

**TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN Nb-V
MİKROALAŞIM ÇELİĞİNE BAKIR İLAVESİNİN
MİKROYAPI MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**2017
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

Çağrı ODABAŞI

**TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN Nb-V MİKROALAŞIM ÇELİĞİNE
BAKIR İLAVESİNİN MİKROYAPI MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Çağrı ODABAŞI

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Haziran 2017

Çağrı ODABAŞI tarafından hazırlanan “TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN Nb-V MİKROALAŞIM ÇELİĞİNE BAKIR İLAVESİNİN MİKROYAPI MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN
Tez Danışmanı, İmalat Müh. A.B.D.



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 16/06/2017

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan: Yrd. Doç. Dr. Mustafa AYYILDIZ (DÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin DEMİRTAŞ (KBÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN (KBÜ)



...../...../2017

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nevin AYTEMİZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü





“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Çağrı ODABAŞI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN Nb-V MİKROALAŞIM ÇELİĞİNE BAKIR İLAVESİNİN MİKROYAPI MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Çağrı ODABAŞI

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Yrd. Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN

Haziran 2017, 87 sayfa

Mikroalaşımli çelikler ağırlıkça %0,2 oranına kadar niyobyum, vanadyum ve titanyum ihtiva eden çelikler olarak tanımlanmaktadır. Günümüzde üretimi yapılan mikroalaşımli çeliklerin büyük bir kısmı yassı ve boru mamul olarak üretilmekle birlikte son yıllarda dövme amaçlı mikroalaşımli çeliklerin üretimi de hızlanmıştır. Ayrıca günümüzde yeterli düzeyde olmasa da toz metalürjisi yöntemiyle de mikroalaşımli çelik üretimi yapılmaktadır.

Bu çalışmada toz metalürjisi yöntemiyle mikroalaşımli çelik üretmek için demir, karbon, niyobyum, vanadyum ve bakır elementlerinin tozları farklı oranlarda katılarak kullanılmıştır. Bu tozlar çekme numunesi geometrisi oluşturan kalıplarda 750 MPa presleme basıncında sıkıştırılmış ve ardından atmosfer kontrollü tüp fırında

argon ortamında sinterlenmiş, böylece mikroalaşımli çelik üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen mikroalaşım çeliklerinin tane boyutu ve fazların dağılımı optik mikroskop ile belirlenmiş; çöktellerin şekli, dağılımı ve türü SEM ve EDS yardımıyla analiz edilmiştir. Ayrıca kimyasal kompozisyonların doğruluğunu belirlemek için XRF testleri yapılmıştır.

Mikroyapı analizinden sonra çekme numunesi boyutlarında hazırlanan farklı kimyasal bileşimdeki mikroalaşımli çelik numunelere çekme testi, aşınma testi ve sertlik testi uygulanmıştır. Numunelerin % uzama, akma-çekme dayanımları, sertlik değerleri, mikroyapısal değişimlere bağlı olarak açıklanmıştır. Ayrıca kopan çekme numunelerinden elde edilen kırık yüzey görüntüleri SEM yardımıyla incelenerek kırılma türü tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Toz metalurjisi, Nb-V mikroalaşımli çelik, mikroyapı mekanik özellik ilişkisi, bakır ilavesi.

Bilim Kodu : 915.1.094

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF EFFECT ADDITION COPPER ON MICROSTRUCTURE MECHANICAL PROPERTIES OF NB-V MICROALLOYED STEEL BY PRODUCED POWDER METALLURGY

Çağrı ODABAŞI

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Manufacturing Engineering

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Mehmet Akif ERDEN

June 2017, 87 pages

Microalloyed steels are defined as steels containing up to 0.2% by weight of niobium, vanadium and titanium. Today, most of the productions of microalloyed steels are produced as flat and tubular products, but in recent years the production of microalloyed steels for forging has also been accelerated. In addition, although it is not sufficient at present, microalloyed steel is produced by powder metallurgy.

In this study, microalloyed steel powder mixture was obtained in desired compositions by adding niobium, vanadium and copper elements in iron matrix by powder metallurgy method at different ratios. The obtained mixtures were compacted in tensile sample geometry at 750 MPa pressing pressure and then sintered in argon atmosphere in an atmospheric controlled tube furnace so that microalloyed steel production was carried out. The grain size and phase distribution of the microalloyed

steels were determined by optical microscope; the shape, distribution and type of precipitates were analysed with the help of SEM and EDS. XRF tests were also conducted to determine the accuracy of chemical compositions.

