleme sırasında numuneler hem parlatılmış konumda hem de dağlanmış konumda incelenmiştir. Dağlama işlemi için Keller reaktifi (2,5 ml HNO_3, 1,5 ml HCl, 1,0 ml HF ve 95,0 ml H_2O) kullanılarak yapılmıştır.

Şekil 5.5'de Al-Si ötektik alaşımının mikro yapısı görülmektedir. Standart bir mikroyapı olan Al-Si ötektik yapısı birincil Si kristalleri, ötektik yapı ve birincil α–Al kristallerinden oluşmaktadır. Alaşıma herhangi bir modifikasyon işlemi uygulanmadığından ötektik yapıdaki silisyum kristalleri iğnesel konumdadır.

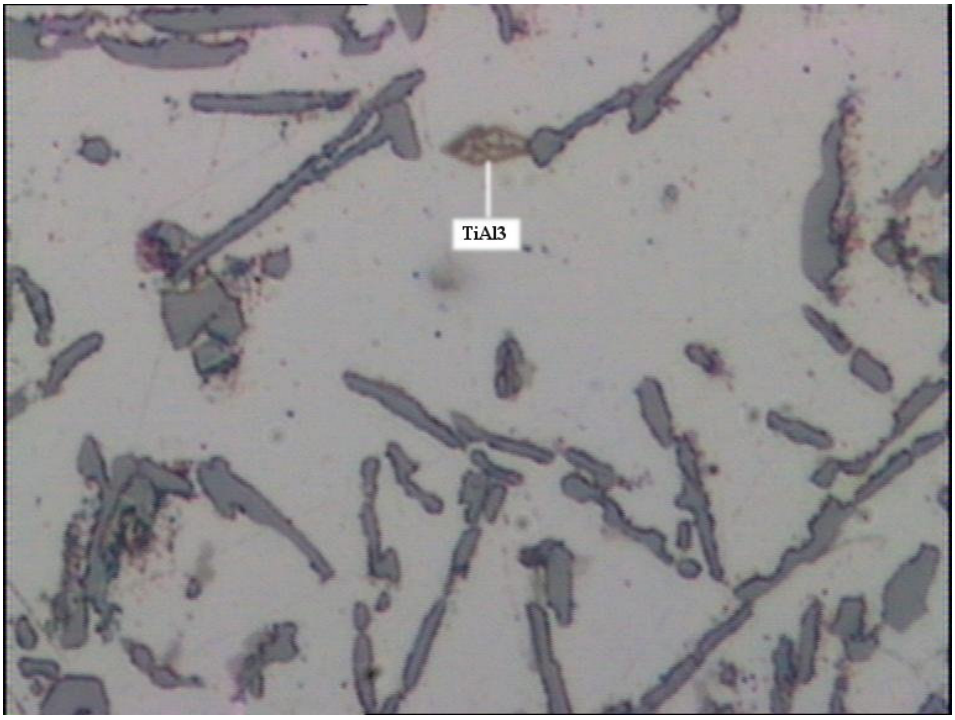


Şekil 5.4: Mikroyapısal incelemelerin yapıldığı ışık mikroskobu



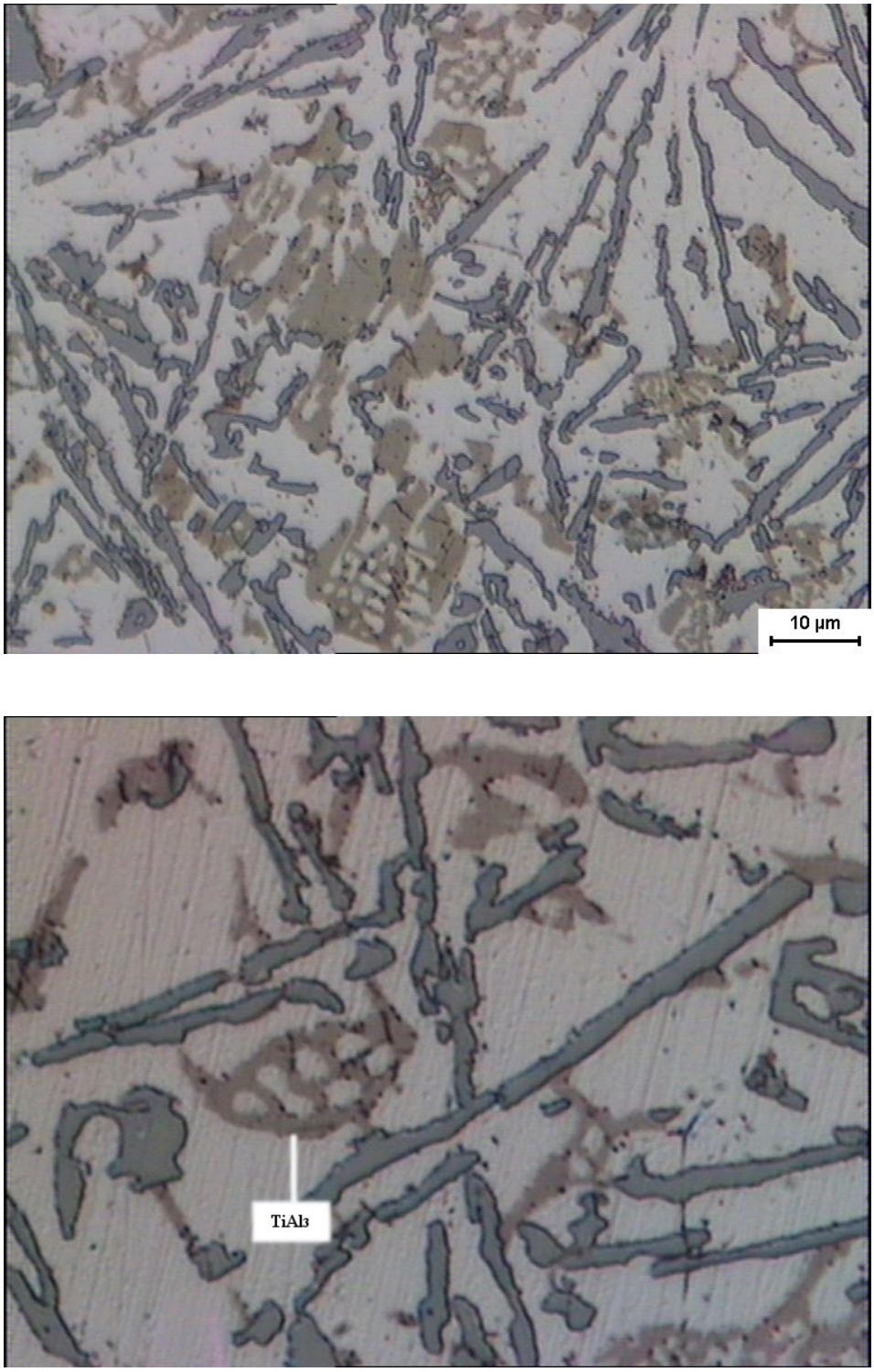
Şekil 5.5: Al-Si ötektik numunesinin parlatılmış konumda mikroyapısı

Ötektik bileşimdeki Al-Si alaşımı içerisine yapılan titanyum ilaveleri sonucu intermetalik fazlar ayrışmaya başlamıştır. Şekil 5.6'te % 0,1 oranında titanyum içeren alaşımın mikroyapısındaki intermetalik fazlar görünmektedir. % 0,1 düşük bir miktar olduğundan malzeme içerisinde ayrışan intermetalik fazlar az sayıda ve küçük boyutludur. Küçük olmalarına rağmen intermetalik $TiAl_3$ fazı kahverengi kontrastı sayesinde Al-Si ötektik yapısı içinde kolayca fark edilmektedir.

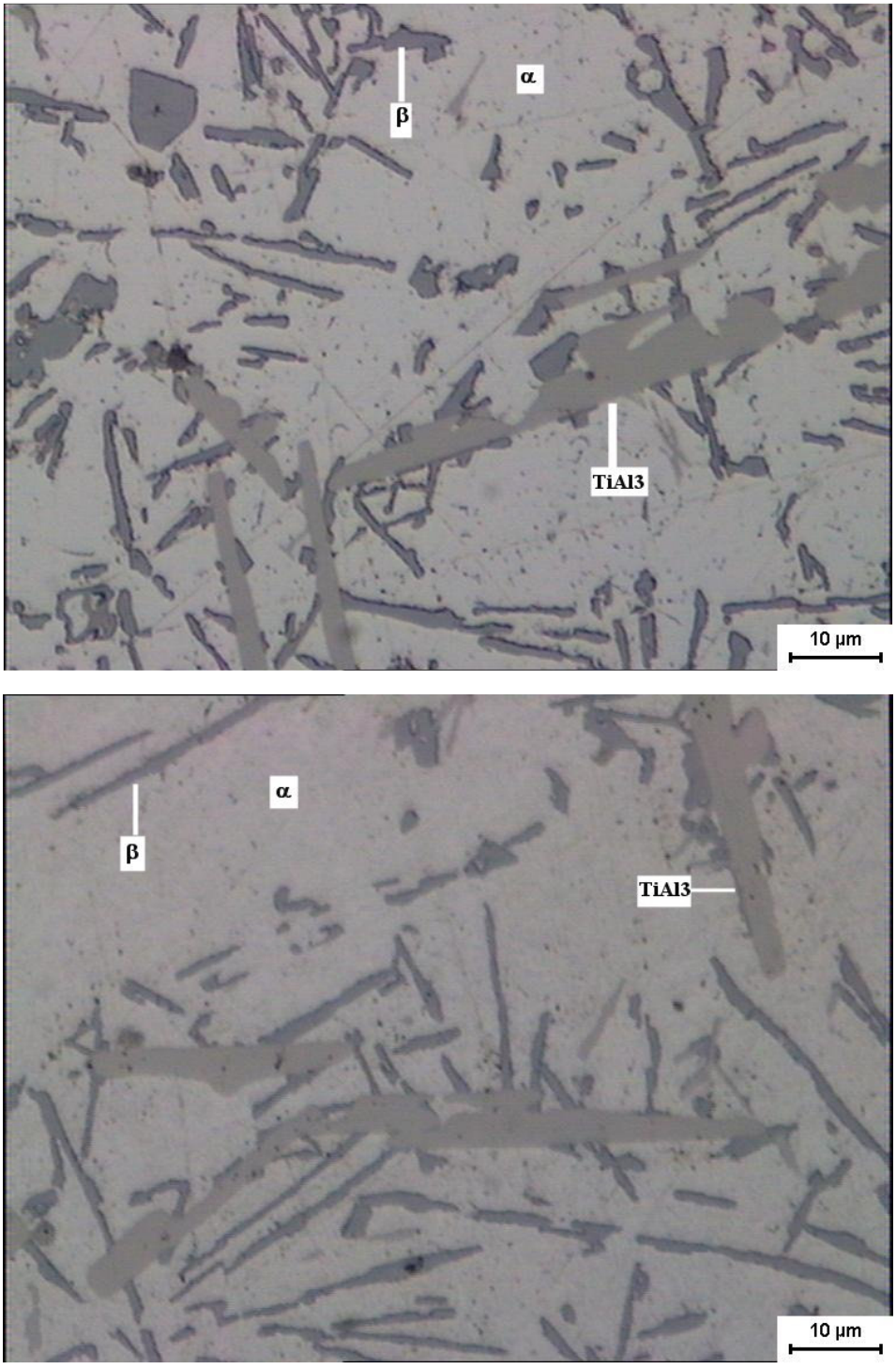


Şekil 5.6: % 0,1 titanyum içeren Al-Si ötektik numunesinin mikroyapısında görülen $TiAl_3$ intermetalik fazları

% 0,1 titanyum içeren alaşım içerisinde oluşan küçük boyutlu ve az sayıdaki intermetalik fazların morfolojisi hakkında yorum yapmak zordur. Ancak intermetalik fazların genel olarak küçük yaprakçıklar şeklinde olduğu gözlenmiştir. % 1 titanyum içeren alaşımın mikroyapısı da bu yorumu doğrulamaktadır. Şekil 5.7'te yaprakçıklar halindeki intermetalik fazlar görülmektedir. İkinci görüntüde α ile işaretlenen faz ötektik alüminyum β ile işaretlenen faz ise ötektik silisyumdur.



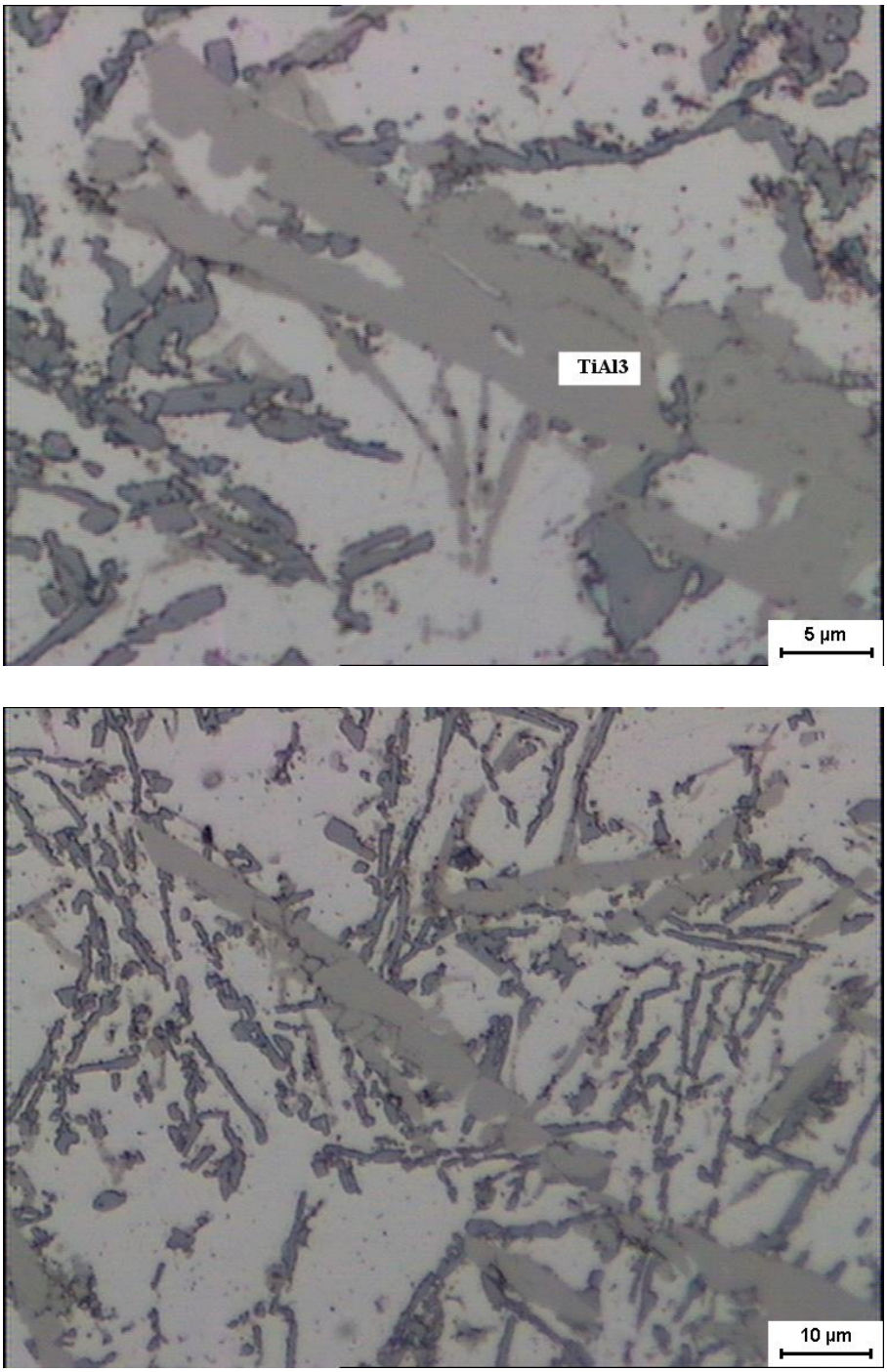
Şekil 5.7: % 1 titanyum içeren alaşımın mikroyapısındaki $TiAl_3$ yaprakçıklarının iki farklı büyütmedeki görüntüleri



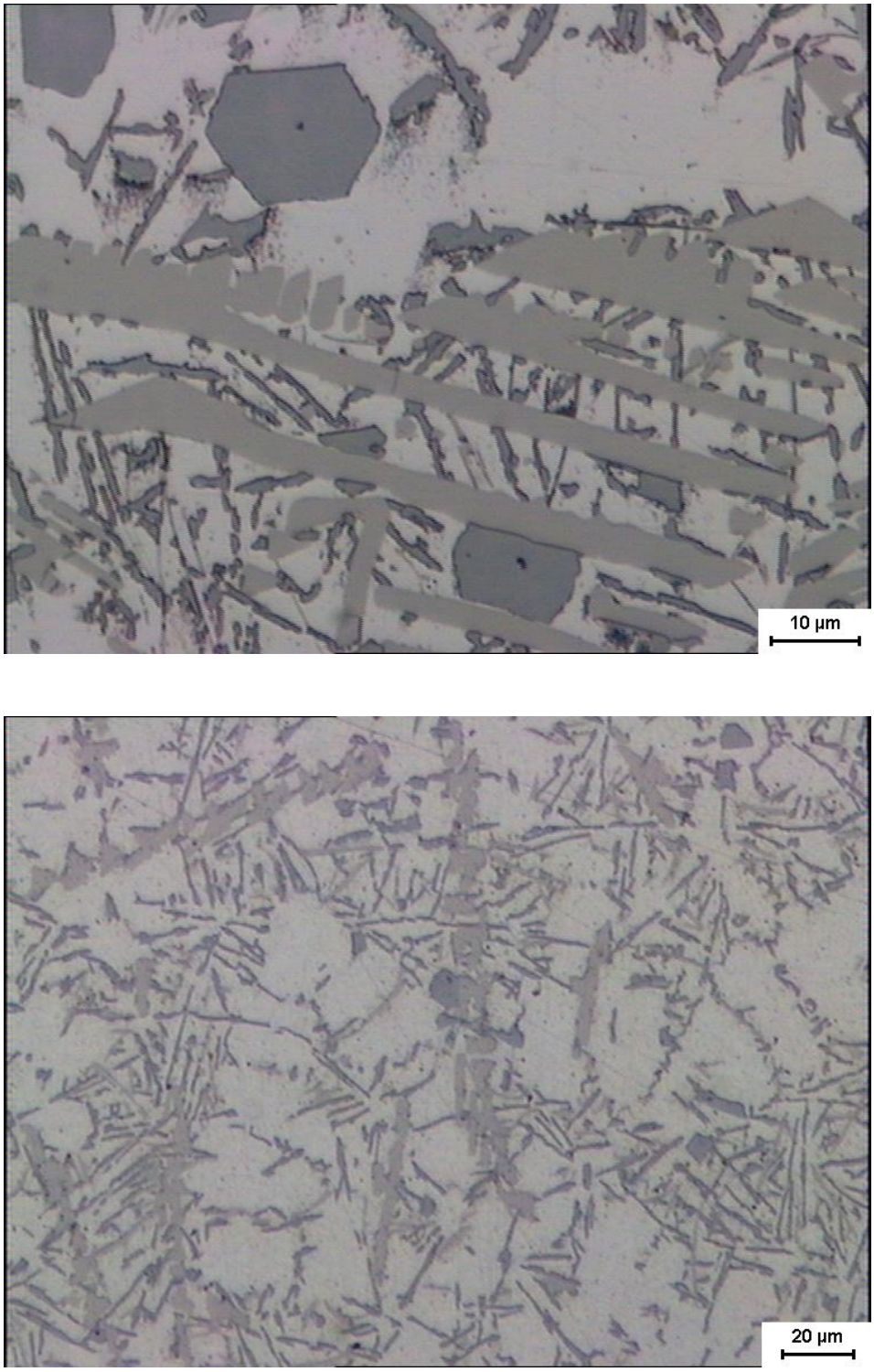
Şekil 5.8: % 2 titanyum içeren alaşımın dağlanmış ve parlatılmış konumdaki mikroyapıları

Şekil 5.8'de % 2 oranında titanyum içeren alaşımın parlatılmış ve dağlanmış konumdaki mikroyapıları görülmektedir. Bu yapılarda göze çarpan en büyük özellik intermetalik kristallerin morfolojisindeki değişikliktir. % 0,1 ve 1 titanyum içeren

alaşımlarda yaprakçıklar halinde oluşan intermetalikler %2 titanyum içeren alaşımda çubuklara ya da plakalar olarak adlandırılabilecek bir formda oluşmuştur.