After microstructure analysis tensile test, wear test and hardness test were applied to microalloyed steel specimens of different chemical composition prepared in tensile sample sizes. The % elongation, yield strength, hardness values of the samples are explained by the microstructural changes. In addition, fracture surface images obtained from fracture tensile specimens were examined with SEM to determine the type of fracture.

Key Word : Powder metallurgy, Cu, Nb-V micro alloyed steels, microstructure, mechanical properties.

Science Code : 915.1.094

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi-alaka ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar ve diğer çalışmalarda imkânlarından faydalandığım Teknoloji Fakültesi Dekanlığı, İmalat Mühendisliği Bölüm Başkanlığı, Bölüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmamız Karabük Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri KBÜ-BAP-17-YL-178 numarası altında gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle bu çalışmayı destekleyen Karabük Üniversitesi Rektörlüğü BAP Müdürlüğüne teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, çalışmalarım boyunca gösterdikleri anlayış ve hoşgörü ile maddi-manevi destek olan kıymetli AİLEME teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
MİKROALAŞIMLI ÇELİKLER.....	3
2.1. MİKROALAŞIMLI ÇELİKLERİN TANIMI.....	3
2.2. MİKROALAŞIMLI ÇELİKLERİN GELİŞİMİ	4
2.3. MİKROALAŞIM ELEMENTLERİ.....	9
2.3.1. Vanadyum (V)	9
2.3.2. Niyobyum (Nb).....	9
2.3.3. Titanyum (Ti).....	10
2.3.4. Alüminyum (Al)	11
2.3.5. Karbon (C).....	11
2.3.6. Azot (N).....	12
2.3.7. Bakır (Cu)	12
2.4. MİKROALAŞIM ÇÖKELTİLERİNİN ETKİLERİ	13
2.4.1. Karbür Ve Nitrür Çökmesi	13
2.4.2. Sıcaklık Ve Soğuma Hızının Çökelmeye Etkisi.....	14
2.4.3. Mikroalaşım Karbür Ve Nitrürlerin Çözünürlüğü	14

2.5. MİKROALAŞIMLI ÇELİKLERDE DAYANIM ARTTIRICI MEKANİZMALAR	15
2.5.1. Tane Boyutunu Küçültme	15
2.5.1.1. Tane Boyutunun Belirlenmesi	15
2.5.1.2. Ferrit Ve Perlit Oranlarının Belirlenmesi	17
2.5.2. Çökeltme Sertleşmesi	17
2.6. MİKROALAŞIMLI ÇELİKLERİN AVANTAJLARI	18
2.7. MİKROALAŞIMLI ÇELİKLERİN UYGULAMA ALANLARI	18
BÖLÜM 3	19
KOMPOZİT MALZEMELER.....	19
3.1. GİRİŞ.....	19
3.2. KOMPOZİT MALZEMELERİN TARİHSEL GELİŞİMİ	21
3.3. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI.....	22
3.4. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER	22
3.4.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Kullanılan Matris Malzemeleri.....	23
3.4.2. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Kullanılan Takviye Malzemeleri.....	24
3.5. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	25
3.6. KOMPOZİT MALZEMELERİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI	26
BÖLÜM 4	27
TOZ METALURJİSİ	27
4.1. TOZ ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	28
4.1.1. Kimyasal Tepkimelerle Toz Üretimi	29
4.1.1.1. Gaz Altında Katının Ayrışması (Doğrudan İndirgeme).....	29
4.1.1.2. Termal Ayrışma (Karbonil)	29
4.1.1.3. Sıvı Fazdan Çöktürme.....	30
4.1.1.4. Gazdan Çöktürme	30
4.1.2. Elektroliz Yöntemi.....	31
4.1.3. Atomizasyon Yöntemi	31