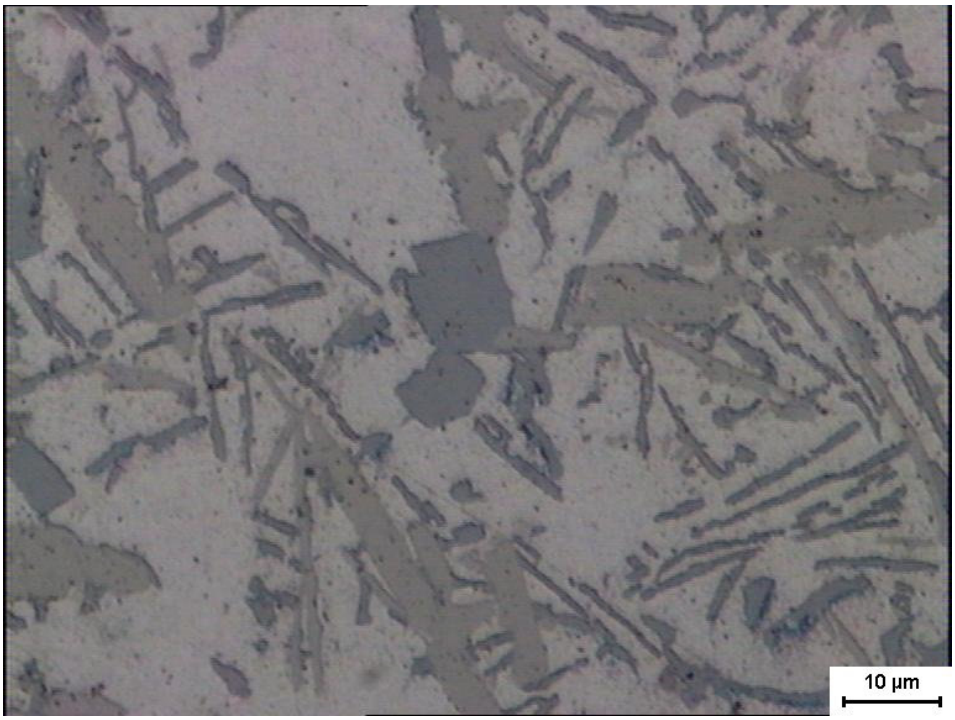
Şekil 5.9: % 3 titanyum içeren alaşımın dağlanmış konumda farklı büyütmelerde mikroyapıları



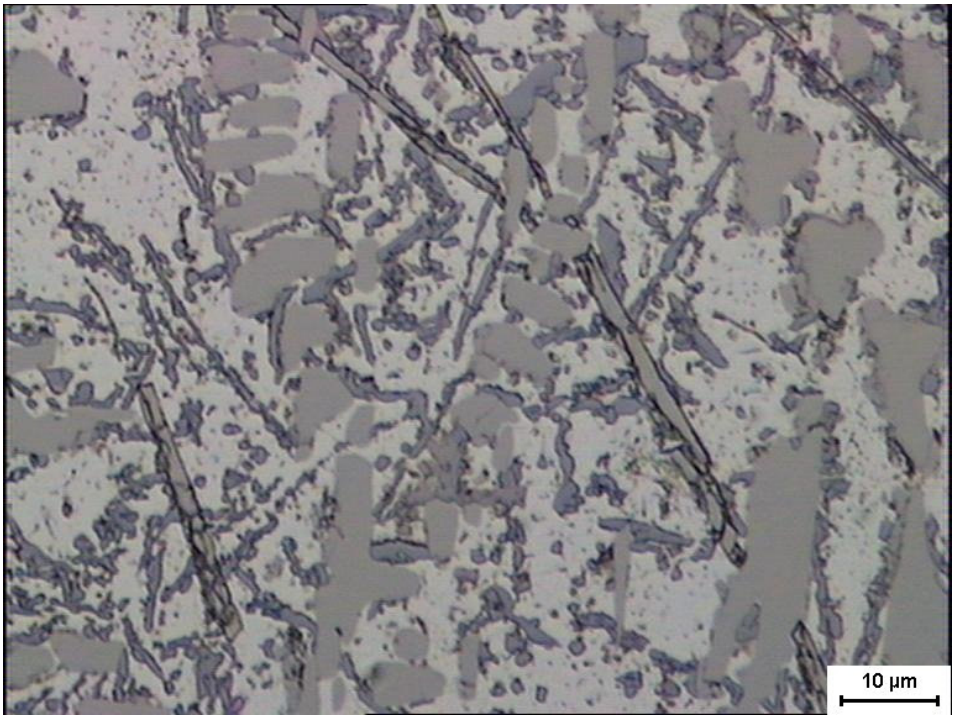
Şekil 5.10: % 5 oranında titanyum içeren alaşımın dağlanmış ve parlatılmış konumda farklı büyütmelerdeki mikro yapısı

Şekil 5.9'da % 3 titanyum içeren alaşımın dağlanmış konumda farklı büyütmelerde mikroyapıları verilmiştir. İntermetalik kristaller % 2 titanyum içeren alaşımda olduğu gibi yine plakalar halindedir. Ancak artan titanyum oranıyla beraber alaşım içindeki intermetaliklerin boyutları da artmaktadır.

Şekil 5.10'de % 5 titanyum içeren alaşımın mikroyapıları görülmektedir. Artan titanyum oranıyla beraber boyutları artan $TiAl_3$ fazı birbirine bağlı plakalar şeklinde büyümektedir.



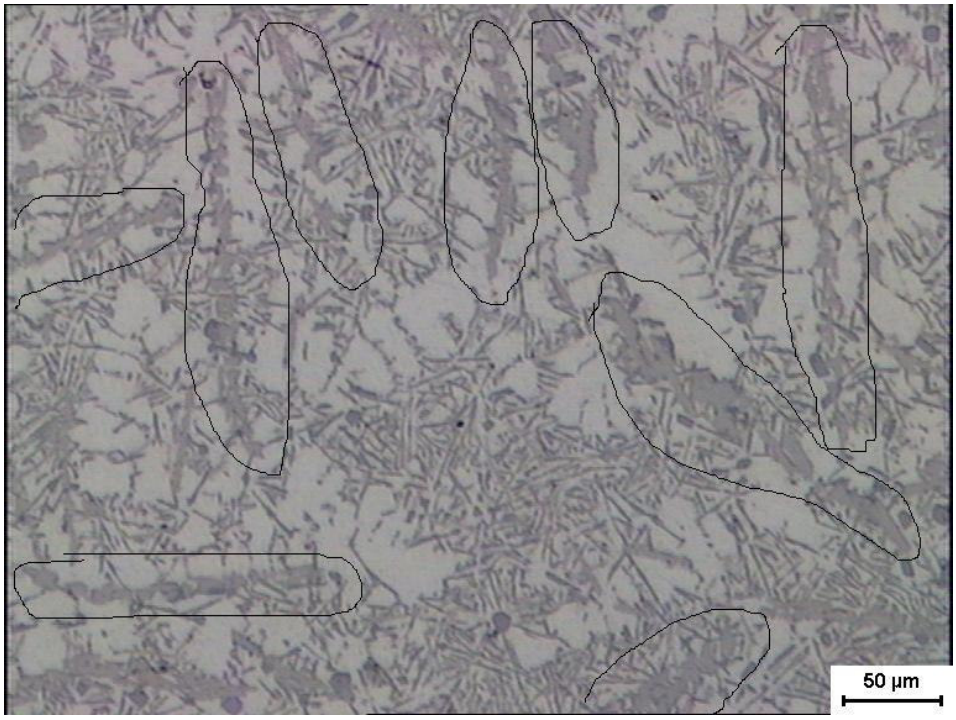
Şekil 5.11: % 10 titanyum içeren alaşımın parlatılmış ve dağlanmış konumdaki mikroyapıları



Şekil 5.11 (Devamı): % 10 titanyum içeren alaşımın parlatılmış ve dağlanmış konumdaki mikroyapıları

Şekil 5.11' de görüldüğü gibi alaşım içerisindeki titanyum oranı % 10'a ulaştığında yapı içerisindeki $TiAl_3$ fazı iyice kabalaşmaya başlamaktadır. Boyuları ve sayısı artan intermetalik kristaller alaşımın sertliğini de artırmaktadır.

Yapılan mikroyapı incelemelerinde $TiAl_3$ fazının birbirine yakın bölgelerde oluşmayı tercih ettiği gözlenmiştir. Şekil 5.12'da % 5 titanyum içeren alaşımın mikroyapısı üzerinde intermetalik fazların bulunduğu bölgeler işaretlenmiştir. İşaretli bölgelerde $TiAl_3$ fazının birbirine yakın plakalar şeklinde oluştuğu dikkat çekmektedir. Bu durumun sebebinin intermetalik kristallerin oluşumuyla yakından ilişkili olduğu düşünülmektedir.



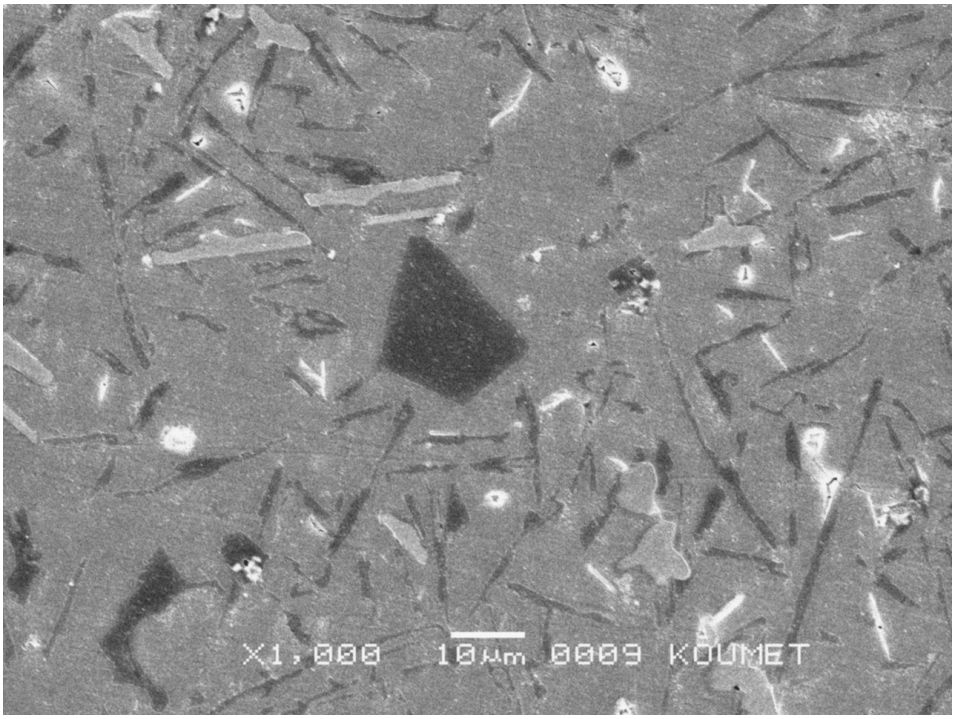
Şekil 5.12: % 5 titanyum içeren alaşımda oluşan intermetaliklerin işaretlenmiş hali

5.2.2 Tarama elektron mikroskobu (SEM) ve EDX analizi

Hazırlanan numunelere ışık mikroskobuyla yapılan incelemelerden sonra numuneler elektron mikroskobunda incelenmiş ve oluşan intermetalik fazların analizi EDX (Enerji-Dispersif X Işın Analiz) sistemi kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışma için Jeol 6060 tarama elektron mikroskobu ve Noran 960H–1SPS model Enerji-Dispersif X Işın Analiz Cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.13). Şekil 5.14 ve 5.15'de % 2 titanyum içeren alaşımın tarama elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir.

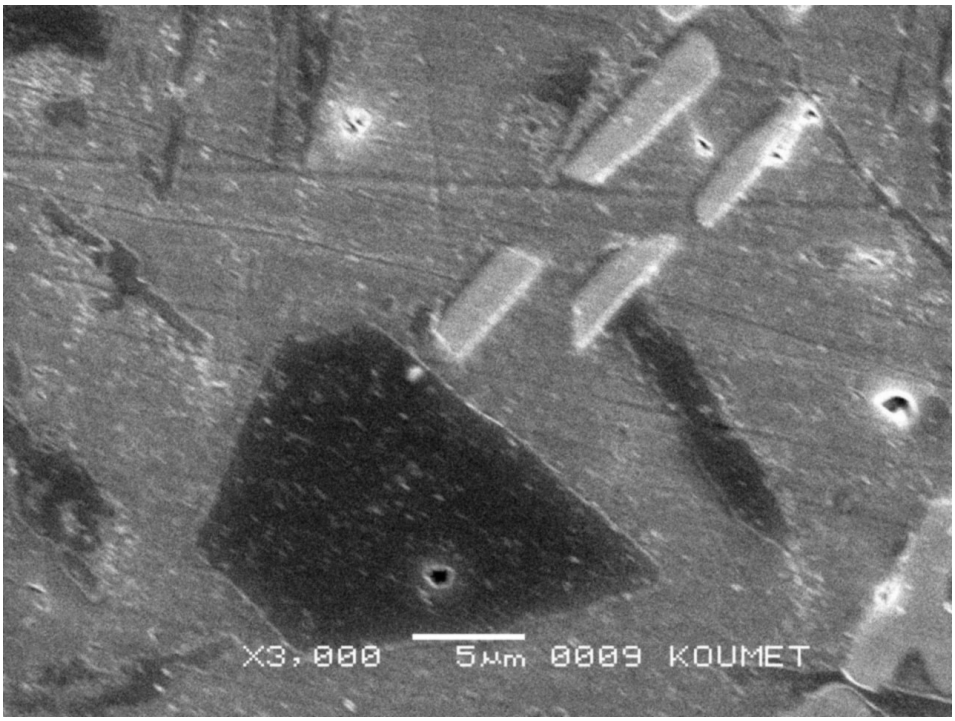


Şekil 5.13: Mikroyapısal incelemelerin yapıldığı tarama elektron mikroskobu ve Enerji-Dispersif X Işın Analizinin yapıldığı EDX sistemi

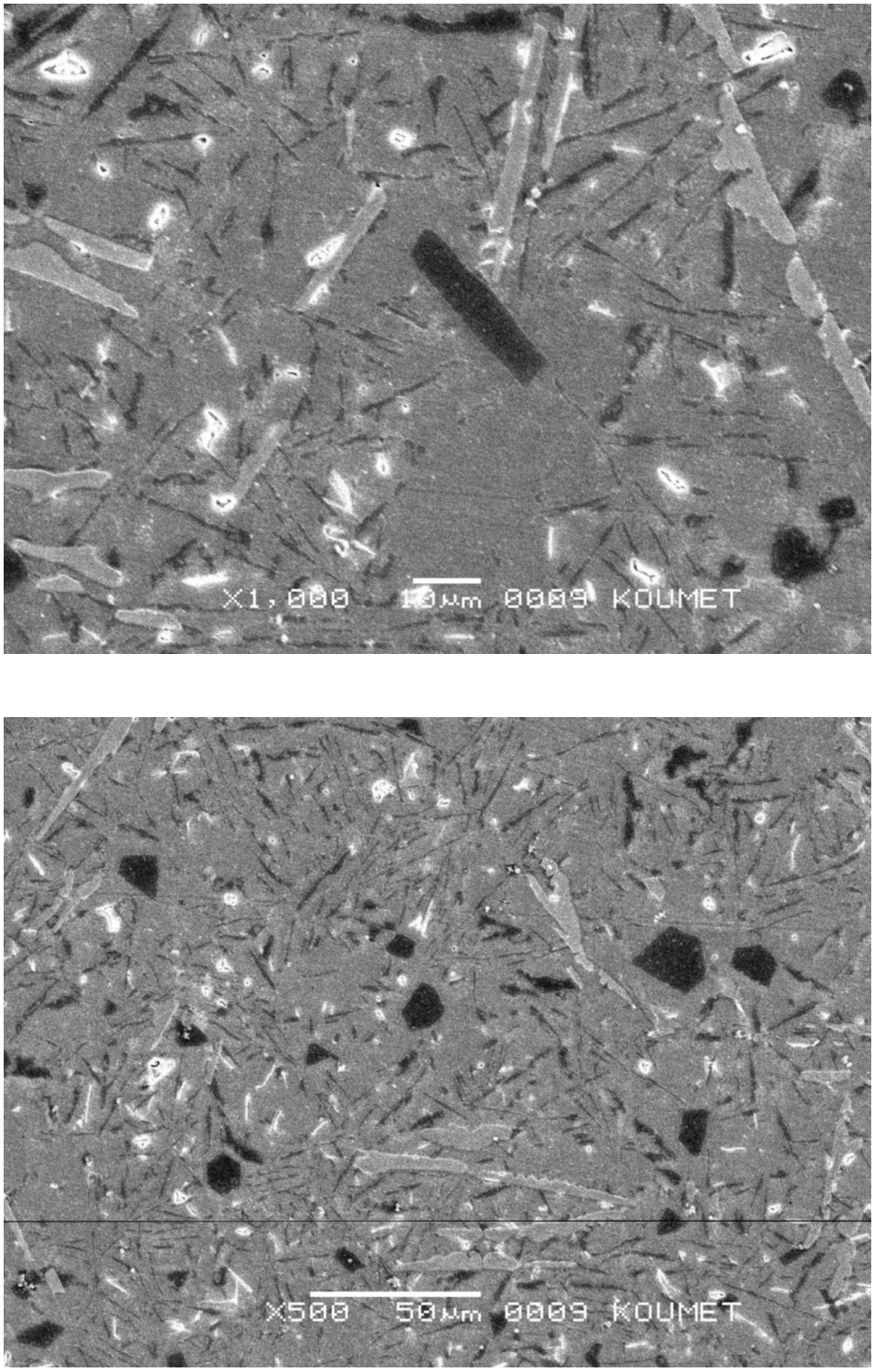


Şekil 5.14: % 2 Ti içeren alaşımın SEM görüntüsü, mikroyapıda siyah fazlar Si kristallerini, açık gri fazlar Ti intermetaliklerini, koyu gri matris ise alüminyumu göstermektedir

Şekil 5. 16 te ise % 3 Ti içeren alaşımın SEM görüntüleri görülmektedir. Bu şekilde parlak beyaz olarak görünen küçük bölgeler yüzeyde bulunan yalıtkan partiküllerin elektrikle aşırı yüklenmesi ya da yüzeydeki çatlakların kenarlarının elektrikle yüklenmesi sonucunda oluşmuştur.

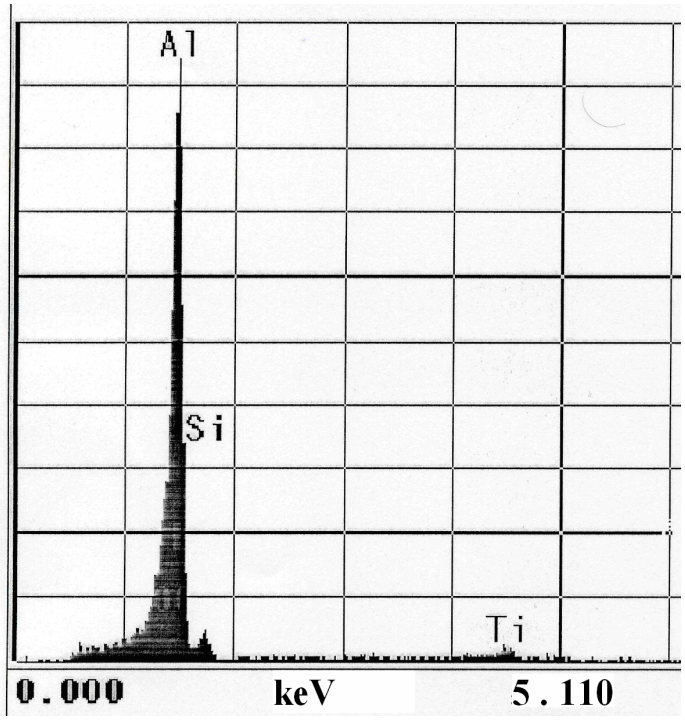


Şekil 5.15: Mikroyapı içindeki birincil Si kristali ve yanındaki intermetalik plakalar

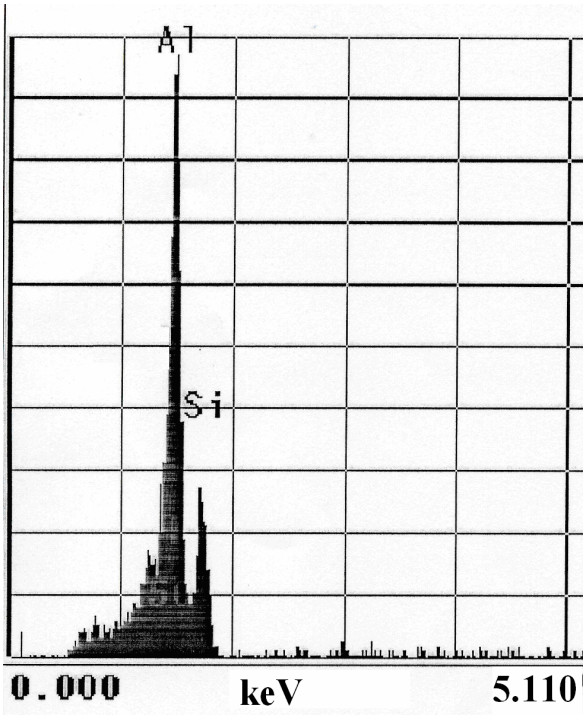


Şekil 5.16: % 3 Ti içeren alaşımın SEM görüntüleri

SEM'de incelenen numunelerde aynen optik mikroskopta yapılan incelemeler de olduğu gibi intermetalik fazlara rastlanmıştır. Bu fazların bileşimini belirlemek için yapılan EDX analizlerinde bileşimlerinin Al, Si ve Ti'den oluştuğu saptanmıştır. Şekil 5. 17'de EDX analizi sonucu elde edilen spektrum görülmektedir.



Şekil 5.17: İntermetalik kristalin EDX analizi spektrumu

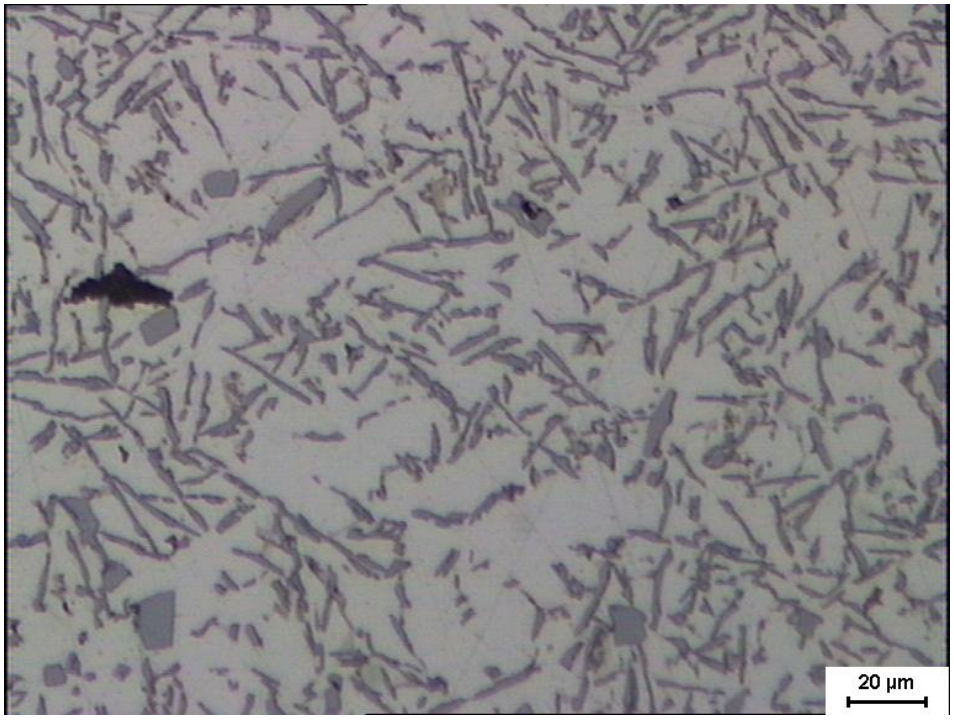


Şekil 5.18: Malzemenin matrisinden alınan EDX analizi spektrumu

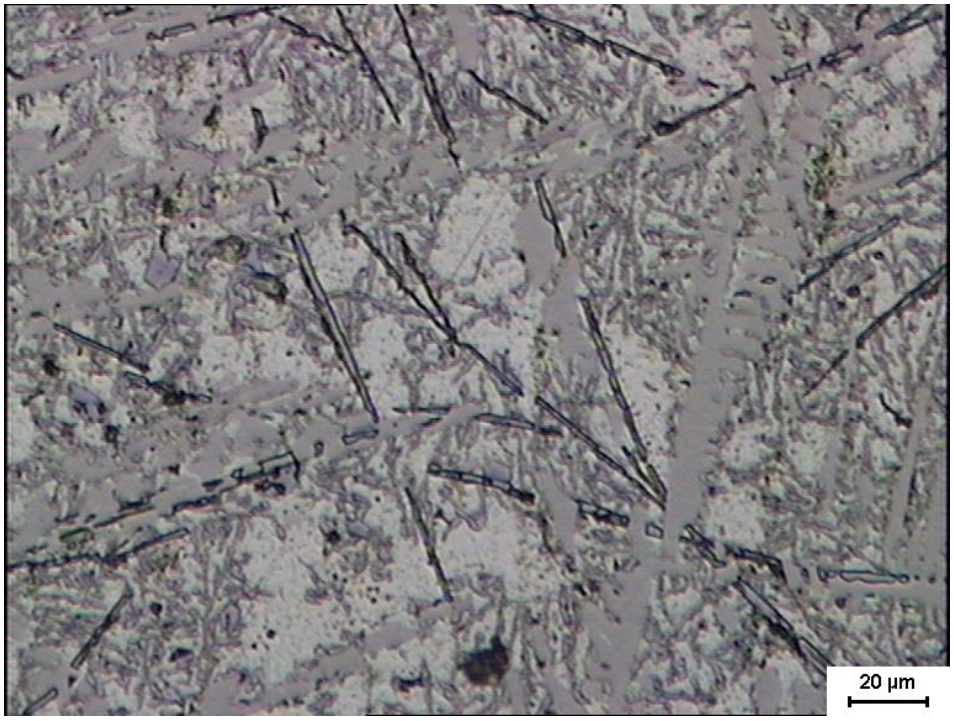
Şekil 5.18'te ise malzemenin matrisinden yapılan analizin spektrumu görülmektedir. Bu analiz sonucunda malzemenin matrisinde Al ve Si sinyalleri alınmıştır.