	<u>Sayfa</u>
4.1.3.1. Su Atomizasyonu	32
4.1.3.2. Gaz Atomizasyonu.....	33
4.1.4. Mekanik Öğütme	34
4.2. TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN MALZEMELERDE PARÇA KARAKTERİZASYONU	35
4.2.1. Toz Numunesi Alımı	35
4.2.2. Parçacık Boyut Ölçümü.....	35
4.3. TOZLARIN SIKIŞTIRILMASI VE PRESLENMESİ.....	36
4.3.1. Tek Yönlü Sıkıştırma.....	36
4.3.2. Çift Yönlü Sıkıştırma.....	37
4.3.3. İzostatik Sıkıştırma	37
4.4. TOZLARIN SİNTERLENMESİ.....	39
4.5. TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN MALZEMELERİN ANALİZİ.....	40
4.5.1. Mikroyapısal Özellikler	41
4.5.2. Mekaniksel Özellikler.....	41
4.5.2.1. Aşınma Direnci	41
4.5.3. Yüzeyle İlgili Özellikler	43
BÖLÜM 5	44
DENEYSEL METOD	44
5.1. GİRİŞ.....	44
5.2. DENEYSEL ÇALIŞMADA İZLENEN İŞLEM BASAMAKLARI	44
5.3. DENEYSEL ÇALIŞMA ORTAMININ HAZIRLANMASI.....	45
5.4. DENEYSEL ÇALIŞMA İÇİN GEREKLİ OLAN TOZLARIN TEMİNİ.....	46
5.5. TOZLARIN KARIŞTIRILMASI VE SIKIŞTIRILMASI	46
5.6. SİNTERLEME İŞLEMLERİ	49
5.7. NUMUNELERE SERTLİK ÖLÇÜMLERİ VE ÇEKME DENEYİNİN UYGULANMASI	50
5.8. AŞINMA TESTİ İNCELEMELERİ	50
5.9. OPTİK MİKROSKOP VE SEM İNCELEMERİ.....	51
5.9.1. Metalografik İncelemelerde Kullanılan Numunelerin Hazırlanması	51
5.9.2. Dağlayıcıların Hazırlanması Ve Dağlama İşleminin Yapılması	51

	<u>Sayfa</u>
5.10. YOĞUNLUK, GÖZENEKLİLİK, FERRİT-PERLİT ORANI ÖLÇÜMLERİ.....	52
5.11. XRF İNCELEMELERİ	53
BÖLÜM 6	54
DENEYSSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	54
6.1. GİRİŞ.....	54
6.2. TOZ KARAKTERİZASYONU	54
6.3. MİKROYAPI SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	57
6.4. MEKANİK TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	66
6.4.1. Nb-V-Cu Mikroalaşımli TM Çeliğinin Çekme Ve Sertlik Testi Sonuçları Ve Değerlendirilmesi	66
6.4.2. Aşınma Testi Sonuçları Ve Değerlendirilmesi	71
6.5. XRF İNCELEMELERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	80
6.6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	82
6.6.1. Genel Sonuçlar.....	82
6.6.2. Öneriler	83
KAYNAKLAR	84
ÖZGEÇMİŞ	88

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Bazı mikroalaşımlandırılmış çeliklerin tane büyüme davranışları.	6
Şekil 4.1. Bir ürünün TM ile üretimi.....	27
Şekil 4.2. Elektrolit olarak üretilmiş Ni/Co tozların morfolojisi.	31
Şekil 4.3. Mekanik yöntemlerle üretilen metal tozları.	34
Şekil 4.4. Tek yönlü sıkıştırma.	37
Şekil 4.5. Çift yönlü sıkıştırma.	37
Şekil 4.6. Soğuk izostatik presleme işlem adımları.	38
Şekil 4.7. Kalıcı gözenegın mekanik özelliklere etkisi.	40
Şekil 4.8. Gözenek yapısının değişimi.....	40
Şekil 4.9. Aşınma tiplerinin şematik gösterimi.....	42
Şekil 5.1. Deneysel çalışmada izlenen işlem basamakları.	45
Şekil 5.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan hassas terazi, hidrolik pres ve turbula cihazı görüntüleri.	48
Şekil 5.3. Soğuk preslenmiş çekme numunelerin görüntüsü.	48
Şekil 5.4. Deneysel çalışmalarda kullanılan atmosfer kontrollü fırın.....	49
Şekil 6.1. Demir tozunun X2000 büyütölmüş SEM görüntüsü.	55
Şekil 6.2. Karbon tozunun X2000 büyütölmüş SEM görüntüsü.....	55
Şekil 6.3. Niyobyum tozunun X2000 büyütölmüş SEM görüntüsü.....	55
Şekil 6.4. Vanadyum tozunun X2000 büyütölmüş SEM görüntüsü.	56
Şekil 6.5. Bakır tozunun X2000 büyütölmüş SEM görüntüsü.	56
Şekil 6.6. TM yöntemiyle üretilen alaşımsız ve mikroalaşımlı çeliklerin optik mikroskop görüntüleri.....	58
Şekil 6.7. TM yöntemiyle üretilen çeliklerin SEM mikroyapı görüntüleri.....	62
Şekil 6.8. Alaşım 1 nokta EDS incelemeleri.....	63
Şekil 6.9. Alaşım 2 nokta EDS incelemeleri.....	64
Şekil 6.10. Alaşım 5 nokta EDS incelemeleri.....	65
Şekil 6.11. Bileşenlerin gerilme-yüzde uzama grafiği.....	66
Şekil 6.12. TM yöntemiyle üretilen çeliklerin kırık yüzey görüntüleri.....	69
Şekil 6.13. Alaşım 2 kırık yüzey EDS analiz görüntüleri.	70

Sayfa

Şekil 6.14. Alaşım 6 kırık yüzey EDS analiz görüntüleri.....	71
Şekil 6.15. TM çelik numunelerin 15 N yük altındaki aşınma derinliği grafiği.	73
Şekil 6.16. TM çelik numunelerin 30 N yük altındaki aşınma derinliği grafiği.	73
Şekil 6.17. TM yöntemiyle üretilen çeliklerin 15 N yük uygulanmış aşınma yüzeyi görüntüleri	75
Şekil 6.18. TM yöntemiyle üretilen çeliklerin 30 N yük uygulanmış aşınma yüzeyi görüntüleri	76
Şekil 6.19. Alaşım 1 aşınma yüzeyi nokta EDS incelemeleri.....	77
Şekil 6.20. Alaşım 5 aşınma yüzeyi nokta EDS incelemeleri.....	78
Şekil 6.21. Alaşım 6 aşınma yüzeyi nokta EDS incelemeleri.....	79

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Mikroalaşım çeliklerinin tarihsel gelişimi	4
Çizelge 2.2. CP – Ti Malzemelerin Genel Özellikleri.	11
Çizelge 5.1. Tozlar ve özellikleri	46
Çizelge 5.2. Mikroalaşımli TM çeliklerin kimyasal kompozisyonları.	47
Çizelge 6.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan tozların boyut ve % saflık değerleri.	56
Çizelge 6.2. 1400 °C’de sinterlenen TM çelik numunelerin %yoğunluk, %gözeneklilik, %perlit ve ortalama tane boyutu değerleri.	59
Çizelge 6.3. 1400 °C’de sinterlenmiş TM çelik numunelerin akma dayanımı(YS), çekme dayanımı(UTS), % uzama ve sertlik değerleri.	66
Çizelge 6.4. 1400 °C’de sinterlenen TM çeliklerinin aşınma deneyi sonuçları.....	72
Çizelge 6.5. 1400 °C’de sinterlenen TM çelik numunelerin XRF analiz sonuçları... ..	80

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- dak : Dakika
- f : Ferrit yada perlit fazının hacimsel oranı
- n : Ferrit yada perlit fazına karşılık gelen nokta sayısı
- N : Sayılan toplam nokta sayısı
- $i\alpha$: Ferrit tane büyüklüğü
- L : Ölçüm çizgisinin toplam uzunluğu
- fp : % perlit miktarı
- $n\alpha$: Ölçüm çizgisi tarafından kesilen ferrit tanelerinin toplam sayısı
- n_i : Ölçülen tane sınırı sayısı
- mm : Milimetre
- μm : Mikrometre
- MPa : Megapaskal
- s : Saniye
- T : Sıcaklık
- σ_y : Akma gerilmesi
- k : Malzeme sabiti (Hall-Petch sabiti)
- d : Ferrit tane boyutu
- D : Östenit tane çapı
- A : Malzeme sabiti
- P : Çökelti çapı
- f_v : Çökelti partiküllerinin hacimsel oranı

KISALTMALAR

HSLA : High Strenght-Low Alloyed (Yüksek Dayanımlı-Düşük Alaşımli)

SEM : Scanning Electron Microscobe (Tarama Elektron Mikroskobu)

EDS : Enerji Dağılımı Spektrometresi

VN : Vanadyumnitrür

TiN : Titanyumnitrür

VC : Vanadyumkarbür

TiC : Titanyumkarbür

NbC : Niyobyumkarbür

NbN : Niyobyumnitrür

AlN : Alüminyumnitrür

VCN : Vanadyumkarbonitrür

NbCN : Niobyumkorbonitrür

YDDA : Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımli Çelik

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Mikroalaşımli çelikler, Ti, V, Nb ve Al gibi çökelti oluşturan elementlerden ağırlık olarak %0,2 miktarını geçmeyecek şekilde eklenerek mekanik özellikleri geliştirilmiş çeliklerdir. Ti, Al, Nb ve V gibi mikroalaşım elementlerinin oluşturmuş olduğu karbonitrürlerin boyutu, dağılımı, şekli, çözünme sıcaklıkları ve soğuma hızına bağlı olarak oluşma şartları mekanik özellikleri belirleme açısından fazlaca önem arz etmektedir.