5.3. Görüntü Analizi

Alaşımlara uygulanan bir diğer karakterizasyon işlemi de görüntü analizidir. Görüntü analizi için ışık mikroskobunda alınan görüntüler ve Image Analyzer Quantimet 501 yazılımı kullanılmıştır. Analiz için ışık mikroskobunda 200x büyütmede alınan görüntüler tercih edilmiştir. Çalışmanın amacı malzeme içerisinde farklı Ti oranlarında oluşan intermetalikleri incelemek olduğundan görüntü analizi işleminde malzeme mikroyapısında bulunan intermetalik kristaller sayılmıştır. Görüntü analizi yapılırken her bileşim içi 200x büyütmede alınmış olan 3 görüntü üzerinde işlemler yapılıp daha sonra bu üç değerin ortalaması alınmıştır. İşlem sonrasında malzeme içerisindeki intermetalik kristallerin alansal yüzdeleri, boyutları ve yuvarlaklıkları gibi özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen bu değerler Tablo 5.3'te özetlenmiştir. Aşağıda Şekil 5.19'da verilen görüntüler ise görüntü analizi işlemine tabi tutulan görüntülerden bazılarıdır.



A



B

Şekil 5.19: A Görüntü analizinde kullanılan Al-Si-0,1Ti alaşımı mikroyapısı B Görüntü analizinde kullanılan Al-Si-10Ti alaşımı mikroyapısı

Tablo 5.3'te verilen veriler görüntü analizi programı ile elde edilen sonuçların derlenmiş halidir. Program tarafında ölçüm yapılan her bir görüntü için bu bilgiler ayrı ayrı verilmektedir ve bu verilere *feature* adı verilmektedir. Tablo 5.1'de bu verilerden bir örnek gösterilmiştir. Görüntü analizi işlemi sonucunda elde edilen veriler (Tablo 5.3'tekiler) Tablo 5.1'deki ortalama değerlerin 3 farklı görüntü için alınan ortalamalarıdır.

Tablo 5.1: Al-Si-5Ti içeren alaşım için yapılan görüntü analizi işleminde bir görüntüden elde edilen intermetalik faz değerleri değerler (Feature Tablosu)

Partikül No.	Alan (μm^2)	Uzunluk (μm)	Yuvarlaklık	Eşdeğer Yarıçap (μm)
1	88.747	21.801	2.100	10.630
2	50.014	19.273	3.010	7.980
3	80.461	26.540	3.565	10.122
4	69.780	24.329	3.702	9.426
5	35.938	15.798	4.991	6.764
6	287.605	53.081	3.631	19.136
7	982.008	94.471	25.101	35.360
8	267.539	37.599	3.987	18.456
9	15.473	5.371	1.206	4.439
10	74.072	18.009	4.032	9.711
11	11.880	6.319	1.971	3.889
12	58.998	18.957	3.119	8.667
13	85.153	24.645	4.091	10.413
14	22.361	7.899	2.586	5.336
15	36.138	15.798	3.025	6.783
16	121.790	24.013	2.781	12.453
17	20.664	7.267	1.434	5.129
18	58.499	16.746	2.683	8.630
Toplam	2367.122	437.915	77.016	193.325
Ortalama	131.507	24.329	4.279	10.740
Standart Sapma	219.525	20.380	5.139	7.217
Maksimum değer	982.008	94.471	25.101	35.360
Minimum değer	11.880	5.371	1.206	3.889

Tablo 5.2'de ise Al-Si-5Ti içeren alaşım için analiz sonucu elde edilen 3 feature datasında bulunan ortalama değerlerden oluşan *field* tablosu bulunmaktadır. Her alaşım için yapılan üç ölçüm sonucu elde edilen 3 feature tablosunun (=3 görüntü)

ortalaması alınarak bir field (=görüntü alanı) tablosu oluşturulmuştur. Görüntü analizi ile ilgili nihai sonuçlar, elde edilen bu field tablosundan alınmıştır.

Tablo 5.2: Al-Si-5Ti alaşımı için Feature Tablosunda bulunan intermetalik faz değerlerinin ortalamasının bulunduğu tablo (Field Tablosu)

Görüntü Alanı	Alan (μm^2)	Sayım	Anizotropi	Alan - %
1	2260.21	36	0.96	6.45
2	2367.12	18	0.84	6.76
3	2820.94	29	0.64	8.05
Toplam	7448.270	83	2.448	21.257
Ortalama	2482.757	27.667	0.816	7.086
Standart Sapma	243.083	7.409	0.131	0.933
Maksimum	2820.941	36	0.960	8.051
Minimum	2260.207	18	0.644	6.450

Tablo 5.3'te görüldüğü gibi alaşım içerisindeki Ti miktarı arttıkça oluşan intermetalik kristallerin sayısı ve boyutları da artmıştır. Al-Si-0,1Ti alaşımında intermetaliklerin kapladığı ortalama alan 64,92 μm^2 iken bu alan Al-Si-10Ti içeren alaşımda 116.43 μm^2'ye kadar çıkmıştır. Al-Si-0,1Ti alaşımında intermetaliklerin kapladığı alan % 0,19 iken bu alan Al-Si-10Ti içeren alaşımda %11,09'ye çıkmıştır.

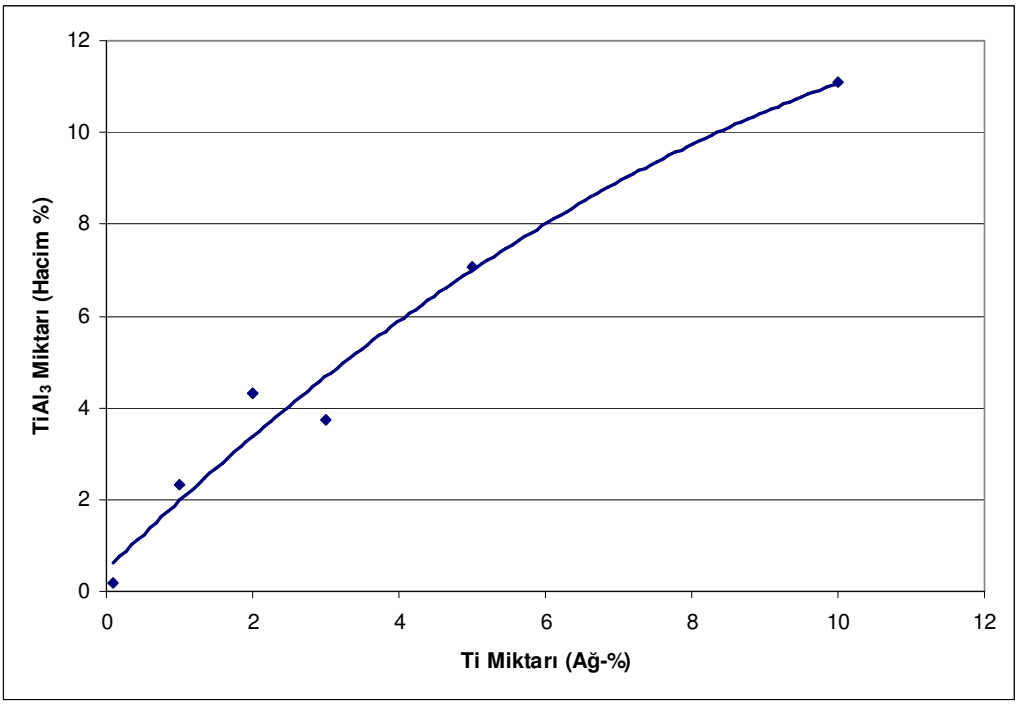
Tablo 5.3: Al-Si-XTi alaşımlarına uygulanan görüntü analizi işlemi sonucunda elde edilen verilerin tablo halinde gösterilmesi

Alaşım	Alan (μm^2)					Alan (%)				
	Ort.	Std Sapma	Std Hata	Maks.	Min	Ort.	Std Sapma	Std Hata	Maks.	Min
Al-Si-0.1Ti	64.922	26.775	15.458	102.723	44.124	0.185	0.076	0.044	0.293	0.126
Al-Si-1Ti	27.356	17.428	3.130	84.155	5.091	2.303	0.352	0.144	2.683	1.693
Al-Si-2Ti	65.040	48.361	10.084	185.780	8.286	4.312	0.049	0.034	4.361	4.264
Al-Si-3Ti	88.919	73.080	17.225	360.479	29.849	3.730	0.626	0.361	4.568	3.065
Al-Si-5Ti	97.274	102.812	19.092	503.034	15.673	7.086	0.694	0.401	8.051	6.450
Al-Si-10Ti	116.428	168.981	29.872	969.230	15.673	11.092	0.946	0.473	12.57	10.005

Tablo 5.3: Al-Si-XTi alaşımlarına uygulanan görüntü analizi işlemi sonucunda elde edilen verilerin tablo halinde gösterilmesi (Devam)

Alaşım	Uzunluk (µm)					Yuvarlaklık				
	Ort.	Std Sapma	Std Hata	Maks.	Min	Ort.	Std Sapma	Std Hata	Maks.	Min
Al-Si-0.1Ti	5.134	1.329	0.664	6.635	3.160	1.617	0.262	0.131	1.906	1.198
Al-Si-1Ti	9.030	3.005	0.540	18.009	4.423	2.141	0.913	0.164	4.886	1.280
Al-Si-2Ti	16.306	8.137	1.697	42.654	6.319	2.353	0.915	0.191	4.393	1.294
Al-Si-3Ti	21.309	8.802	2.075	48.025	11.690	2.470	0.565	0.133	3.824	1.654
Al-Si-5Ti	22.814	20.346	3.778	97.314	6.003	3.055	1.663	0.309	7.823	1.389
Al-Si-10Ti	19.757	18.904	3.342	115.324	6.319	2.378	1.873	0.331	11.466	1.096

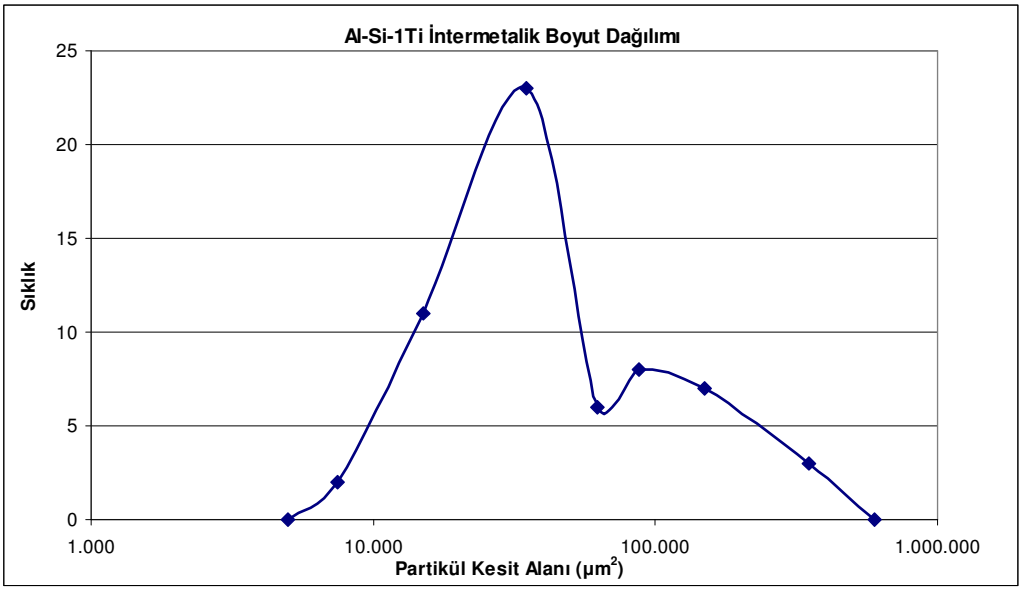
Görüntü analizi işleminden elde edilen mikroyapısal sonuçlar doğrultusunda değişik ilişkiler kurulmuş ve ilgili grafikleri çizilmiştir. Şekil 5.20'de alaşım içerisine ilave edilen titanyum miktarının fonksiyonu olarak malzeme içindeki intermetalik kristallerin hacim miktarlarını veren grafik gösterilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi malzeme içerisine ilave edilen titanyum miktarının artmasıyla oluşan intermetalik miktarı da neredeyse lineer olarak artmaktadır.



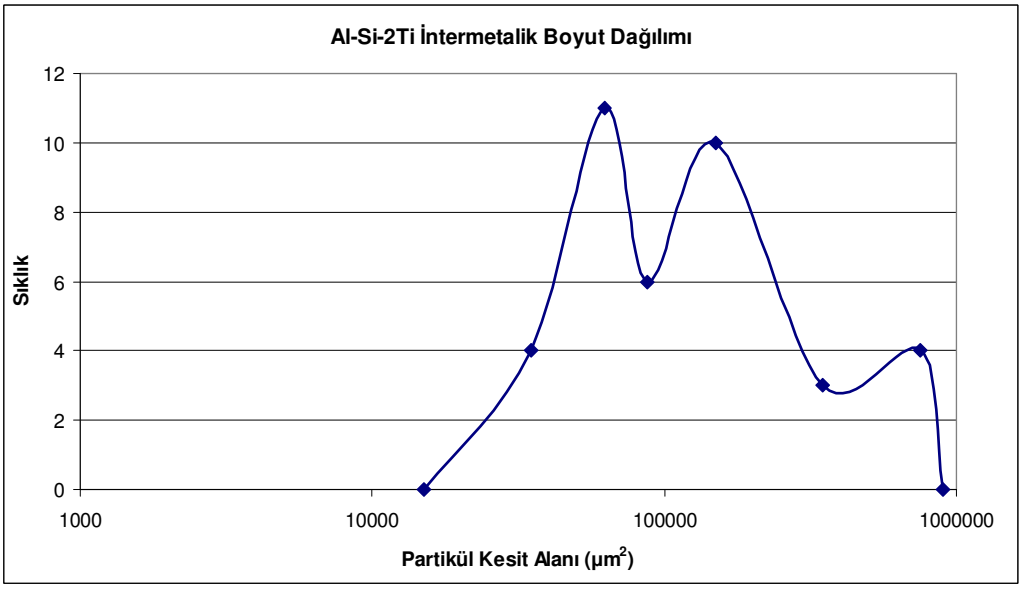
Şekil 5.20: Al içinde oluşan $TiAl_3$ miktarının titanyum miktarına bağlı artışı

Görüntü analizi işlemi sonucunda elde edilen diğer bir veri de intermetalik faz boyutudur. Her bir alaşım için intermetalik faz boyut dağılım grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler görüntü analizi işlemi sırasında ölçülen intermetalik faz boyutunun (partikül kesit alanı) uygun bir şekilde sınıflandırılması ve ardından her sınıfta bulunan intermetalik faz sayısının belirlenmesiyle elde edilen histogramlardır; ilgili çizimler hem lineer, hem de log-normal karakteristikte yapılmıştır. İçeriği tanıtım açısından log-normal dağılım eğrileri daha efektif olduğundan burada yalnız bu tür diyagramlar gösterilmiştir. Şekil 5.21'de sırasıyla Al-Si-1Ti, Al-Si-2Ti, Al-Si-3Ti, Al-Si-5Ti ve Al-Si-10Ti alaşımları için çizilen intermetalik boyut dağılım grafikleri verilmiştir. % 0,1 titanyum içeren alaşım için bu grafiklerin çizilmesi mümkün olmamıştır. Bunun nedeni Al-Si-0,1Ti alaşımı içinde oluşan

intermetalik faz partikül sayısının çok az olması ve bu nedenle de standart 3 görüntü üzerinden yapılan çalışmada elde edilen partikül miktarının istatistiksel açıdan yeterli olmamasıdır. İntermetalik faz partikül sayısının az olması, çok daha fazla görüntünün yüksek büyütmelerde işlemlenmesini öngörür.

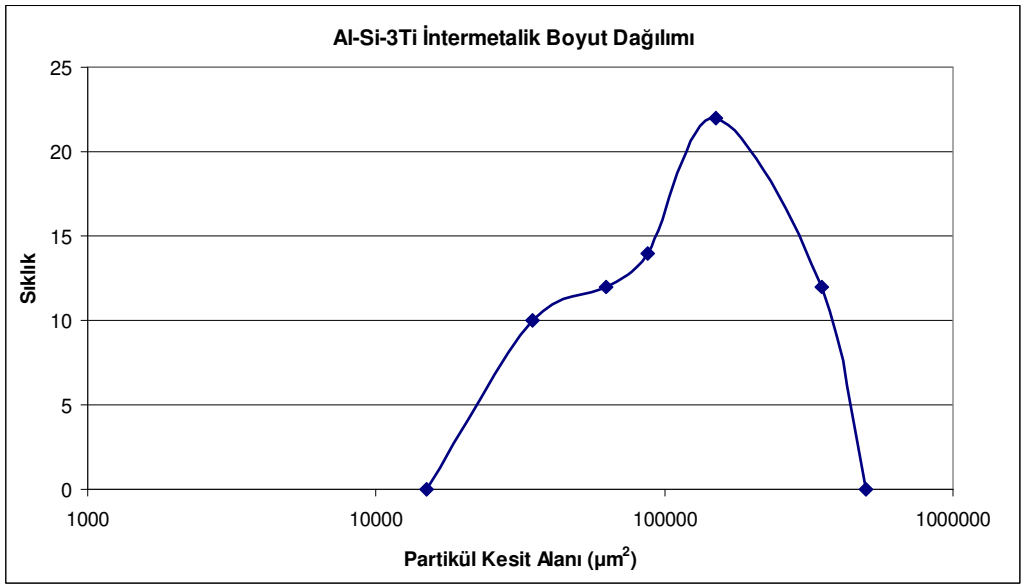


A

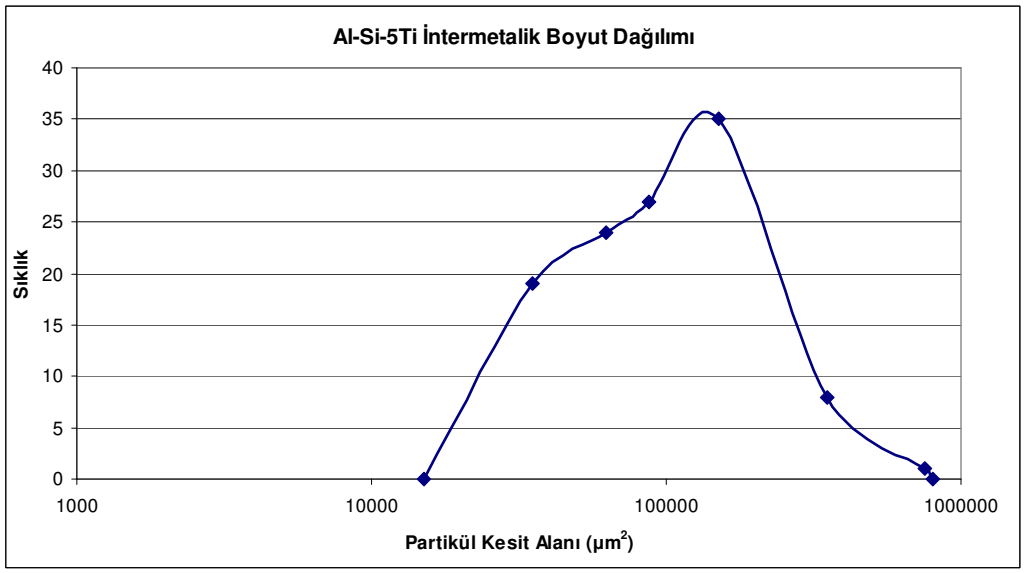


B

Şekil 5.21: (A) Al-Si-1Ti alaşımı için , (B) Al-Si-2Ti alaşımı için, (C) Al-Si-3Ti alaşımı için, (D) Al-Si-5Ti alaşımı için ve (E) Al-Si-10Ti alaşımı için çizilen intermetalik boyut dağılım grafikleri