Döküm yönteminde bu özellikleri kontrol etmek toz metalürjisi yöntemine göre daha zordur. Bu nedenle bu çalışmada niyobyum, vanadyum ve farklı oranlarda bakır ile alaşımlandırılmış mikroalaşım çeliğinin toz metalürjisi yöntemiyle üretiminin mekanik özellikleri nasıl etkilediğinin araştırılması amaçlanmıştır. Üretilen çeliklerde; VC, VCN, NbC, NbCN ve NbN gibi çökelti kombinasyonlu şekillerde oluşturularak bakır ilavesinin mekanik özelliklere etkisi belirlenmiştir. Bu sayede mekanik özellikleri çok daha yüksek hassas ürünlerin üretilmesi söz konusu olacaktır. Bu çalışmanın ana amacı vasıflı toz metal çelik üretiminin arttırılmasına katkı sağlayarak ülkemizi vasıflı çelik üretiminde söz sahibi konuma getirmektir.

Bilindiği gibi bu çeliklerin üretimi toz metalürjisi ile yapıldığında üretim maliyetleri, önemli miktarda azalacaktır. Üretimi yapılan parçanın yüzey kalitesinin iyi olması, daha hassas ve daha kaliteli bir üretimin gerçekleştirilmesi, diğer yöntemlerle üretilmesi ve işlenmesi zor bazı metallerin üretimi sağlanacaktır. Toz metalürjisi yöntemi sayesinde Türkiye’de sanayi kuruluşlarında istenilen özelliklerde mikroalaşımli çelik parçaların üretimi kolaylaşmış olacaktır ve yaygın bir biçimde kullanılmaya başlanacaktır. Bu üretim yöntemi ülkemizdeki hadde ürünü olan mikroalaşım çeliğinin toz metalürjisi ile üretiminin yapılmasına katkı sağlayacaktır.

Bu alışmada Nb-V-Cu mikroalaşım çeliği değişik kompozisyonlarda üretilmiştir. Üretilen parçalara çekme, sertlik ve aşınma deneyi gibi deneyler uygulanmıştır. Mekanik zellikleri belirlenen numunelerin mikroyapı incelemeleri (SEM mikroyapı, SEM kırık yüzey, SEM EDS, XRF, Spektral analiz) yapılarak mikroyapı ve mekanik özellikleri ilişkilendirilerek toz metalurjisi ile üretilen Nb-V mikroalaşım çelikleri için ideal sinterleme sıcaklığı tayin edilmiştir.



BÖLÜM 2

MİKROALAŞIMLI ÇELİKLER

2.1. MİKROALAŞIMLI ÇELİKLERİN TANIMI

Son kırk yılın üretilen miktar açısından en önemli gelişimini gösteren mikroalaşımli çelikler, öncelikle genel yapı çeliklerinin dayanım kapasitelerinin yetersizliği nedeniyle geliştirilmiştir. Mikroalaşımli çeliklerin, yüksek akma dayanımından dolayı ağırlıkları büyük miktarlarda azaltılmıştır. Mikroalaşımlama terimi, maksimum %0,2 oranında Nb, V ve Ti ilavesi anlamına gelir. Bu elementlerin ilave edilmesiyle, kısmen tane boyutu inceltme sertleşmesi ve karbürler, nitrürler veya karbonitrürler gibi partiküllerin oluşması sonucu çökeltme sertleşmesi meydana gelir. Genelde mikroalaşımlama, çok düşük karbon içeren çeliklerden ötektoid kompozisyonlu çeliklere kadar yapılır. Mikroalaşımli çelikler aynı anda değişik sertleştirme mekanizmalarının ve uygun termomekanik işlemlerin uygulanması ile yüksek dayanım, yüksek tokluk, düşük sıcaklıkta gevrek kırılma emniyeti, mükemmel kaynaklanabilirlik ve korozyona dayanım gibi değişik, çok iyi özelliklere sahip bir malzeme grubudur. Yassı ve dövme mamuller şeklinde üretilirler. Uygulama yoğun olarak yassı mamullerde (gaz ve petrol boru hatları, off-shore konstrüksiyonlar) gerçekleşir. Son yıllarda otomotiv endüstrisine yönelik dövme mamullerin üretiminde de bir gelişme vardır. Bugün, bu çelikler, kontrollü haddelenmiş plakalar, levhalar, profiller, dövme ürünleri olan çubuk ve barlarda kullanılmaktadır. Modern yapı çelikleri diye de anılan çelikler genellikle yalın karbonlu çeliklere oranla daha yüksek dayanımlı çeliklerdir. Bunlar göreceli yüksek dayanımlarından ötürü “Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımli” ya da YDDA çelikleri olarak bilinirler (Ertuğrul, 2009).