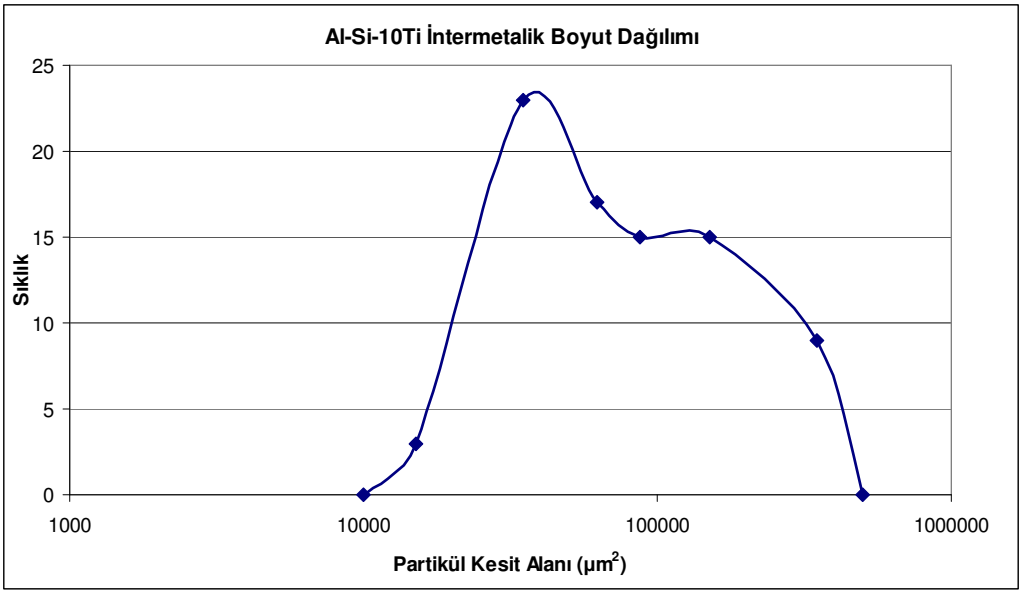


C



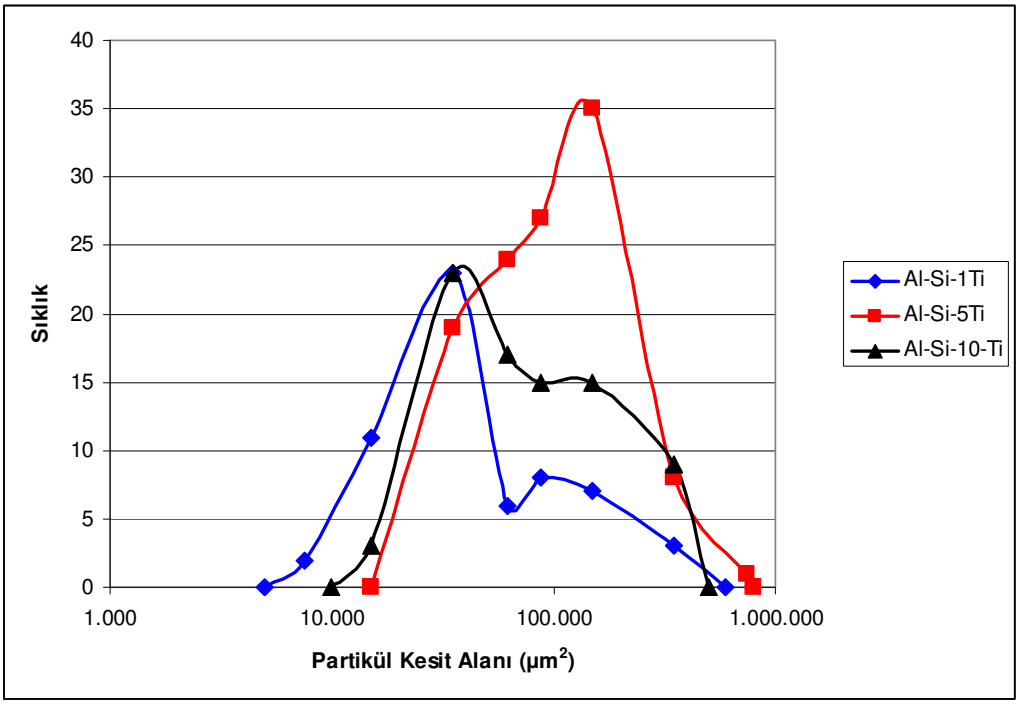
D

Şekil 5.21 (Devamı): (A) Al-Si-1Ti alaşımı için , (B) Al-Si-2Ti alaşımı için, (C) Al-Si-3Ti alaşımı için, (D) Al-Si-5Ti alaşımı için ve (E) Al-Si-10Ti alaşımı için çizilen intermetalik boyut dağılım grafikleri



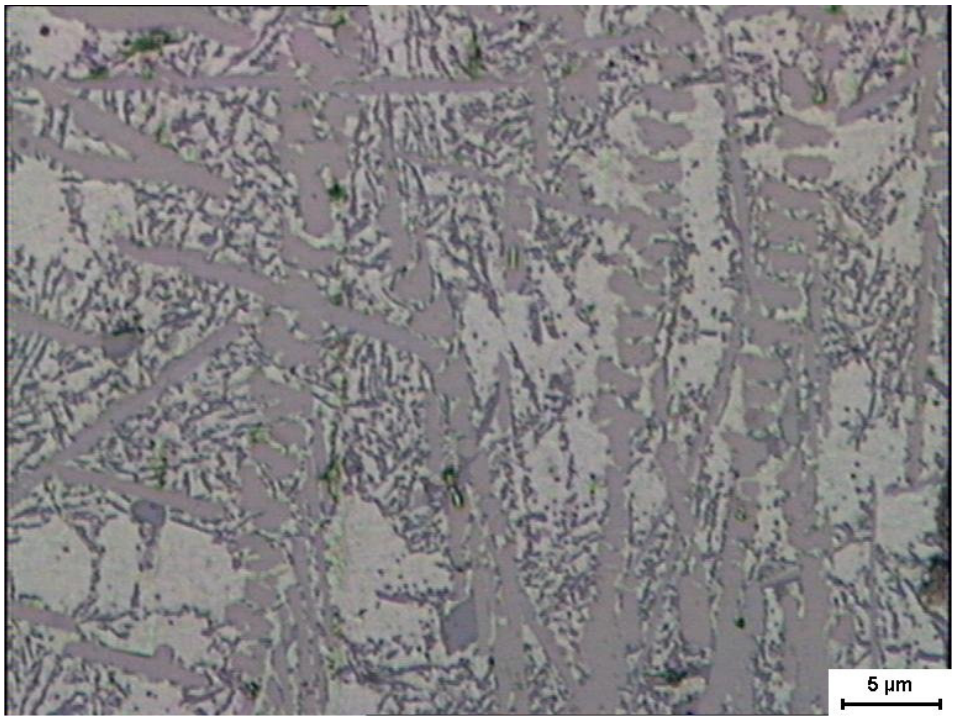
E

Şekil 5.21 (Devamı): (A) Al-Si-1Ti alaşımı için , (B) Al-Si-2Ti alaşımı için, (C) Al-Si-3Ti alaşımı için, (D) Al-Si-5Ti alaşımı için ve (E) Al-Si-10Ti alaşımı için çizilen intermetalik boyut dağılım grafikleri



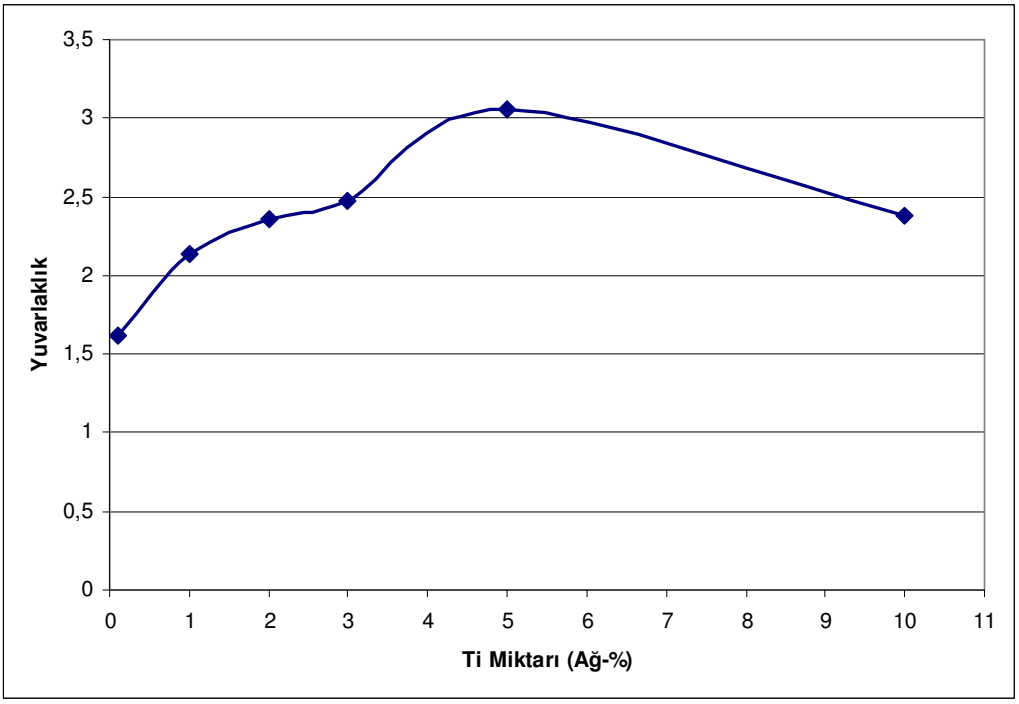
Şekil 5.22: Al-Si-1Ti, Al-Si-5Ti ve Al-Si-10Ti alaşımları için çizilen intermetalik boyut dağılım grafiklerinin aynı grafik üzerinde gösterilmesi

Şekil 5.22'de görüldüğü gibi alaşımın içindeki titanyum miktarının artmasıyla dağılım eğrisi sağa, yani daha büyük boyutlara doğru kaymaktadır. Ancak grafikte dikkat çeken bir başka nokta Al-Si-10Ti alaşımının iki maksimumlu bir eğri oluşturmasıdır. Küçük partikül alanında oluşan ilk maksimumun yan yana sıralanmış küçük intermetalik partiküllerinden kaynaklandığı görülmüştür. Bu oluşum Şekil 5.19'da gösterilmiştir.



Şekil 5.23: Yan yana sıralanmış küçük boyutlu intermetalik kristaller

Şekil 5.23'de görülen küçük boyutlu intermetalikler belirlenen şekil faktörlerini de oldukça etkilemektedir. Alaşım içine ilave edilen titanyum miktarı arttıkça intermetalikler çubuklar halinde kabalaştığından şekil faktörü (yuvarlaklık küre için 1 kabul edilir) de artmaktadır. Ancak % 10 titanyum içeren alaşımda oluşan küçük boyutlu ve küresele yakın şekilli intermetalikle şekil faktörünün düşmesine neden olmuştur. Şekil 5.24'te titanyum miktarına bağlı olarak şekil faktörünün değişimi verilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi şekil faktörü (yuvarlaklık) % 5 titanyumdan sonra düşüşe geçmektedir.



Şekil 5.24: Titanyum içeriğine bağlı olarak şekil faktörü değişimi

5.4. Isıl İşlem Uygulamaları

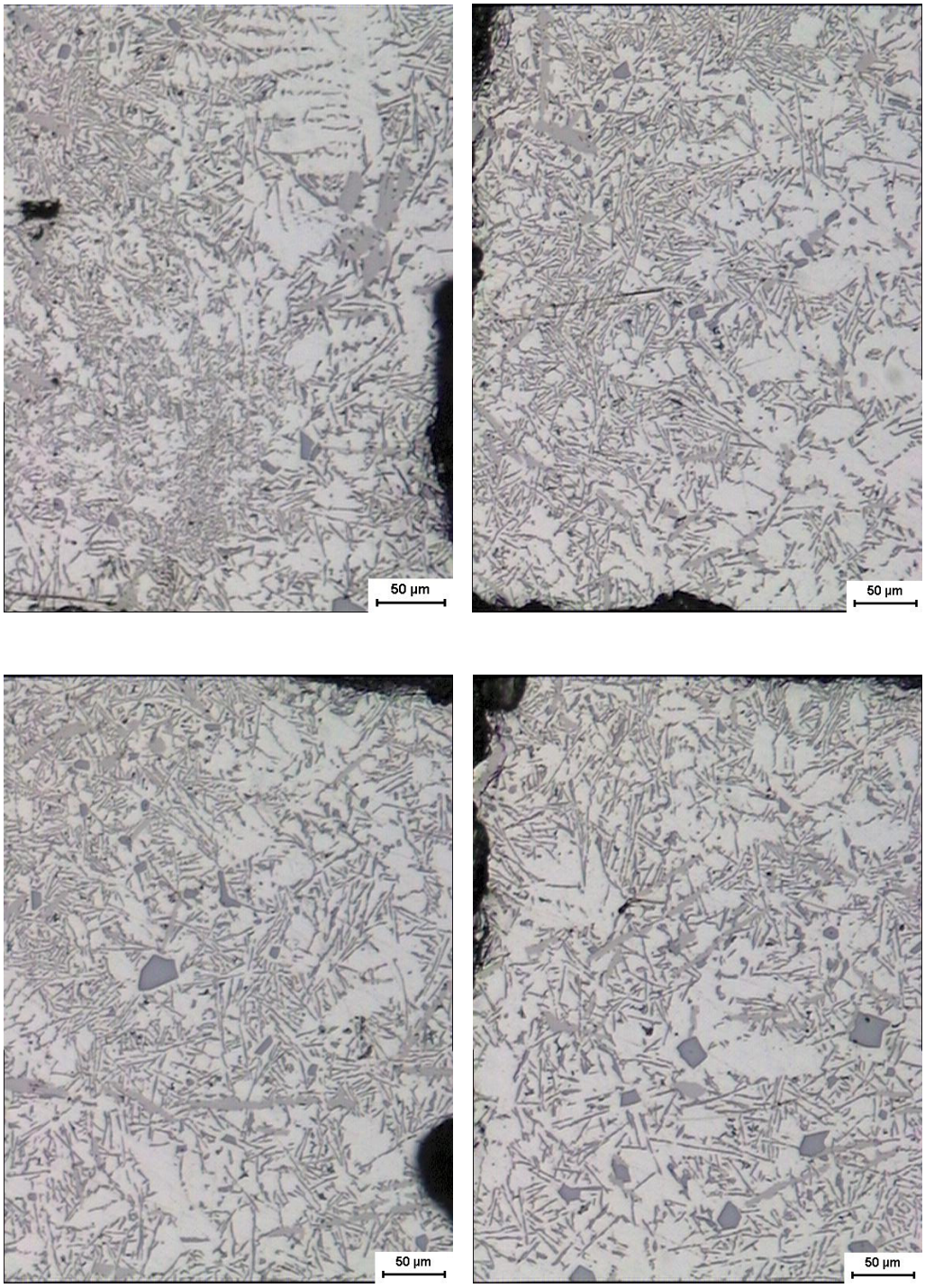
Mikroyapısal incelemeler sonucu yapıda lameller halinde uzun intermetalik kristallerin görülmesi sonucu malzemenin bu konumda çok kırılgan olacağı düşüncesi ortaya çıkmıştır. Malzemenin kırılganlığını ortadan kaldırabilmek için yapıdaki büyük boyutlu lamelar intermetaliklerin daha küçük boyutlu ve yapıya homojen bir şekilde dağılmış olması gerekir. Bunu yapmanın farklı yolları mevcuttur. En basit yöntemlerden biri malzemeyi sıcak deformasyona uğratmaktır. Yüksek sıcaklıkta yapılan deformasyon sırasında malzemeye uygulanan kuvvetler sonucu malzeme içindeki intermetalik kristaller kırılıp yapı içerisine dağılmaktadır.

İntermetalikleri kırmanın bir diğer yöntemi ise termal şok uygulamaktır. Matris malzemesi ve intermetalik kristallerinin ısıl genleşme katsayısının farklı olması sonucu ani ısıl değişimler sonucunda intermetalik yapıların kırılması beklenmiştir. Bu amaçla döküm halinde bulunan numunelerden bazılarına ısıl işlemler uygulanmıştır. Isıl işlem sıcaklığı için bazı alüminyum alaşımlarında uygulanan çökelti sertleştirmesi (yaşlanma sertleştirmesi) işlemlerinde çözeltiye alma sıcaklığı olarak kullanılan sıcaklığa yakın bir

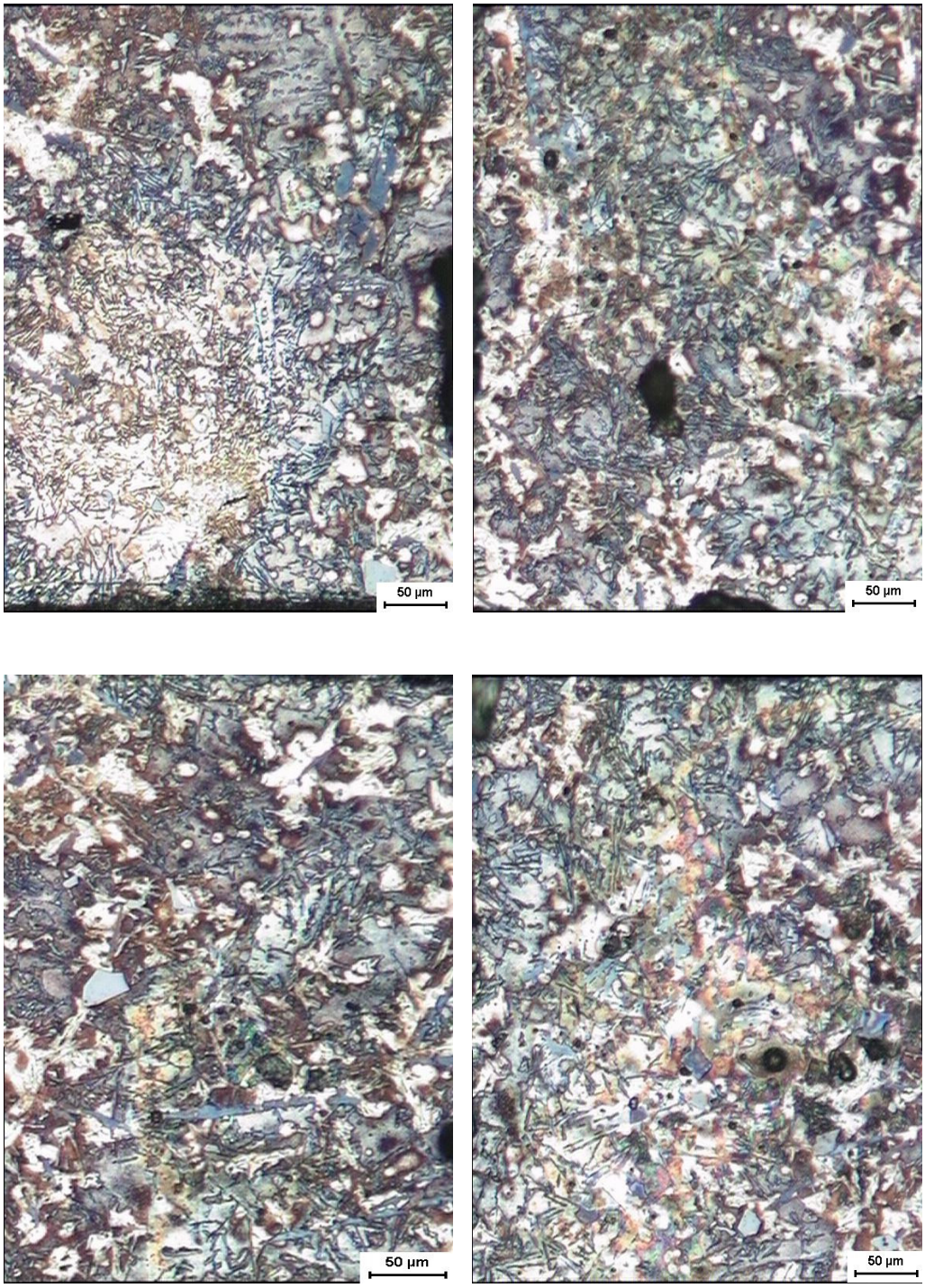
değer olan 500 °C seçilmiştir. Numuneler fırına koyulmadan önce yüzeylerine sivri uçlu bir malzeme yardımıyla boydan boya bir + işareti çizilmiştir ve bu + işaretinin ayırdığı dört bölgenin de ışık mikroskobunda görüntüleri alınmıştır. Bu işlemdeki amaç ısıl işlem sonrası aynı bölgelerin görüntülerini alıp birbiriyle karşılaştırabilmektir. Aşağıda verilen mikroyapı görüntülerinde de karşılaştırmayı kolaylaştırmak için işaretlenen bu dört bölge ısıl işlem öncesi ve sonrasındaki görüntülerde sırayla verilmiştir. Isıl işlem uygulaması için Reztaş marka rezistanslı kamara tipi fırın kullanılmıştır. Numuneler fırın içine yerleştirildikten sonra fırın sıcaklığı artırılmaya başlanmış ve 500 °C'de sabitlenmiştir.

Isıl işlem uygulaması Al-Si-2Ti, Al-Si-3Ti ve matrisin ısıl işlemden nasıl etkilendiğini belirlemek amacıyla titanyum içermeyen AlSi ötektik alaşımına uygulanmıştır. Tüm numuneler fırında 8 saat tutulmuştur. 8 saat sonunda Al-Si-2Ti ve AlSi ötektik alaşımları numuneleri suda soğutulmuş. Al-Si-3Ti alaşımına ait numune ise fırında soğutulmuştur. Farklı iki tip soğutma yapılmasının nedeni malzeme yapısına soğuma hızının etkisini belirleyebilmek amacıyla yapılmıştır.

Şekil 5.25'te Al-Si-2Ti alaşımının ısıl işlemden önce + ile işaretlenmiş bölümü görülmektedir. Şekil 5.26'da ise AlSi2Ti alaşımının ısıl işlemden sonra + ile işaretlenmiş bölümü görülmektedir.