2.2. MİKROALAŞIMLI ÇELİKLERİN GELİŞİMİ

Mikroalaşımli çeliklerin geliştirilmesine 1900'li yıllarda alaşımlamayla başlanmış, 1930 yıllarında yüksek dayanımlı yapı çelikleri geliştirilmiştir. 1940'li yıllarda ferrit tane incelmesinin bu çeliklere kazandırdıkları tespit edilmiş, 1950'li yıllarda ince taneli çelikler ortaya çıkarılarak, Avrupa ülkelerinde kontrollü haddelemenin, normalleştirilmenin yerini alması ile yüksek dayanımlı düşük alaşımli çelikler ortaya çıkmıştır. 1960'li yıllarda petrol ve doğal gaz taşımacılığında kullanılan mikroalaşımli çeliklerin Nb ve V ilavesi ile üretilmesi ve aynı yıllarda termomekanik işlemlerin geliştirilmesiyle mekanik, korozyon, aşınma özellikleri yüksek çelikler üretilmiştir. İlk Nb ile YDDA çeliği ABD gerçekleştirmiştir (Çeviker, 1991; Koltuk, 1996).

Mikroalaşımlama işlemi daha önceki yıllarda da yapılmasına rağmen ancak 1970'li yıllarda daha yaygın olarak birçok çelik ürünlerinde kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Özellikle 1970 ile 1980 yılları arasında çok büyük gelişmeler yaşanmıştır. Bu yıllarda Japonya, Batı Almanya, İtalya ve Fransa gibi gelişmiş ülkelerde mikroalaşımli çeliklerden maksimum güç elde etmek için gerekli tam kontrollü haddeleme uygulaması yapılmıştır. Bu yıllarda düşük karbonlu mikroalaşımli çelikler karbür ve nitrür oluşturmaları nedeni ile kaynak kabiliyeti iyi, dayanımı ve tokluğu yüksek çelikler haline gelmiştir (Gladman, 1997; Çeviker, 1991; Gladman, 1997).

Çizelge 2.1. Mikroalaşım çeliklerinin tarihsel gelişimi (Morrison, 2000)

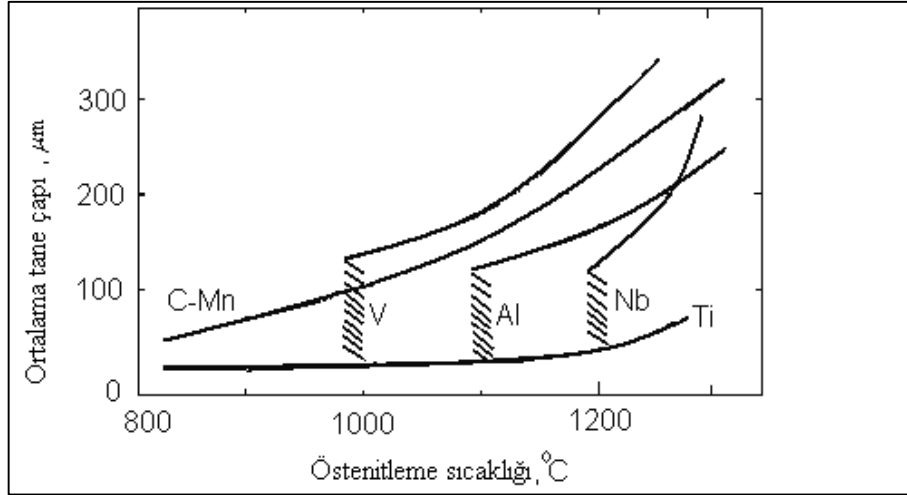
Element	Miktarı (% ağı.)	Ülke	Tarih	Akma Dayanımı (N/mm ²)
Vanadyum	0,01-0,02	USA	1916	275-345
Vanadyum	0,1	Almanya	1945	>390
Niyobyum	0,02-0,03	USA	1959'dan önce (1940 patent)	325-425
Niyobyum	0,005-0,05	İngiltere	1959	350-425
Titanyum	0,1-0,2	Almanya	1921	260-550

Mikroalaşımli çeliklerin mekanik özelliklerine katkıda bulunan en önemli unsurlardan bir tanesi de tane boyutudur. Tane boyutunun küçültülmesi ile mukavemet ve tokluk özelliklerinde iyileşme meydana gelir. Tane boyutu küçültme Ti, Al, Nb ve V

elementlerinin ilavesi ve uygun termomekanik işlemin beraber uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Bu mikroalaşım elementlerinin östenitteki çözünürlüğü ile ilgilidir. Çözünürlük ise östenitleştirme sıcaklığının ve süresinin fonksiyonu olarak hesaplanır.