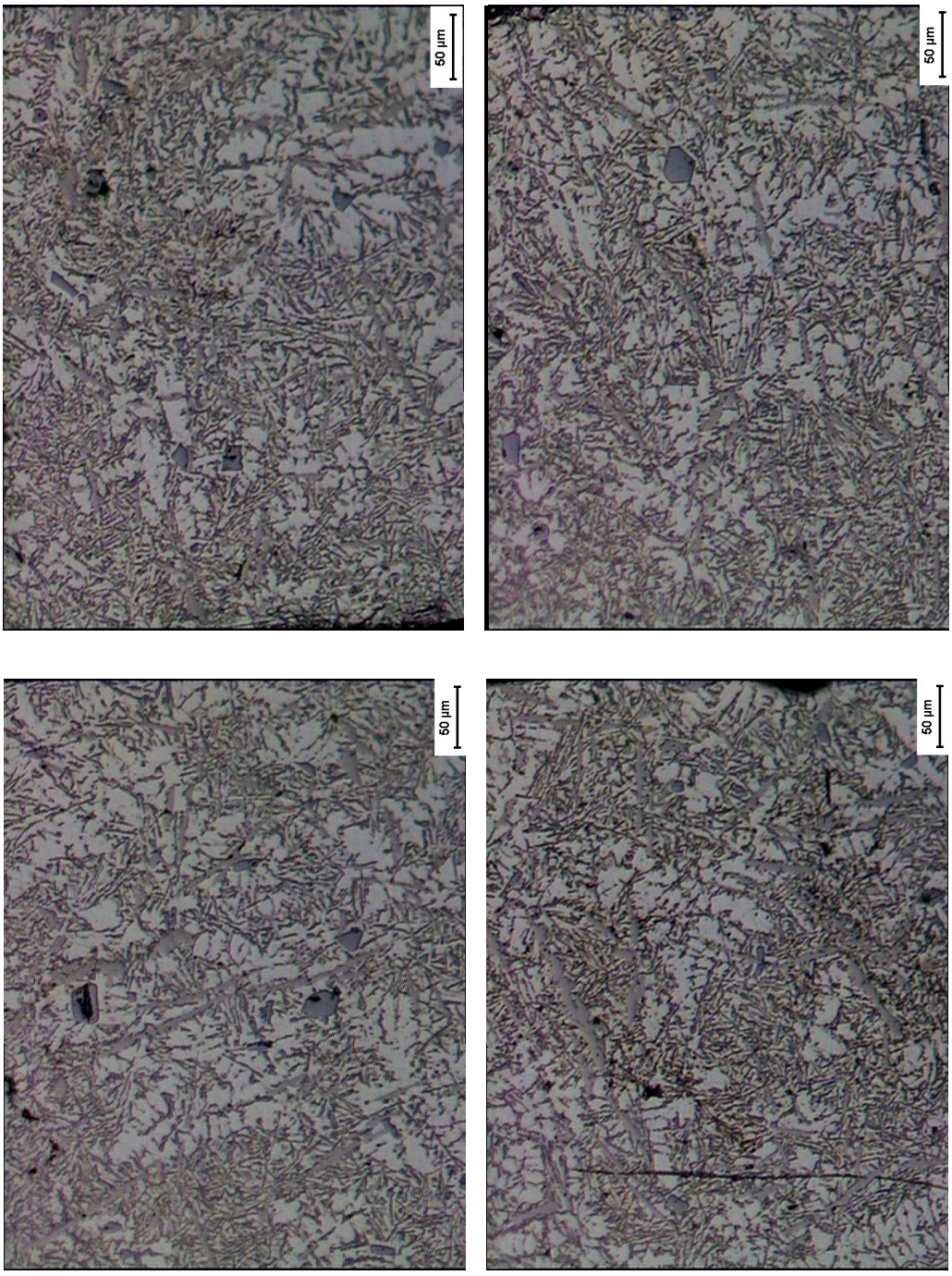
Şekil 5.25: Şekilde Al-Si-2Ti alaşımının ısıl işlemden önce + ile işaretlenmiş bölümü



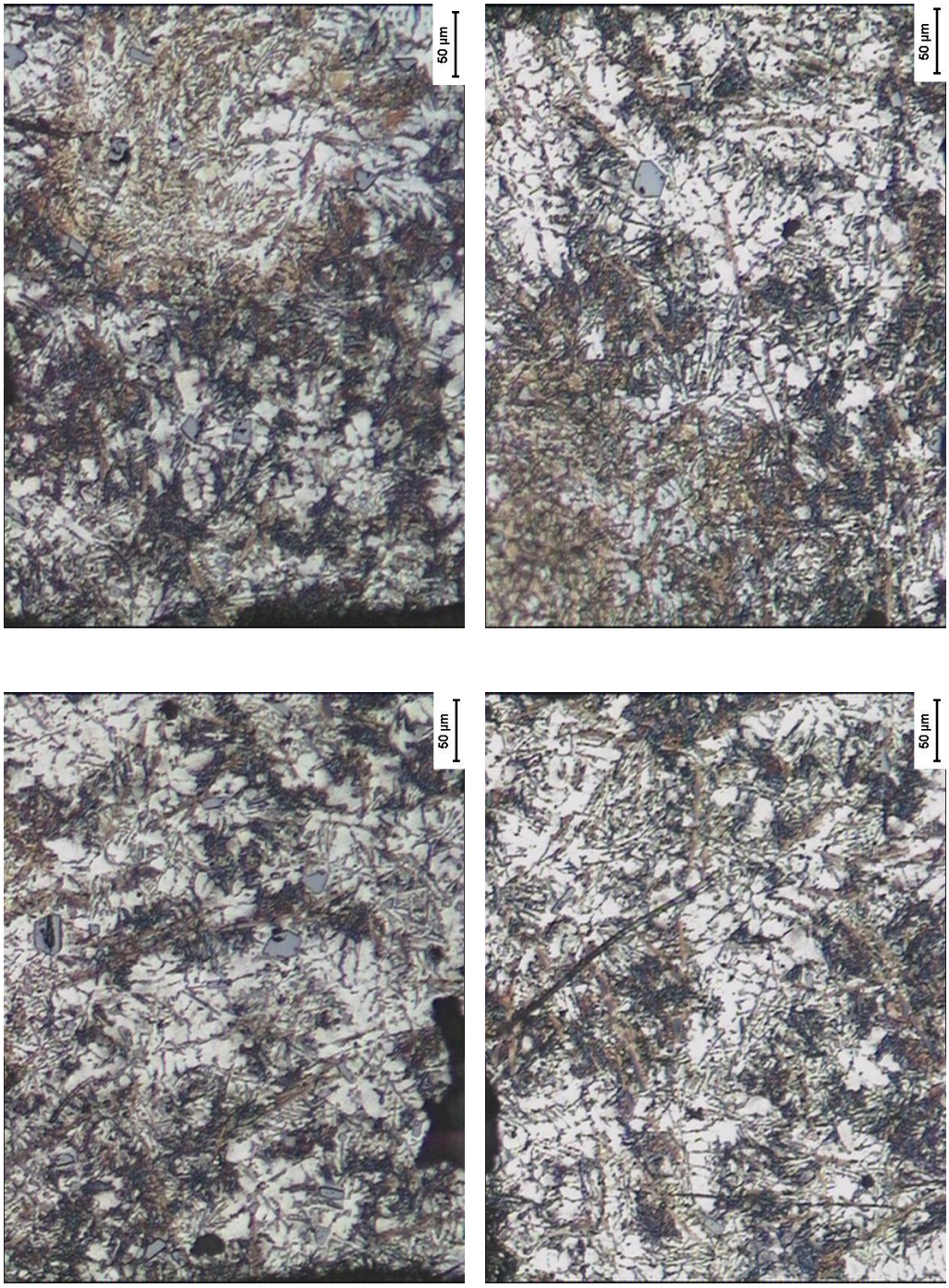
Şekil 5.26: Al-Si-2Ti alaşımının ısıl işlemden sonra + ile işaretlenmiş bölümü görülmektedir

Numuneler fırına parlatılmış konumda koyulduğundan ısıl işlemden sonra alınan görüntüler için numune yüzeyinde herhangi bir işlem yapılmamıştır.

Şekil 5.27'de Al-Si-3Ti alaşımından ısıl işlem öncesi alınan görüntüler, Şekil 5.28'de ise aynı alaşımın ısıl işlem sonrasında alınan görüntüleri verilmiştir.

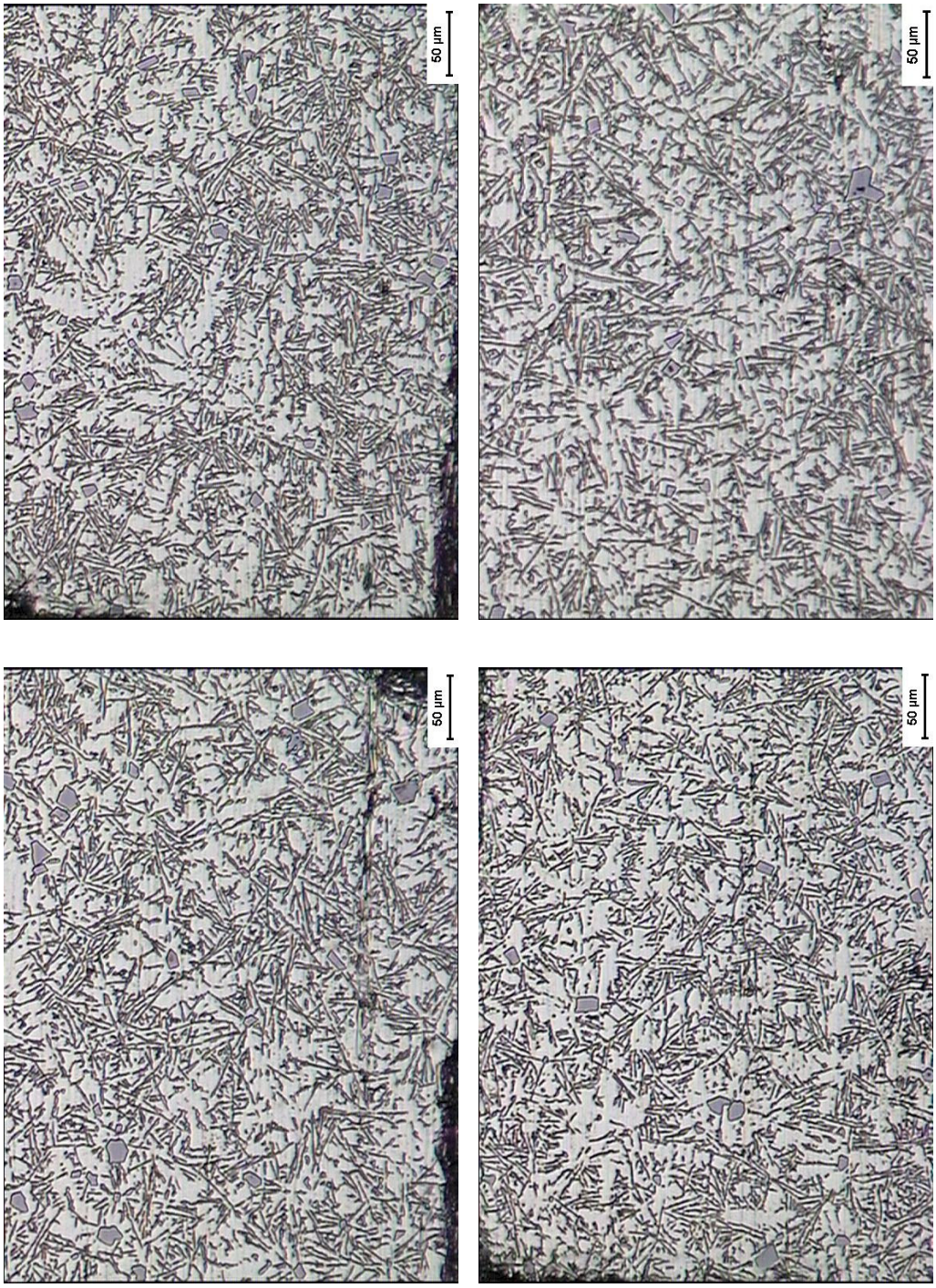


5.27: Al-Si-3Ti alaşımından ısıl işlem öncesi alınan görüntüler

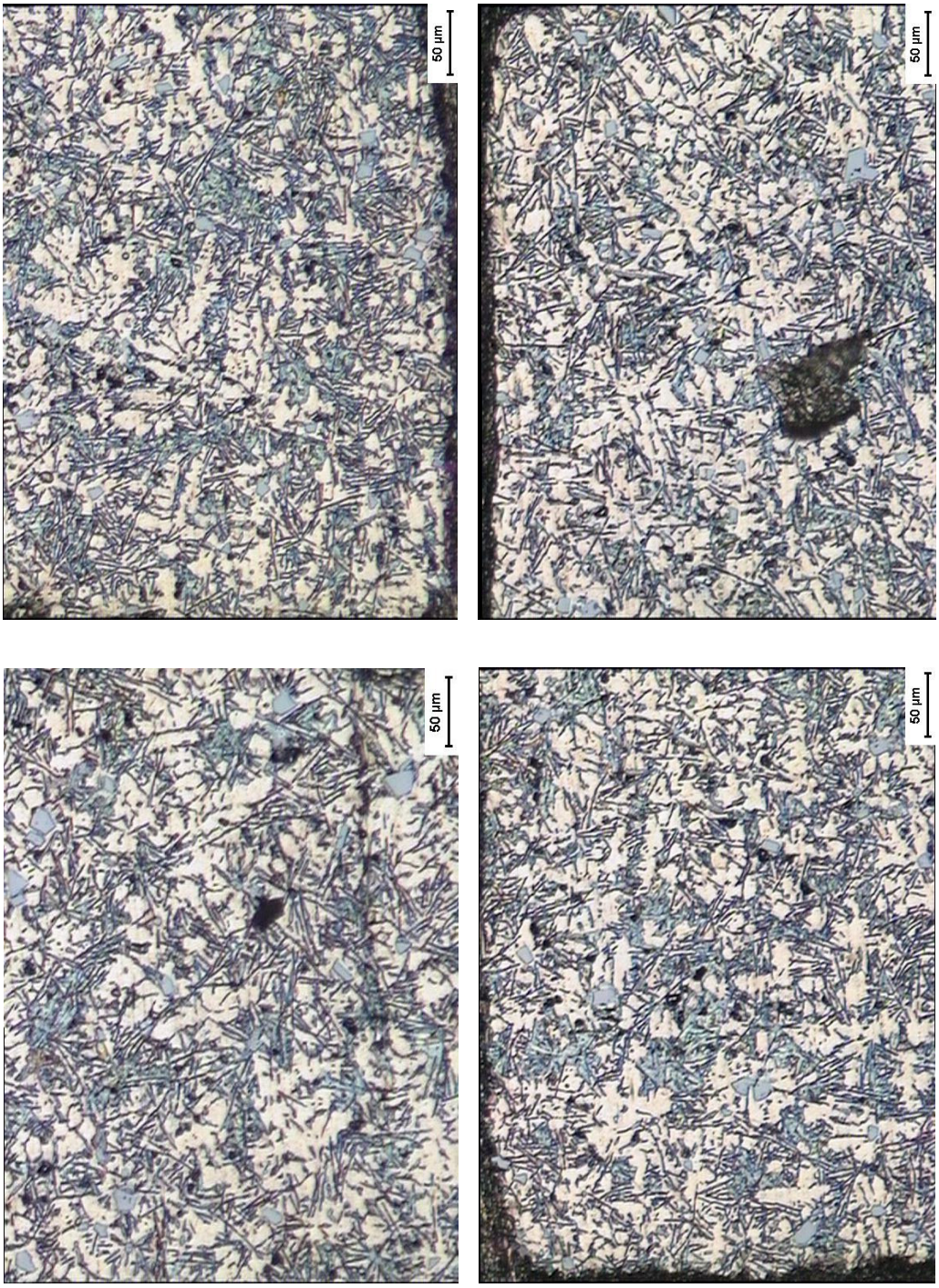


Şekil 5.28: Al-Si-3Ti alaşımın ısıl işlem sonrasında alınan görüntüleri

Şekil 5.29 ve 5.30'da ise sırasıyla ısıl işlem öncesinde ve ısıl işlem sonrasında titanyum içermeyen AlSi ötektik alaşımından alınan mikro yapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.29: Titanyum içermeyen AlSi ötektik alaşımından ısıl işlem öncesinde alınan görüntüler



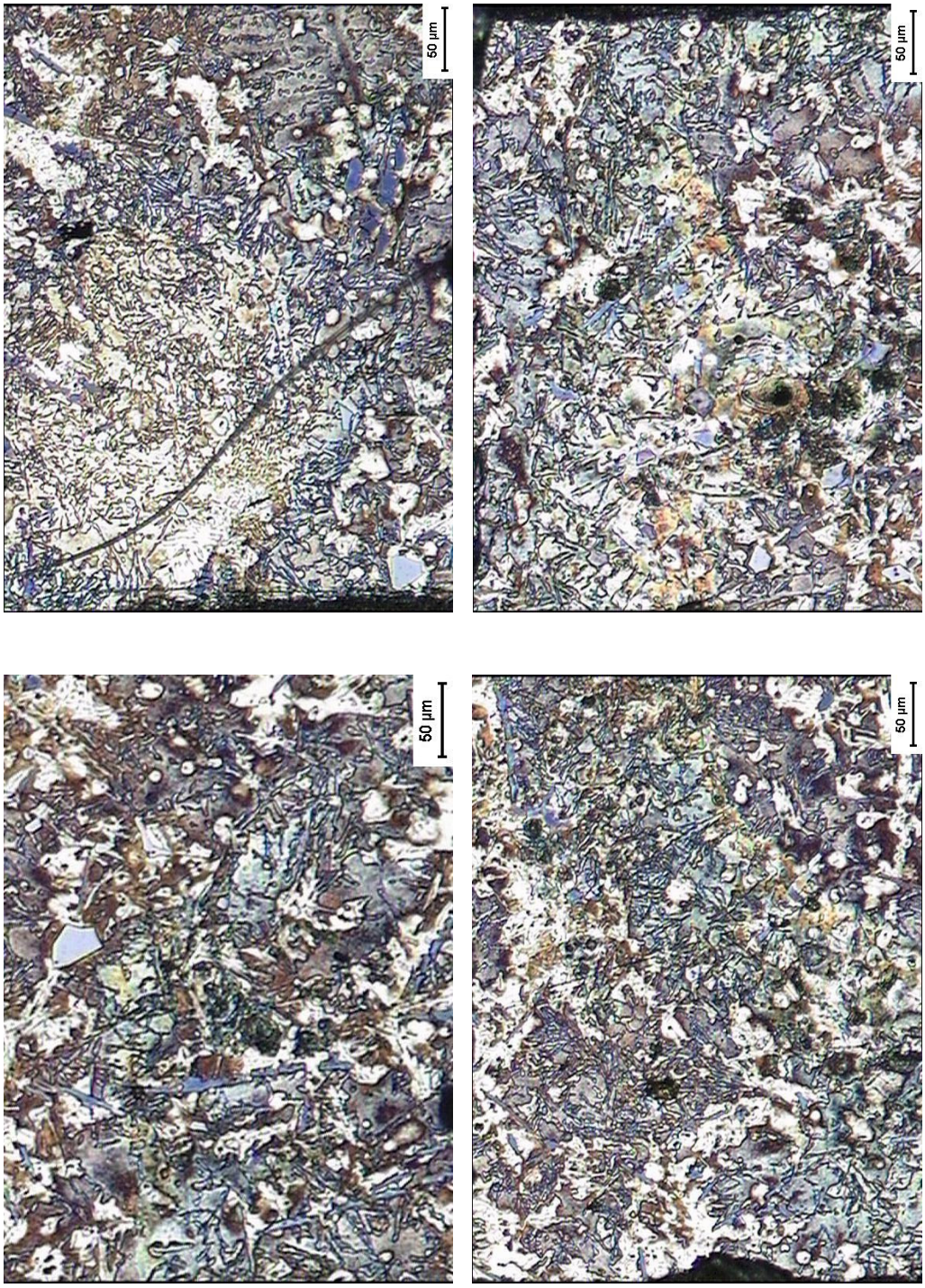
Şekil 5.30: Titanyum içermeyen AlSi ötektik alaşımından ısıl işlem sonrasında alınan görüntüler

Yapılan ısıl işlemler sonucunda titanyum içermeyen AlSi alaşımın 500 °C' de 8 saat tutulup suda soğutulması sonucu mikroyapısında göze çarpan bir değişiklik olmadığı kaydedilmiştir. Sadece bazı bölgeler küçük ötektik silisyum kristalleri ısıl şok nedeniyle kırılmıştır. Bu ufak kırılmalar dışında mikroyapı ısıl işlem öncesiyle aynı durumdadır.

Al-Si-2Ti ve Al-Si-3Ti alaşımlarında ise durum farklıdır. 8 saat 500 °C' de bekletilip suda soğutulan Al-Si-2Ti numunesinde yapılan mikroyapısal incelemeler sonucu titanyum içeren intermetaliklerin ısıl genleşme sonucu kırıldığı belirlenmiştir. Ancak kırılan intermetalik yapılar yapıya dağılmayıp oldukları yerde kalmışlardır. Yani ısıl işlem öncesi uzun lamellerden oluşan intermetalikler ısıl işlem sonrasın bu lamellerin yerinde sıralanmış küçük parçacıklar haline gelmiştir. Al-Si-3Ti alaşımında ise soğutma işlemi fırın içerisinde oldukça yavaş bir şekilde yapıldığından yapıda herhangi bir değişikliğe rastlanmamıştır. Isıl işlem öncesi ve sonrasındaki mikroyapılar arasında hemen hemen hiç fark yoktur. Hem Al-Si-2Ti hem de Al-Si-3Ti alaşımında ısıl işlem öncesinde ve sonrasındaki matris yapısında (Al-Si ötektik yapısı) herhangi bir değişiklik olmamıştır.

Elde edilen bu bilgiler ışığında Al-Si-XTi alaşımlarında oluşan intermetalikleri lamelli yapıdan farklı bir yapıya dönüştürmek için ısıl şok uygulamanın işe yaradığı belirlenmiştir. Ancak ısıl şok sonucu lamellerin sadece kırılarak küçük parçalar haline geldiği ancak yapı içine halen homojen bir şekilde dağılmadığı görülmüştür. Kırılan intermetaliklerin yapı içerisinde homojen olarak dağıtılabilmesi için sıcak deformasyon uygulanmasının muhakkak gerekli olduğu düşünülmektedir.

Isıl işlem sıcaklığının çözeltiye alma sıcaklığına yakın seçilmesi ve suda hızlı soğutma sonucu Al-Si-2Ti alaşımında alüminyum matris içerisinde intermetalik kristallerden çözünmeler olabileceği düşünülmüştür. Bu durumun söz konusu olup olmadığını belirlemek amacıyla Al-Si-2Ti alaşımına 200 °C' de 8 saat yaşlandırma işlemi uygulanmış ve numune bu işlemin ardından fırında soğutulmuştur. Bu ısıl işlemin ardından numunenin daha önce görüntü alınan işaretli bölgesinden görüntüler alınmıştır. Şekil 5.31'de bu görüntüler görülmektedir.



Şekil 5.31: 800 °C' de 8 saat tutulup suda soğutulan Al-Si-2Ti numunesinin 200 °C' de 8 saat tutulup fırında soğutulmasının ardından işaretli bölgeden alınan görüntüler

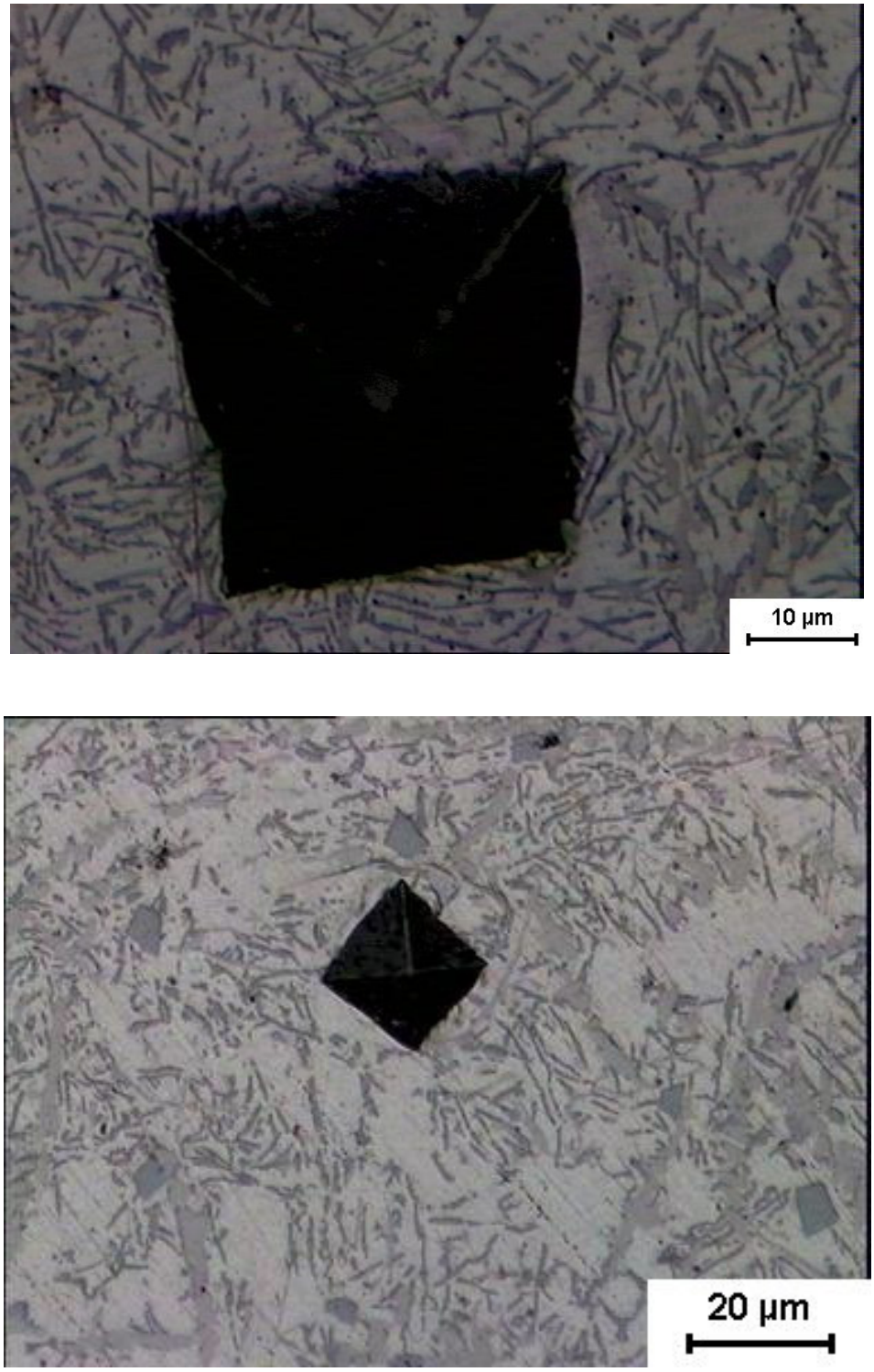
200 °C'de 8 saat boyunca yapılan ısıl işlem sonrasında ise malzemenin mikroyapısında herhangi bir difüzyonal ve bileşimsel değişim olmadığı belirlenmiştir.

5.5. Mikrosertlik Ölçümleri

Alaşımlara yapılan mikroyapı incelemelerinden sonra yapıda bulunan $TiAl_3$ intermetaliklerinin malzeme sertliğine etkisini incelemek için malzemelere sertlik testi uygulanmıştır. Malzemelerin sertliğinin ölçümünde bölümümüzde bulunan Fisherscope H100 sertlik cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.32). Ölçümler yapılırken maksimum 1 N yük uygulanmıştır. Yükün uygulanma süresi ise 20 saniyedir. Ölçümler sırasında olası bir hatayı önlemek için her numune için 3 ölçüm yapılıp sonuçların ortalaması alınmıştır. Elde edilen sertlik değerleri Tablo 5.4'te verilmiştir. Şekil 5.33'de % 2 titanyum ve % 10 titanyum içeren alaşımların sertlik ölçümleri sırasında oluşan izler görülmektedir. Şekil 5.34'te ise titanyum içeriği-sertlik değerleri ilişkisi grafikle ifade edilmiştir.



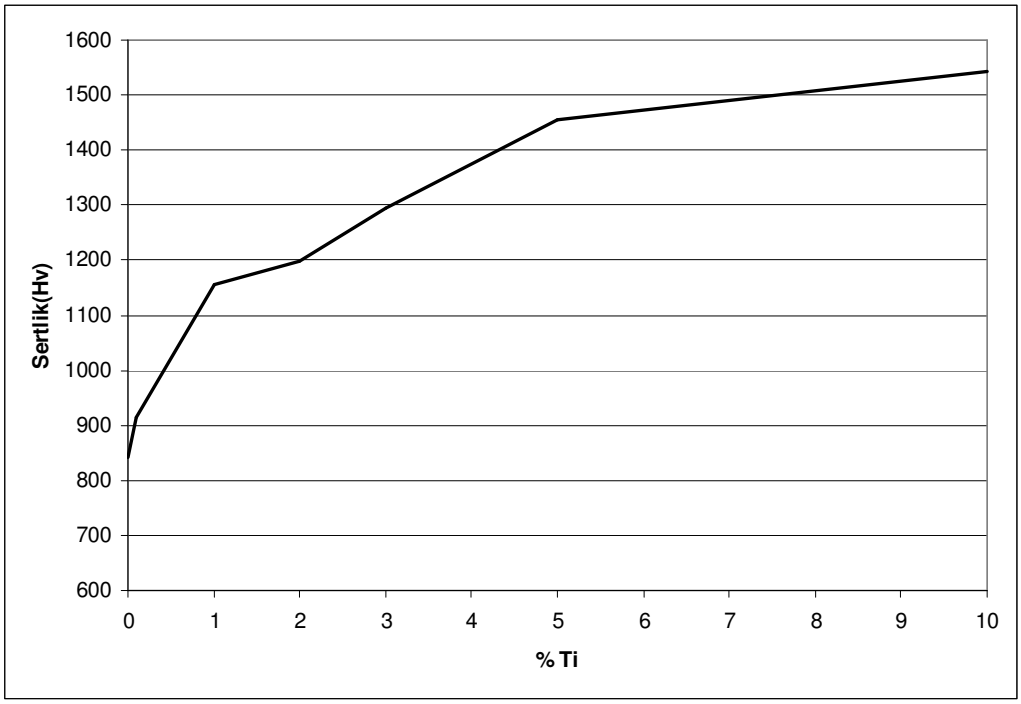
Şekil 5.32: Mikrosertlik ölçümlerinin yapıldığı sertlik ölçüm cihazı



Şekil 5.33: Sırasıyla % 2 Ti ve % 10 Ti içeren alaşımların mikroyapıları ve sertlik ölçümü sırasında oluşan izler

Tablo 5.4: Farklı miktarlarda titanyum içeren alaşımların mikrosertlik değerleri

Alaşım Bileşimi	**Sertlik Değeri (Hv)**
Al-Si Ötektik	841,63
Al-Si-0,1 Ti	913,00
Al-Si-1Ti	1156,23
Al-Si-2Ti	1198,70
Al-Si-3Ti	1295,00
Al-Si-5Ti	1454,30
Al-Si-10Ti	1543,70



Şekil 5.34: Titanyum ilavesine bağlı olarak sertlik değişimi

Tablo 5.1 ve Şekil 5.34'te görüldüğü gibi malzeme içerisindeki titanyum oranı arttıkça sertlik de artmaktadır. Bu artışın Al-Si ötektik yapısına göre görece daha sert olan $TiAl_3$ fazından kaynaklandığı açıktır. Alaşıma ilave edilen titanyum miktarı arttıkça yapıdaki $TiAl_3$ intermetalik kristallerinin sayısı ve boyutları da artmaktadır. Bu durum malzemenin genel sertliğinin artmasıyla sonuçlanmaktadır.

Titanyum içermeyen Al-Si alaşımının sertliği 841,63 HV iken % 10 titanyum ilavesiyle bu değer yaklaşık iki katına, 1543,7 HV 'ye çıkarılmıştır. Malzemenin mukavemet özelliklerinin genel bir göstergesi olan sertlik değerindeki bu artış, diğer mukavemet değerlerinde de benzer bir artış olduğu şeklinde yorumlanabilir.

5.6. Haddeleme

Dökülen AlSi-XTi alaşımlarının plastik şekil verilebilirliğini belirleyebilmek amacıyla alaşımlara soğuk haddeleme işlemi uygulanmıştır. Bu işlem için bölümümüzde bulunan hadde makinesi kullanılmıştır. Öncelikle AlSi3Ti alaşımı döküldüğü konumda haddelenmeye çalışılmıştır. Ancak malzemenin sertliği yüksek olduğundan haddeleme işlemi başarısız olmuştur ve malzeme haddeleme sırasında kırılmıştır. Şekil 5.35'de bu malzemenin haddeleme sonrası kırılmış haldeki resmi görülmektedir.



Şekil 5.35: Haddeleme sırasında kırılan Al-Si-3Ti alaşımının görüntüsü

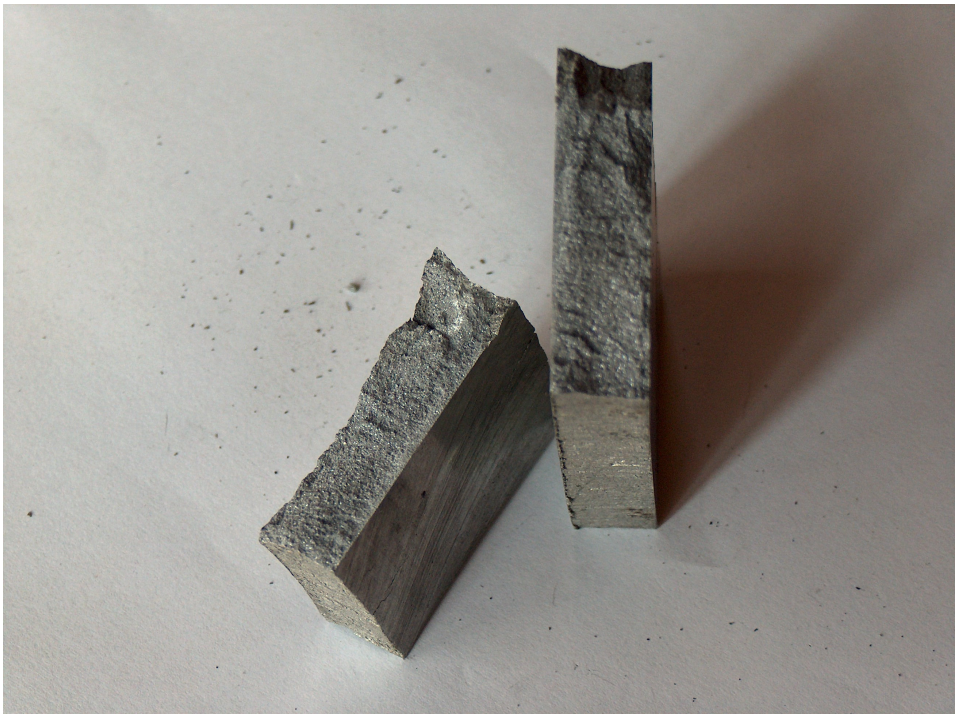
Yapılan ilk denemeden sonra malzemelerin döküm halinde haddelenemeyeceği belirlenmiştir. Bu sonuç ışığında aynı bileşime sahip malzeme fırında 500°C' de 8 saat

boyunca ısıl işleme tabi tutulmuştur. Isıl işlemin ardından numune fırında yavaş olarak soğutulmuştur. Bu işlemin ardından malzeme soğuk haddelemeye tabi tutulmuştur. Ancak sonuçta bir değişiklik olmamıştır. Alaşımın şekillendirilebilme kabiliyeti düşük olduğundan malzeme haddeleme sırasında kırılmıştır. Isıl işlem uygulanıp haddeleme sırasında kırılan malzemenin görüntüsü Şekil 5.36'da verilmiştir.



Şekil 5.36: Isıl işlem sonrasında haddeleme sırasında kırılan malzemenin görüntüsü

İkinci haddeleme işleminin de başarısız olmasından sonra alaşımların dökümünde hammadde olarak kullanılan Al-Si ötektik alaşımının haddelenmesi denenmiştir. Bu malzemede de diğerleri gibi soğuk haddeleme sırasında kırılmıştır. Haddeleme sırasında kırılan Al-Si ötektik alaşımının görüntüsü Şekil 5.37'de verilmiştir.



Şekil 5.37: Haddeleme sırasında kırılan Al-Si ötektik alaşımının görüntüsü

Yapılan bu haddeleme denemelerinden sonra ilgili alaşımların ısıl işlemli ya da ısıl işlemlenmiş konumda soğuk olarak plastik şekillendirilemeyeceği ortaya çıkmıştır. Isıl işlem çalışmalarında da belirtildiği gibi alaşım içindeki intermetalik yapıların yapıya homojen ve küçük boyutlu partiküller olarak yayılması için sıcak deformasyona ihtiyaç vardır. Üzerinde çalışılan AlSi-XTi alaşımlarının sıcak deformasyonu işlemi bu tez çalışması sırasında yapılmak istenmiştir. Ancak bölümümüz laboratuvarlarının taşınması nedeniyle çalışmalar mümkün olmamıştır.

5.7. Aşınma Testi

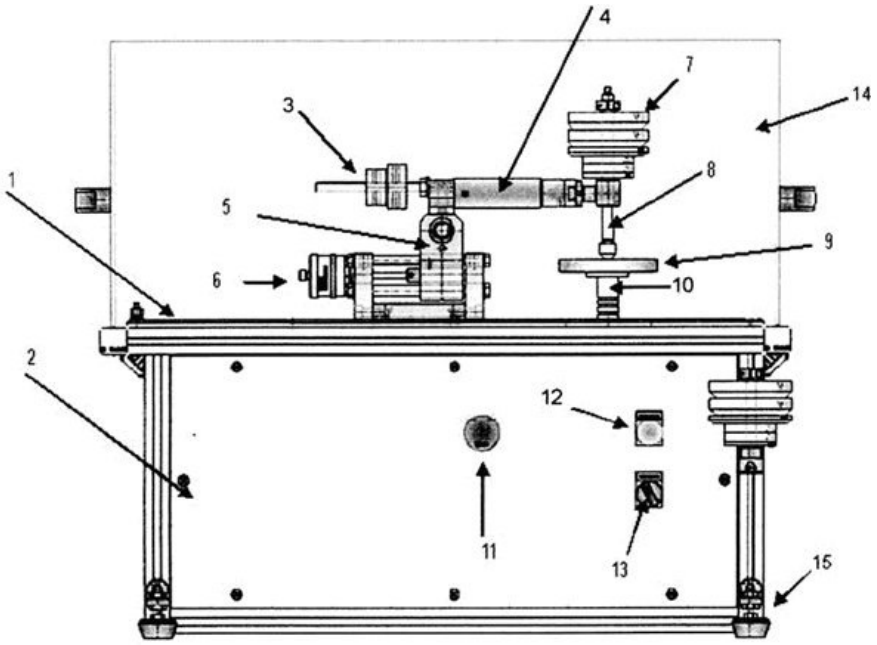
Alaşımlara yapılan mikro sertlik testlerinden elde edilen sonuçlar yorumlandığında artan Ti miktarıyla birlikte alaşımların sertliğinin arttığı görülmüştür. Bu sonuçtan yola çıkılarak alaşımlara aşınma testi uygulanmıştır. Testlerden önce sertlik değerlerine bakılarak yapılan yorumlarda artan Ti miktarıyla birlikte aşınma sırasındaki ağırlık kaybının azalacağı düşünülebilir. Ancak mikroyapılarda görülen plaka tipi/iğnesel intermetalik kristallerin çentik etkisi yaratıp kırılarak uzaklaşması sebebiyle aşınma testleri sırasında ağırlık kaybının artmasına neden olacağı yapılan ön testlerle belirlenmiştir. Ayrıca oluşan

intermetalikler çok yüksek sertliklere sahip gevrek fazlar olduğundan aşınma sırasında kırılarak uzaklaşmasıyla ağırlık kaybının artmasına neden olacaktır.[20]



Şekil 5.38: Aşınma testlerinin gerçekleştirildiği Pin-On-Disk tipi aşınma cihazı

Yapılan çalışmada aşınma testi için Şekil 5.83'de görülen Nanovea MT/60/NI model Pin-On-Disk tipi aşınma cihazı kullanılmıştır. Aşınma cihazının şematik resmi Şekil 5.39'da verilmiş olup parçalarının açıklaması ise Tablo 5.5'tir. Kullanılan bu cihazda aşınma için karşıt malzeme olarak 5 mm çapında çelik bilye kullanılmıştır. Aşınma işleminden önce numuneler aşınma cihazına uygun (~ 2cm x 2cm) boyutta kesilmiştir. Ardından testin uygulanacağı yüzey metalografik olarak hazırlanıp parlatılmış konuma getirilmiştir. Test uygulanmadan önce ağırlık kaybını belirleyebilmek için numuneler alkolle yıkanıp ± 0,1 mg hassasiyete sahip Precisa XB220A model hassas terazide tartılmıştır.



Şekil 5.39: Kullanılan aşınma cihazının şematik gösterimi

Tablo 5.5: Aşınma cihazının parçalarının açıklaması

1	Taban Plakası
2	Ön Panel
3	Karşıt Ağırlıklar
4	Kuvvet ölçüm hücresi
5	Yük kolu desteği
6	Yarıçap seçimi için mikrometre
7	Kullanılan test ağırlıkları
8	Aşındırıcı (top, iğne) tutucu
9	Döner disk
10	Tribometre ekseni
11	Acil durum anahtarı
12	Gücün açık olduğunu gösteren ikaz lambası
13	Gücü açıp kapama anahtarı
14	Güvenlik kapağı
15	Sabitleme ayakları

Test sırasında malzemelere 10 N yük uygulanmıştır. Sürtünme mesafesi olarak 1000 m seçilmiş ve aşınma işlemi 200 devir/dakikalık (~ 0,1 m/s çizgisel hız) hızda gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri sırasında herhangi bir yağlayıcı ya da soğutucu kullanılmamıştır. Testler kuru ortamda ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Test bitiminde numuneler alkolle yıkanıp tekrar tartılmıştır. Ağırlık kaybı, sürtünme katsayısı gibi verilerin yanında yorum yapabilmek için numunelerin aşınma yüzeyleri de incelenmiştir.

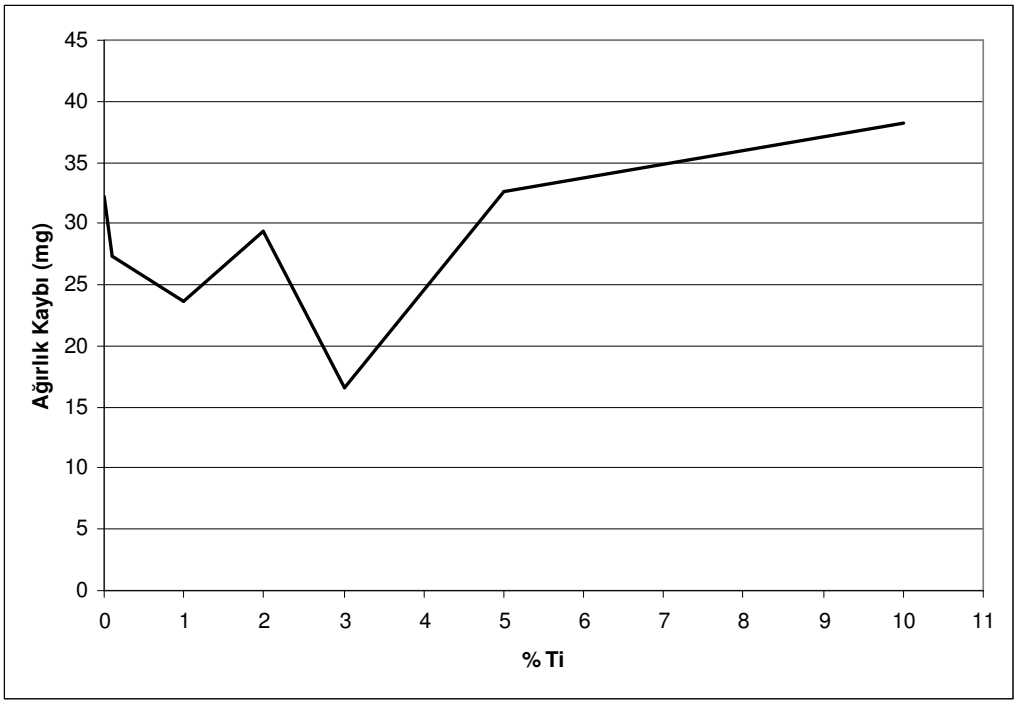
Tablo 5.6'da alaşımlarda aşınma testi sonucu oluşan ağırlık kaybı değerleri görülmektedir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde literatürle uyumlu bir şekilde artan Ti miktarıyla birlikte alaşımların ağırlık kaybının da artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Ancak % 1 Ti ve %3 Ti içeren alaşımların bu trende uymadıkları göze tespit edilmiştir. Bunun sonucunda bu alaşımlara aynı şartlar altında tekrar aşınma testi uygulanmıştır. Yapılan ikinci aşınma testleri sonucunda yine aynı sonuçlar elde edilmiştir.

% 0,1 Ti içeren alaşımdan % 1 Ti içeren alaşıma geçilirken ağırlık kaybındaki azalmanın nedeni intermetalik kristallerin morfolojisine bağlanmıştır. Daha öncede belirtildiği gibi % 0,1 ve % 1 Ti içeren alaşımlarda oluşan intermetalikler yaprak şeklindedir. Yapraksı morfolojideki intermetalik kristallerin plaka tipi morfolojideki intermetalikler gibi çentik etkisi yaratmadığı böylece alaşımın aşınma direncine olumsuz etki yapmayacağı düşünülmüştür. Bu düşünceden yola çıkılarak %1 Ti içeren alaşımda % 0,1 Ti içeren alaşıma göre daha fazla intermetalik bulunduğundan aşınmadaki ağırlık kaybının azalması normal olarak yorumlanabilir.

% 3 Ti içeren alaşımın ağırlık kaybının trende uymamasının nedeni ise döküm sırasında malzeme içerisine gaz girmesi ve malzeme içerisinde gaz boşluklarının oluşması olarak düşünülmüştür. Bu numune için iki kez aşınma testi yapılıp aynı sonuç alınınca numune yüzeyi tekrar incelenmiştir. Yapılan bu inceleme sonucu numune içerisinde gaz boşlukları olduğu belirlenmiştir. Elde edilen ağırlık kaybı değerleri Şekil 5. 40'ta grafik olarak verilmiştir.