Mikroalaşımli çeliklerin özelliklerine etki eden ikinci işlem kademesi östenitin deformasyonudur. Östenit deformasyonu birkaç basamakta gerçekleştirilir. Yüksek sıcaklıkta uygulanan deformasyon ve yeniden kristalleşme sonucu taneler ufalır. Daha sonraki aşamada sıcaklığın düşmesiyle yeniden kristalleşme durur, taneler uzar ve son haddeleme ile ferrit ve östenit beraber deforme edilir (Çeviker, 1991; Das vd., 2003; Gündüz ve Çapar, 2006; Erden ve ark., 2014).

Mikroalaşımli çeliklerin üretim potansiyeli günümüzde gelişmiş ülkelerdeki çelik üretim miktarının %10'nu aşmış bulunmaktadır. Uygulama yoğun olarak yassı mamullerde (gaz ve petrol boru hatları, off-shore konstrüksiyonlar vb.) gerçekleşir. Son yıllarda dövme mamullerinde de özellikle otomotiv endüstrisine yönelik parçalarda uygulama giderek artmıştır. Mikroalaşımli çelikler birkaç yöntemle üretimleri yapılmakla birlikte bunların en önemlileri östenitleştirme, çözündürme tavlama ve haddelemedir. Bir östenitleştirme işlemi olan hadde öncesi tavlama işleminde, katılaşma esnasında oluşan vanadyum, titanyum ve niyobyum karbürlerden maksimum faydalanmak için tüm mikroalaşım elementlerini östenit tane büyümesine fırsat vermeden çözündürmek gerekir. Bu aşamada sıcaklık mikroalaşım elementlerinin çözünmesine izin verecek kadar yüksek, fakat tane büyümesine neden olmayacak kadar düşük olmalıdır. Çeliğin ısıtılma aşamasında çökelmiş karbo-nitrür parçacıklarının ince dağılımları östenit tane sınırlarının kilitlemesine neden olup, tane büyümesini engellemektedir. Ancak yeterince yüksek sıcaklıklarda tutma sürelerinde, parçacıklar çözünür ve kabalaşarak tane sınırı kilit etkisi zayıflar ve tane kabalaşması meydana gelir. Şekil 2.1'de Bazı mikroalaşımlandırılmış çeliklerin tane büyümesine etkisi görülmektedir (Repas, 1988; Çeviker, 1991).



Şekil 2.1. Bazı mikroalaşımlandırılmış çeliklerin tane büyüme davranışları (Repas, 1988; Topateş, 1995).

Haddeleme işlemi de sürekli haddelemeden farklılıklar gösterir. Kontrollü haddeleme işlemi genellikle iki ve/veya üç ayrı basamak içermektedir; yüksek sıcaklıkta haddeleme (1100-1200 °C) veya “roughing” ve düşük sıcaklıkta haddeleme serisi (700-800 °C) “finishing”. Eğer yüksek sıcaklıkta haddeleme sürekli ise işlem sıcak haddeleme, süreksiz ise kontrollü haddeleme olarak isimlendirilir. Haddeleme sonrasında uygulanan soğutma ile ferrit tane boyutu küçültülür ve dayanım artar. Kontrollü haddeleme işlemi, gerekli sıcaklıkta ısıtma ile başlar; haddeleme sırasında sıcaklık ve deformasyon kontrol edilir ve haddeleme sonrası belli hızla soğuma ile son bulur. (Repas, 1988, Gladman, 1997; Çeviker, 1991; Gladman, 1997). Haddeleme ve dövme üretim aşamaları dikkate alınarak mikroalaşımlı çelikleri yassı ve dövme ürünler olmak üzere iki ana grupta toplamak mümkündür.