Tablo 5.6: Alaşımlarda aşınma testi sonucu oluşan ağırlık kaybı değerleri

Alaşım Bileşimi	**Ağırlık Kaybı (mg)**
AlSi Ötektik	32,2
AlSi0,1Ti	27,3
AlSi1Ti	23,6
AlSi2Ti	29,4
AlSi3Ti	16,6
AlSi5Ti	32,6
AlSi10Ti	38,2



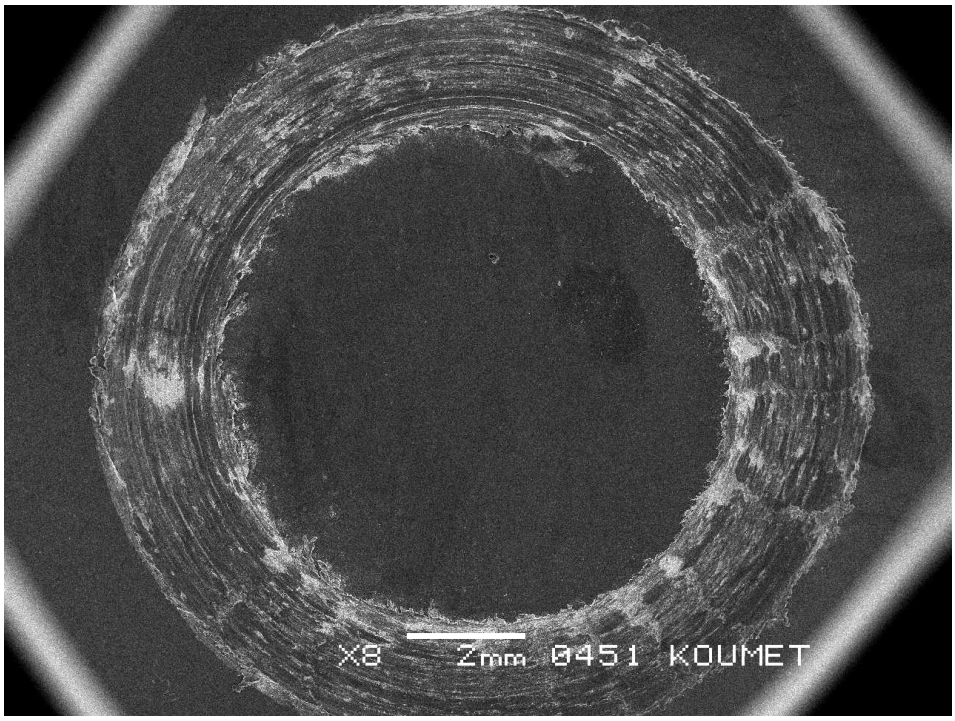
Şekil 5. 40: Ti içeriğine bağlı olarak aşınmada ağırlık kaybı değerleri

5.7.1. Aşınma yüzeyi incelemeleri

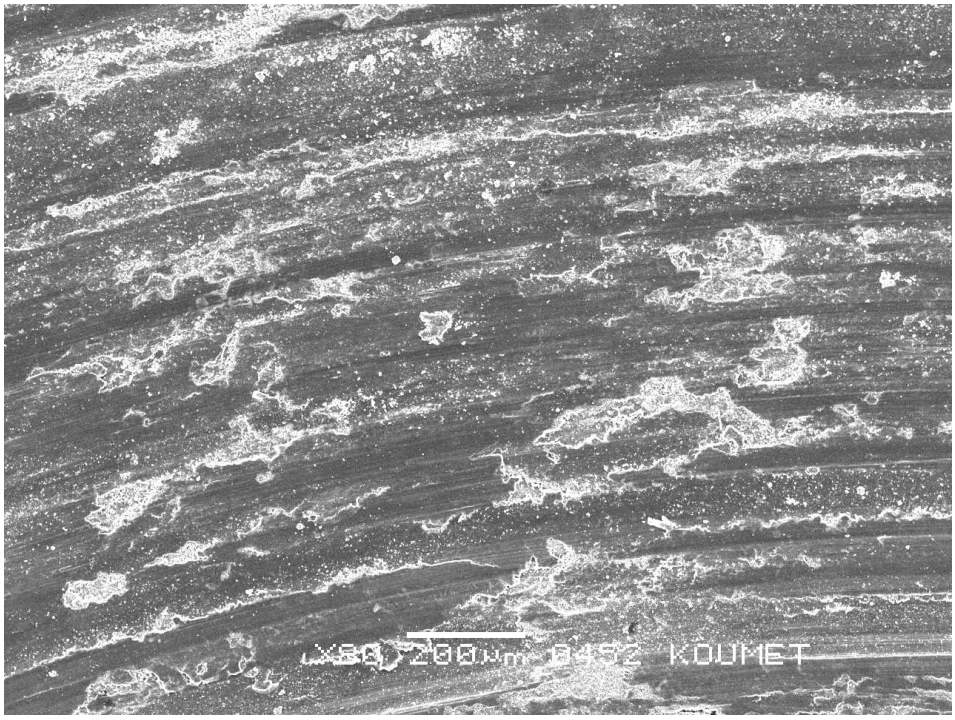
Numunelere uygulanan aşınma testleri sonrasında Al-Si-0,1Ti, Al-Si-5Ti ve Al-Si10Ti alaşımlarının aşınma yüzeyleri elektron mikroskobunda incelendi ve bazı bölgelere EDX analizi uygulandı. Aşınmış yüzeylerin incelenmesinden önce numunelerin aşınma yüzeylerinde kopmuş intermetalik partiküller olacağı tahmin edilmekteydi. Bunun sebebi Al matrise göre sert olan intermetalik kristallerin aşınma işlemi sırasında daha fazla

kırılmaya uğrayacağının düşünülmesidir. Bu düşünce artan Ti içeriğiyle birlikte aşınmada oluşan ağırlık kaybının artmasıyla da paralellik göstermektedir. Bu öngörüler ışığında yapılan aşınma yüzeyleri incelemeleri sonucu aşınma yüzeylerinde bir çok partikül varlığı tespit edilmiş bu partiküllere yapılan EDX analizleri sonucu bulunan partiküllerin ya tamamının Ti içeren intermetalik olduğu ya da partikülün büyük bölümünün yine Ti içeren intermetaliklerden oluştuğu belirlenmiştir.

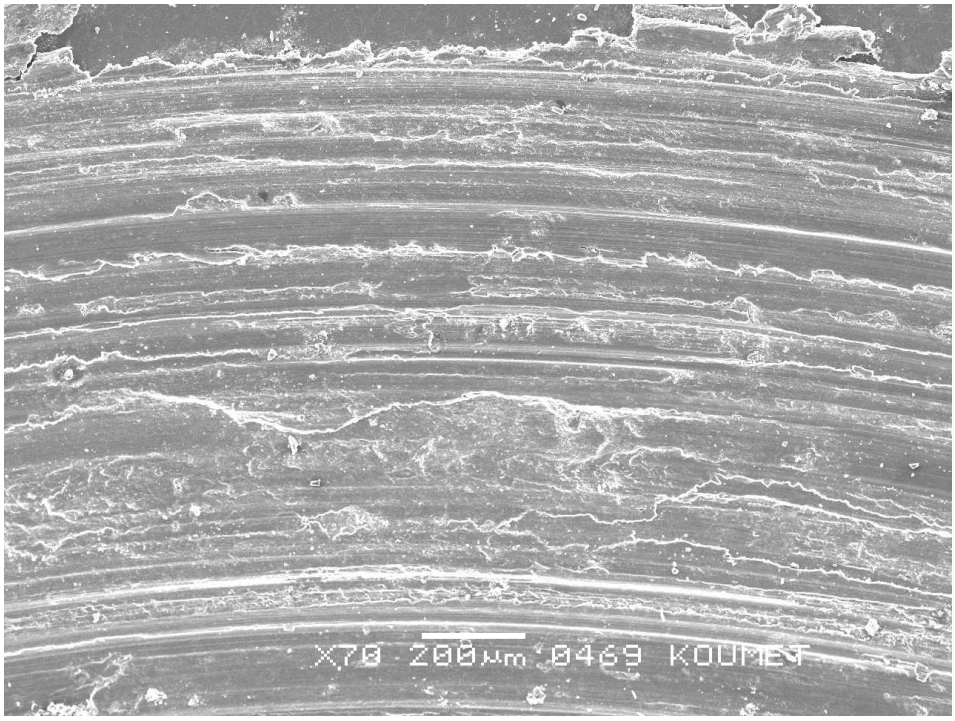
Şekil 5.41'de ve Şekil 5.42'de Al-Si-0,1Ti içeren alaşımın genel aşınma yüzeyinden alınan 2 adet SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.41: Al-Si-0,1Ti içeren alaşımın aşınma yüzeyinin küçük büyütmedeki SEM görüntüsü

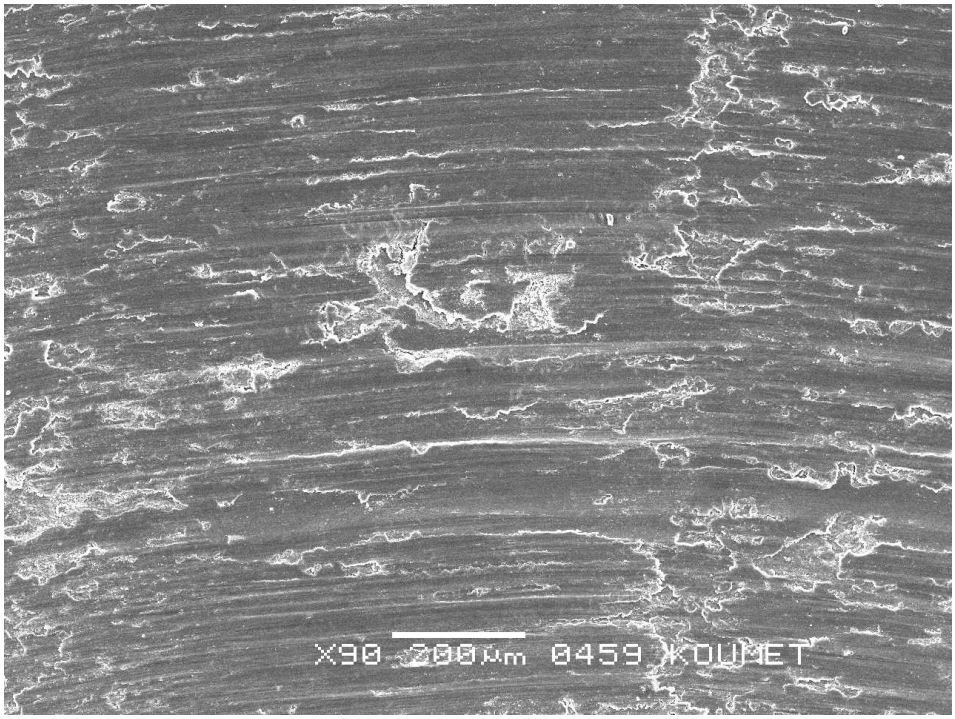


Şekil 5.42: Al-Si-0,1Ti içeren alaşımın aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 5.43: AlSi5Ti alaşımının aşınma yüzeyinden alınan SEM görüntüsü

Şekil 5 43'de Al-Si-5Ti alaşımının, Şekil 5.44'te ise Al-Si-10Ti alaşımının aşınma yüzeyinden alınan SEM görüntüsü verilmiştir. Bu görüntülerde birbirine paralel olarak uzanan çizgiler abrazif aşınma sonucu oluşmuştur. Yapıda görünen diğer kopmalar ise intermetalik kristallerin yapıdan ayrılırken oluşturduğu adhezif aşınmanın ürünüdür.

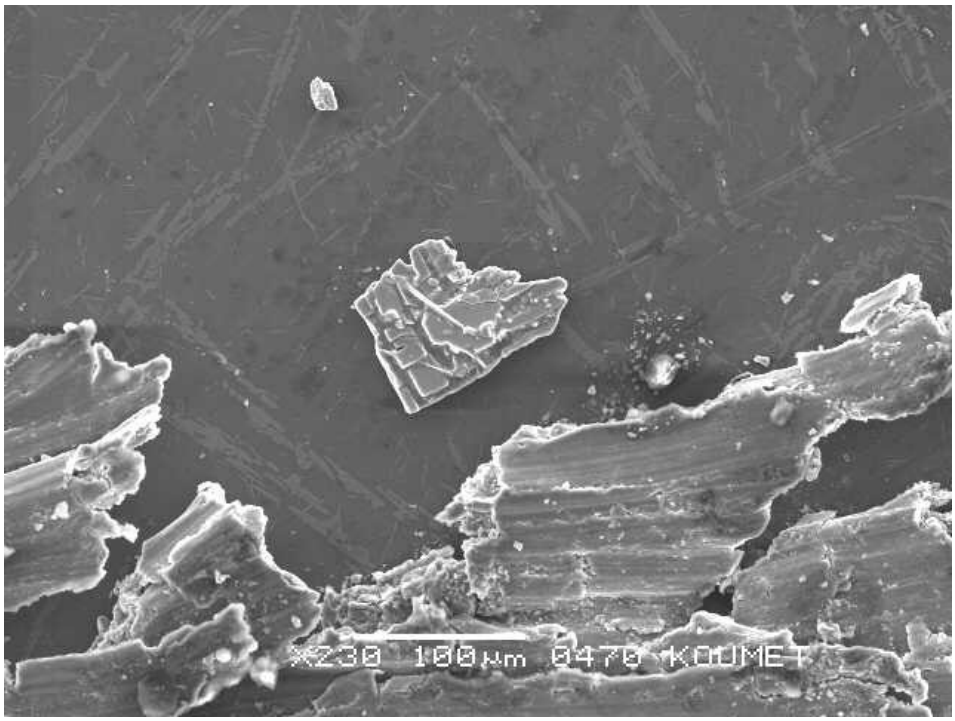


Şekil 5.44: Al-Si-10Ti alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

Şekil 5.45'de ise Al-Si-5Ti içeren alaşımın aşınma yüzeyinde bulunan bir partikülün SEM görüntüsü bulunmaktadır. Görüntünün alt kenarı aşınma yüzeyinin hemen kenarı olmaktadır. Kopan partikül ise aşınma yüzeyinin kenarında parlatılmış bölge üzerinde bulunmaktadır. Parlatılmış olan bu bölgede yapı içerisindeki intermetalik kristaller de kolayca görünmektedir.

Şekil 5.46'da yine Al-Si-5Ti içeren alaşımın aşınma yüzeyinde bulunan bir partikülün SEM görüntüsü ve bu partikül üzerinde yapılan EDX (element dağılım) analizi verilmiştir. Yapılan analiz sonucu partikülün alt bölgesinde Ti miktarının oldukça yüksek olduğu bölgeler saptanmıştır. Bu bölgeler SEM görüntüsünde de açıkça belli olmaktadır. Bu oluşumların yüksek Ti içermeleri bunların intermetalik kristaller olduğunun kanıtıdır.

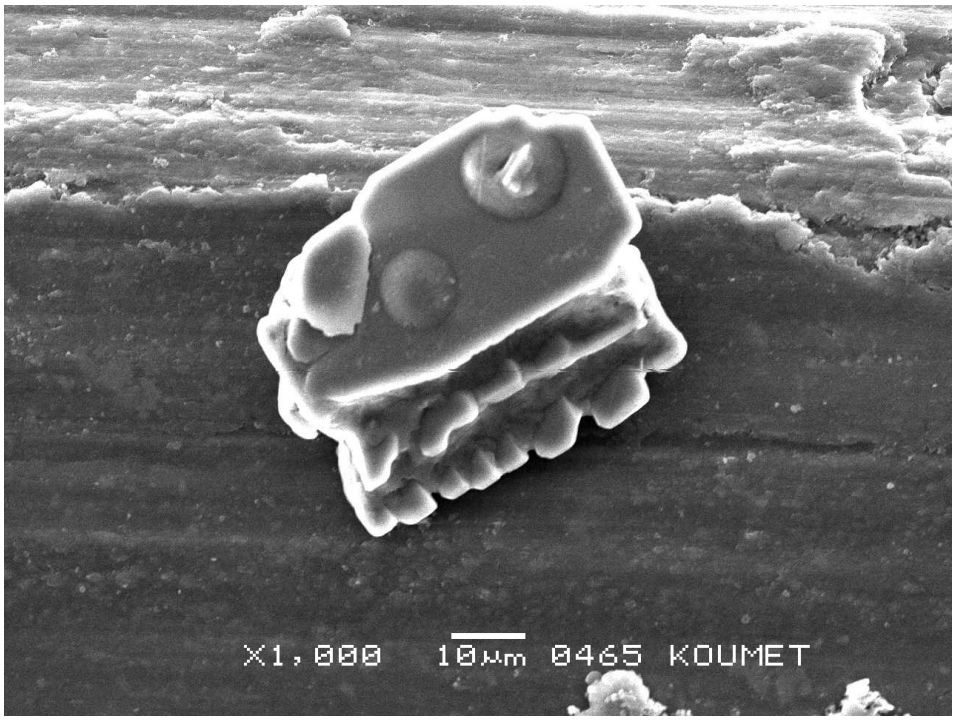
Ayrıca partikülün üst bölgesi de yüksek oranda Ti içermektedir, bu durumda üstteki bölgenin bir intermetalik kristal olduğunu göstermektedir.

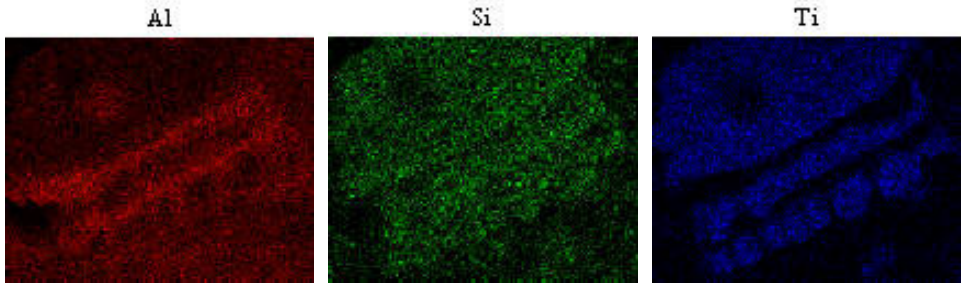


Şekil 5.45: Al-Si-5Ti alaşımının aşınma yüzeyinde bulunan partikül ve arka planda görünen parlatılmış yüzeyde görünen intermetalik kristaller

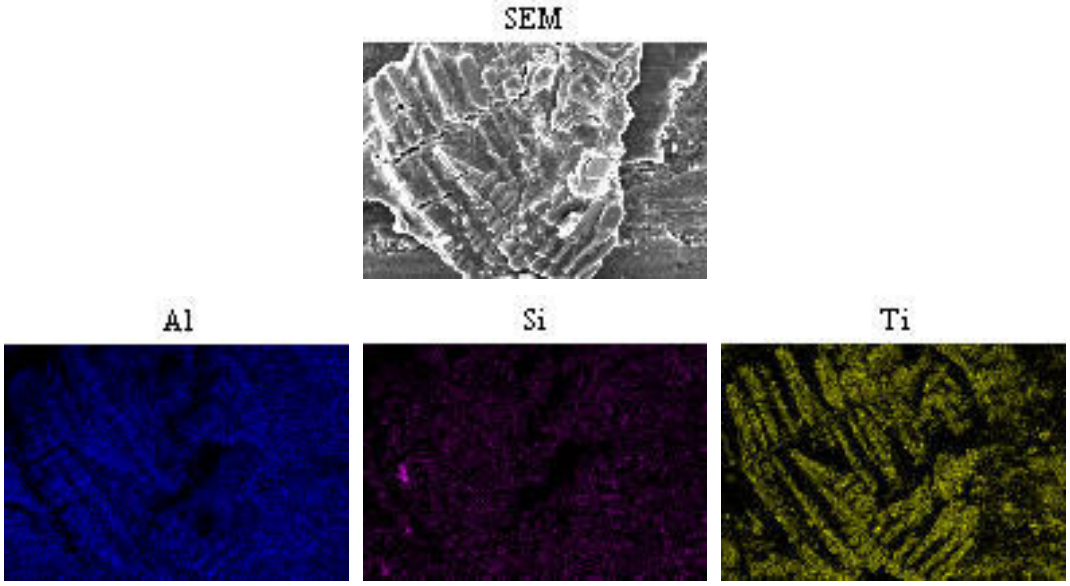
Şekil 5.47 ve 5.48'de Al-Si-10Ti alaşımlarının aşınma yüzeylerinde bulunan iki adet partikülün SEM görüntüsü ve EDX (Mapping) analizleri bulunmaktadır.

Aşınma yüzeylerinde yapılan SEM incelemeleri ve EDX analizleri sonucu aşınma sonucu bir çok intermetalik partikülün koptuğu belirlenmiştir. Bu durum incelemeler öncesinde yapılan öngörülerle uyuşmaktadır. Al-Si alaşımları içerisine katılan Ti miktarının artması sertliğe olumlu etki yaparken aşınma özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini daha önceki bölümlerde açıklamıştık. Aşınma özelliklerinin olumsuz etkilenmesinin sebebi titanyum içerikli intermetaliklerin aşınma sırasında kolay bir şekilde kırılmasıdır. İntermetaliklerin kolay bir şekilde kırılmasının sebebi ise uzun plakalar şeklinde bulunmalarıdır.

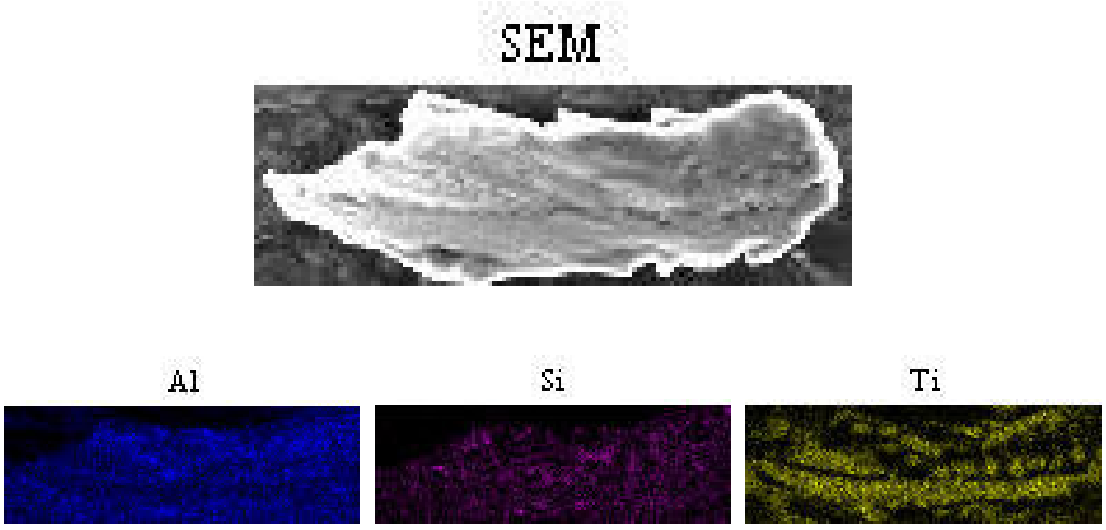




Şekil 5.46: Al-Si-5Ti içeren alaşımın aşınma yüzeyinde bulunan partikülün SEM görüntüsü ve aynı partikülün EDX (Mapping) analizi



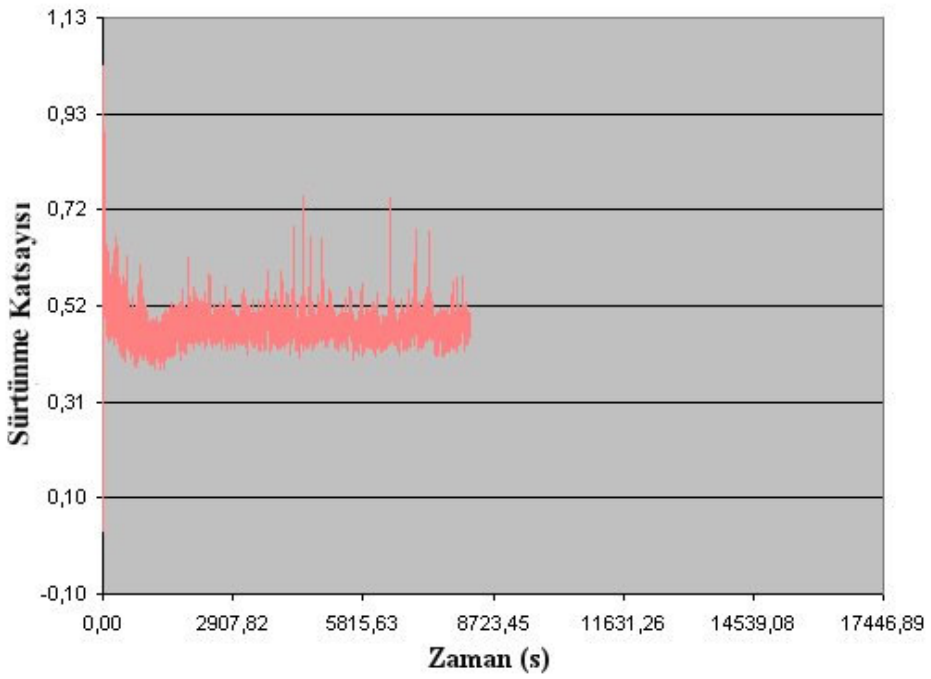
Şekil 5.47: Al-Si-10Ti alaşımının aşınma yüzeyinde bulunan partikülün SEM görüntüsü ve EDX (Mapping) analizi



Şekil 5.48: Al-Si-10Ti alaşımının aşınma yüzeyinde bulunan partikülün SEM görüntüsü ve EDX (Mapping) analizi

5.7.2. Sürtünme katsayısı değişimi

Aşınma testlerinde sürtünme katsayısı ile ağırlık kaybı arasında doğru orantı bulunur. İki malzeme arasındaki sürtünme ne kadar az olursa birbirlerini o kadar az aşındırdığı tribolojik bir gerçektir. Bu nedenle yapılan bu çalışmada alaşım içerisindeki titanyum miktarı arttıkça sürtünme katsayısının artması beklenmektedir. Aşınma testlerinin yapıldığı cihaz test sırasında kaydettiği datalar sonucu test bittikten sonra zaman bağlı sürtünme katsayısı değişimini vermektedir. Şekil 5.49'da Al-Si-5Ti alaşımı için bu yöntemle elde edilen zaman-sürtünme katsayısı diyagramı verilmiştir.

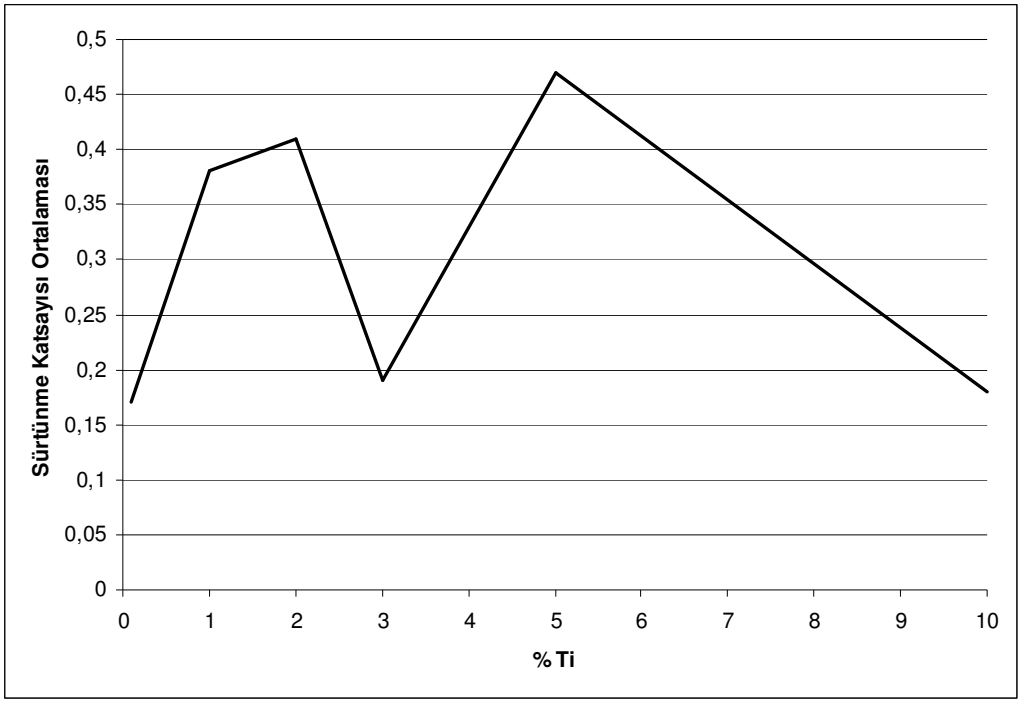


Şekil 5.49: Al-Si-5Ti içeren alaşımın aşınma testi sonucu elde edilen Zaman-Sürtünme Katsayısı diyagramı

Kullanılan aşınma cihazı test sırasında yaklaşık 1 saniyede 3 değer aldığından test sonucunda elde edilen grafik yaklaşık 60,000 verinin sonucunda oluşmaktadır. Bu durumda farklı alaşımlar için elde edilen grafiklerin karşılaştırılmasını zorlaştırılmaktadır. Bunu önlemek için iki farklı yönteme başvurulmuştur.

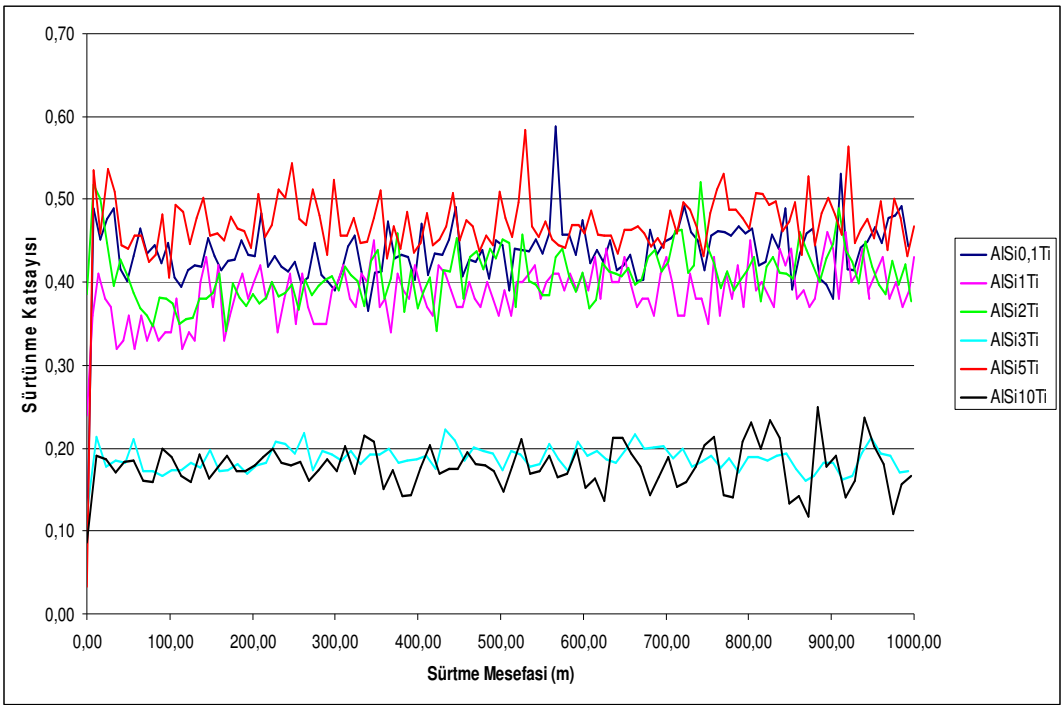
İlk olarak elde edilen verilerin ortalaması alınarak her alaşım için test boyunca elde edilen bir ortalama sürtünme katsayısı değeri belirlenmiştir. Şekil 5.50'de alaşım içerisindeki Ti

oranına bağlı olarak ortalama sürtünme katsayısı değişimi grafiği verilmiştir. Bu diyagramda %0,1–2 Ti arasında bir artış görülmektedir. Bu trend ağırlık kaybından yola çıkılarak yapılan yoruma uymaktadır. Ancak %3 ve % 10 Ti içeren malzemelerin test sonuçlarında ise beklenenin aksine çok düşük sürtünme katsayıları ortalamalarına sahiptir. Bu iki alaşım için aşınma testi iki kez tekrarlanmasına rağmen sonuçlarda bir değişiklik olmamıştır. Testlerin tekrarından sonra sonuçlarda bir değişiklik olmamasının ardından bu iki alaşım için beklenmedik sonuçlar ortaya çıkmasının nedeni olarak döküm sonucunda oluşan gaz boşlukları düşünülmüştür.



Şekil 5.50: % Ti oranına bağlı ortalama sürtünme katsayısı değişimi

İkinci bir yöntem olarak cihaz tarafından verilen yaklaşık 60,000 değerden her 500. değer alınarak yeni Sürtme Mesafesi- Sürtünme Katsayısı diyagramları çizilmiştir. Böylece diyagram çiziminde kullanılan değer sayısı 120 civarına indirilip diyagram sadeleştirilmiştir. Şekil 5.51'dea elde edilen sadeleştirilmiş diyagramların tüm alaşımlar için bir arada gösterildiği diyagram bulunmaktadır. Bu diyagramda da % 3 ve % 10 Ti içeren alaşımların değerleri beklenenin altında gözükmektedir.



Şekil 5.51: Her bir alaşım için sadeleştirilmiş Sürtünme Mesafesi- Sürtünme Katsayısı grafiklerinin tek diyagramda gösterilmesi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yurdumuzda ve dünyada en çok kullanılan demir dışı metal olan alüminyumun özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılan bu çalışmada alüminyum-silisyum ötektik alaşımı içerisine mukavemet ve sertlik özelliklerini artırmak için titanyum ilavesi yapılmıştır. Çalışma da farklı titanyum içeriğine sahip alaşımlar indüksiyon ocağında ergitilip metal kalıba dökülmüştür.

Döküm işlemlerinden sonra malzemelerden numuneler alınarak ışık mikroskobu ve tarama elektron mikroskobu altında mikroyapısal incelemeler yapılmıştır. Bu incelemeler sonucu yapıda ayrışan intermetalik fazlar belirlenmiştir. $Al(Si)_3Ti$ olarak tahmin edilen bu fazlara EDX analizleri yapılmıştır. analizlerin sonunda literatürde olduğu ve tahmin edildiği gibi fazların bileşimi $Al(Si)_3Ti$ olarak belirlenmiştir. Mikroyapısal incelemeler sırasında elde edilen bir diğer bulgu ise oluşan intermetalik fazların morfolojisi hakkındadır. % 0,1 ve 1 titanyum içeren alaşımlarda oluşan intermetalikler yaprakçık (petal like) şeklindeyken % 2 ve üzerindeki titanyum içeriklerinde intermetalikler plakalar (flake like) halinde oluşmaktadır.

Oluşan intermetalik kristallerin dağılım, büyüklük ve mikroyapı içerisindeki % miktarlarını belirlemek için numunelere görüntü analizi uygulanmıştır. Bu işlem sonucunda ise titanyum miktarının artmasıyla yapı içerisindeki Ti miktarının artmasıyla oluşan intermetalik kristallerin sayısı ve boyutunun arttığı saptanmıştır.

Plakalar halinde ve yapıya homojen olmayan bir şekilde dağılmış olan bu fazların malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyeceği ortadır. Bu plakaların daha küçük boyuta indirilmesi ve homojen olarak yayınmasını sağlamak amacıyla malzemelere ısıl işlemler uygulanmıştır. Isıl işlem öncesi ve sonrasında yapıyı karşılaştırabilmek için numune üzeri işaretlenmiş ve ısıl işlemler öncesinde ve sonrasında işaretli bölgelerden görüntü alınmıştır. 500 °C' de 8 saat süren ısıl işlem sonrasında hızlı soğutulan numunede intermetalik plakaların kısmen kırıldığı belirlenmiştir. Ancak yapıda heterojen dağılımda

bir değişiklik olmamıştır. 500 °C' de 8 saat süren ısıl işlemin ardından yavaş soğutulan numunenin mikroyapısında ise herhangi bir değişikliğe rastlanmamıştır.

Plakaların ısıl işlemle yapıya homojen olarak dağıtılamamasının ardından bu işlemi bir dizi haddeleme ile yapma yoluna gidilmiştir. Ancak denenen soğuk haddeleme işlemi sırasında malzeme şekil değiştirmeden kırılmıştır. Bu deney sonrasında elde edilen malzemenin şekil değiştirme yeteneğinin kötü olduğu sonucuna varılmıştır.

Yukarıda sıralanan denemelerden sonra malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için bazı testler uygulanmıştır. Bu testlerden ilki sertlik ölçümleridir. Uygulanan mikro sertlik testleri sonucunda titanyum içermeyen alaşımdaki sertlik değeri 841,63 HV çıkarken % 10 titanyum içeren alaşımda ise sertlik değeri 1543,7 HV' ye yükselmiştir. Al-Si ötektik alaşımına % 10 titanyum ilavesiyle malzemenin sertliği yaklaşık 2 katına çıkmıştır.

Malzemenin sertliğinde elde edilen bu sertlik artışından bağlı olarak malzemenin aşınma dayanımında da gelişme olabileceği düşüncesiyle malzemeye aşınma testi uygulanmıştır. Pin-on-disk tipi cihazla uygulanan aşınma testlerinde % 1 titanyum içeren alaşımda en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Artan titanyum içeriğiyle birlikte malzemenin sertliği artmaktadır. Ancak aşınma dayanımı % 1 titanyuma kadar artarken daha yüksek titanyum içeriklerinde azalmaktadır.. Bunun sebebi ise intermetalik kristallerin morfolojisidir. Uzun lameller halinde bulunan $Al(Si)_3Ti$ intermetalikleri aşınma sırasında kolayca kırılarak oluşan aşınma ağırlık kaybının artmasına neden olmuştur. Aşınma yüzeyinde yapılan incelemeler sonucunda da kırılmış bir çok intermetalik kristale rastlanmıştır. Aşınma testlerinden elde edilen bir diğer bulgu ise sürtünme katsayıdır. Aşınmadaki ağırlık kaybı değerleriyle paralellik içeren bu sürtünme katsayıları sonuçlarında bazı alaşımlarda dökümden kaynaklanan boşluklar nedeniyle bazı hatalı sonuçlar ortaya çıkmıştır. Bu alaşımlar için testler iki kez tekrarlanmış ancak aynı sonuçlar elde edilmiştir.

Elde edilen tüm bu bilgiler ışığında henüz çok yeni bir alaşım olan Al-Si-Ti üçlü alaşımları içerisinde aşınma açısından en uygun malzeme % 1 titanyum içeren alaşım olarak gözükmektedir. Ancak yapı içerisinde oluşan plaka (lamel) tipi intermetaliklerin küresel hale getirilmesi ya da küçük partiküller halinde yapıya homojen olarak dağıtılması

mümkün olursa yüksek titanyum içeriklerinde de aşınma direncinin artacağı düşünülmektedir.

Henüz ticari olarak bir uygulaması kısıtlı olan bu alaşım ailesi için pek çok olası kullanım alanı mevcuttur. Örneğin Ti-$TiAl_3$ metal-intermetalik tabakalı kompozit malzemeler uçak sektöründe kullanılmaktadır.[21] Bunun dışında titanyum alaşımları hafiflik, yakıt tasarrufu ve yüksek performanslarından dolayı otomobil sektöründe giderek artan bir kullanıma sahiptir. Ancak titanyumun yüksek maliyeti nedeniyle bu kullanımlar yarış arabaları ve özel tasarımlı araçlarla sınırlı kalmaktadır.[22] Al-Si-Ti alaşımları üzerinde daha geniş çalışmalar yapılırsa titanyumun maliyet nedeniyle kullanılamadığı durumlara bir alternatif olabileceği düşünülmektedir.

Ülkemizde ve dünyada henüz üzerinde çok az sayıda çalışma bulunan bu alaşım ailesi üzerinde gerekli çalışmaların yapılması halinde birçok alanda yüksek performansla kullanılabileceği kanısındayız. Özellikle titanyumun yüksek mukavemet ve sertlik gibi özelliklerinin alüminyuma başarılı bir şekilde aktarılması sağlanırsa bu alaşımların birçok alüminyum alaşımı ve hatta titanyum alaşımının yerini alacağı düşüncesindeyiz.

KAYNAKLAR

[1] Zeren, M., Karakulak, E., "Al-Si Döküm Alaşımlarına Ti İlavesinin Etkisi",***Metal Dünyası ,*** Sayı 152, Sayfa 83-85(2006)

[2] Dwight, J., "Aluminium Design and Construction" ***University of Cambridge; and Fellow of Magdalene College, Cambridge*****,** 1-10,58-68(2002)

[3] http://tr.wikipedia.org**(Ziyaret Tarihi : 08.Ocak.2007)**

[4] Sage, S. A. J., "Aluminium Anda İts Alloys" ***Mechanical World Monographs***, 18-20 (1948)

[5] Asm Handbook Volume 2 Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials

[6] http://www.key-to-metals.com/Article55.htm **(Ziyaret Tarihi : 22.Ocak.2007)**

[7] Makhlouf, M.M., Guthy, H.V., "The Aluminum–Silicon Eutectic Reaction: Mechanisms and Crystallography", ***Journal of Light Metals***, Volume 1, 199-218, (2001)

[8] ASM International, "Introduction to Aluminum-Silicon Casting Alloys", **ASM, 06993G**

[9] McDonald S. D., Nogita K., Dahle A. K., "Eutectic Nucleation in Al–Si Alloys", ***Acta Metarialia,*** Volume 52**,** Sayfa 4273-4280, (2004)

[10] Li J.G., Zhang B.Q., Wang L., Yang W.Y.,Ma H.T., "Combined effect And Its Mechanism of Al–3wt.%Ti–4wt.%B and Al–10wt.%Sr Master Alloy on Microstructures of Al–Si–Cu Alloy", ***Material Science and Engineering,*** Volume 328, Sayfa 169-176(2002)

[11] Park W.-W., You B.-S., Kim N. J., "Effects Of Ti Addition On the Characteristics of Wear Resistant of Al-Si-Ti Base Alloys Processed via Rapid Solidification", ***Metals And Materials,*** Volume 5, Sayfa 593-596(1999)

[12] Asensio-Lozano J., Suarez-Pena, B., "Effect of the Addition of Refiners and/or Modifiers on the Microstructure of Die Cast Al–12Si Alloys", ***Scripta Materialia***, Volume 54,943-947,(2006)

[13] Chen, X.-G., Fortier, M., "Formation of Primary TiAlSi Intermetallic Compounds in Al-Si Foundry Alloys", ***Materials Forum*** Volume 28 ,(2004)

[14] Gröbner J., Mirkovic D., Schmid-Fetzer R., "Thermodynamic Aspects of Grain Refinement of Al–Si Alloys Using Ti and B", ***Materials Science and Engineering: A,*** Volume 395, Sayfa 10-21(2005)

[15] Jaradeh, M., Carlberg, T., "Effect of Titanium Additions on the Microstructure of DC-Cast Aluminium Alloys", ***Materials Science and Engineering: A***, Volumes 413-414, 277-282,(2005)

[16] Vinod Kumar, G.S., Murtyb, B.S., Chakraborty, M., "Development of Al–Ti–C Grain Refiners and Study of Their Grain, Refining Efficiency on Al and Al–7Si Alloy", ***Journal of Alloys and Compounds***, Volume 396, Pages 143-150, (2005)

[17] Zeren, M., Karakulak E., "Influence of Ti Addition on the Microstructure and Hardness Properties of Near-Eutectic Al–Si Alloys", ***Journal of Alloys and Compounds***, In Press, Corrected Proof

[18] Gupta, S. P., "Intermetallic Compounds in Diffusion Couples of Ti With an Al–Si Eutectic Alloy", ***Materials Characterization***, Volume 49,321-330,(2002)

[19] Asm Handbook Volume 3 Alloy Phase Diagrams

[20] Saheb,N., Laoui, T., Daud,A.R., Harun, M., Radiman,S., Yahaya,R., "Influence of Ti Addition on Wear Properties of Al–Si Eutectic Alloys", ***Wear,*** Volume 249, Pages 656-662,(2001)

[21] Xu L., Cui Y.Y.,Hao Y.L., Yang R., "Growth of ıntermetallic Layer in Multi-Laminated Ti/Al Diffusion Couples", ***Materials Science and Engineering: A*** Volume 435-436, Sayfa 638-647(2006)

[22] Fuji H., Takahashi K., Yamashita Y. "Application of Titanium and Its Alloys for Automobile Parts", ***Nippon Steel Tecnical Report No.88,*** (2003)

KİŞİSEL YAYINLAR

Aşağıda bu tez çalışması sırasında yapılan yayınlar sıralanmıştır.

[1] Zeren, M., Karakulak, E., "Al-Si Döküm Alaşımlarına Ti İlavesinin Etkisi",***Metal Dünyası ,*** Sayı 152, Sayfa 83-85(2006)

[2] Zeren, M., Karakulak, E., "Al-Si Döküm Alaşımlarında Ti- İntermetaliklerinin Oluşumu",***Metal Makina*** , Ocak-Şubat 2006, Sayfa 416-417(2006)

[3] Zeren, M., Karakulak E., "Influence of Ti Addition on the Microstructure and Hardness Properties of Near-Eutectic Al–Si Alloys", ***Journal of Alloys and Compounds***, In Press, Corrected Proof

[4] Karakulak E., "Al-Si Ötektik Alaşımına Ti İlavesinin Mikroyapı ve Sertliğe Etkisi", Ulusal Teknik Eğitim, Mühendislik ve Eğitim Bilimleri Genç Araştırmacılar Sempozyumu, 2007

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Offenbach/Almanya' da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli'nde tamamladı. 2000 yılında girdiği Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden 2004 yılında Metalurji ve Malzeme Mühendisi olarak mezun oldu. 2005 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.