Yukarıda tartışıldığı gibi mikroalaşımlı çeliklerin üretimi birkaç yöntemle yapılmakla birlikte diğer üretim yöntemlerinden biri olan toz metalürjisi yöntemiyle üretimine başlanmıştır. Literatürde toz metalürjisi yöntemiyle Fe matrisli kompozit parça üretimleri bulunmaktadır. Mikroalaşımlı çelik üretimiyle kompozit üretimini farklı kılan en önemli faktör çelik içerisine katılan alaşım elementlerinin ağırlık olarak oranıdır. Bu oran mikroalaşımlı çeliklerde Mn hariç maksimum %0,1-0,2 iken kompozit malzemelerde çok daha yüksek oranlardadır (%1, 5, 10 ve 50 gibi). Yüksek hacimsel oranda karbo-nitrür partiküller içeren Fe matrisli kompozit malzemeler özellikle çeliklerin mekanik özelliklerini iyileştirmede çok yaygın olarak

üretilmektedir. Örneğin Fe matrisli kompozit malzemelere katılan TiC ve VC partikülleri birçok Fe matrisli kompozit malzemenin sertliğini ve aşınma dayanımı arttırmak için kullanılmaktadır. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen kompozit malzemelerin yüzey kalitesi çok iyi ve boyutları tamdır ve yüksek oranda ikinci faz partikülleri katılabilir (Schade, 2012; Erden, 2014). Literatürde kompozit malzemelerle ilgili farklı çalışmaların olduğu görülmektedir. Örneğin W. Jing ve arkadaşları (Ti, V)C ile güçlendirilmiş Fe matrisli kompozitler üretmişlerdir. Bu çalışmada (Ti,V)C partiküllerin Fe matrisin içerisinde homojen dağıldığı ve küçük taneli olduğu görülmüştür. Ayrıca V/Ti atomik oranının artmasıyla (Ti, V)C'ün kafes parametresinin düştüğü ve morfolojisinin ise düzensiz şekilden küresel şekle dönüştüğünü tespit etmişlerdir (Wang vd., 2007).

Mikroalaşımli çeliklerin üretimi döküm, haddeleme ve kontrollü soğutma yöntemleriyle yapılmaktadır. Ancak son yıllarda toz metalurjisi yöntemiyle de mikroalaşımli çelik üretimi gerçekleştirilmektedir (Lindsley, 2012; Schade, 2012; Erden, 2014).

Wang vd. (2007b), başka bir çalışmalarında Fe-(Ti, V)C kompozitlerinde oluşan karbo-nitrürleri incelemişlerdir. Bu çalışmada, çeşitli atomik miktarlarda V/Ti katkılı Fe-(Ti, V)C kompozitler toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiştir. Mikroyapı üzerinde ilk karışıma çeşitli atomik oranlarda V/Ti ilavesinin etkisi ve son üretimin karbür morfolojisine etkisi araştırılmıştır. Deney sonuçları, (Ti, V)C partiküllerin Fe matris içerisinde homojen dağıldığını ve ince taneli yapı sergilediğini göstermiştir. Ayrıca, TiC içerisinde V'un çözünümü XRD, SEM-EDS teknikleriyle ortaya konmuştur. Buna ilaveten V/Ti atomik oranı artmasıyla sert partiküllerinin büyüdüğü ve küreselleştiği gözlenmiştir.

Literatürde toz metalurjisi (TM) yöntemi kullanarak mikroalaşımli çelik üretimi ile ilgili yapılan az sayıda araştırma görülmüştür. Örneğin; Erden vd. (2014), çalışmalarında TM yöntemiyle Ti mikroalaşımli çelik üretmişlerdir. Sinterleme işlemini 1150 °C'de 60 dakika bekleterek gerçekleştirmiş olup Ti oranı (%0,1-%0,2) yükseldikçe akma ve çekme dayanımında bir artış olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durumu sinterleme sırasında ve sinterleme sonrası soğuma sırasında TiC(N) gibi

çökeltilerin oluşmasına bağlamışlardır. Yazarlar, TiC(N) gibi çökeltilerin sinterleme sırasında tane büyümesini engelleyerek küçük östenit tanelerinin oluşmasına neden olduğunu ve bunun sonucunda malzemelerin dayanımını arttırdığını yapmış oldukları çalışmada göstermişlerdir.

Erden vd. (2016), çalışmalarında TM yöntemiyle V mikroalaşımli çelik üretmişlerdir. Sinterleme işlemini 1150 °C'de 60 dakika bekleterek gerçekleştirmiş olup Ti oranı (%0,1-%0,2) yükseldikçe akma ve çekme dayanımında bir artış olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durumu sinterleme sırasında ve sinterleme sonrası soğuma sırasında VC(N) gibi çökeltilerin oluşmasına bağlamışlardır. Yazarlar, VC(N) gibi çökeltilerin sinterleme sırasında tane büyümesini engelleyerek küçük östenit tanelerinin oluşmasına neden olduğunu ve bunun sonucunda malzemelerin dayanımını arttırdığını yapmış oldukları çalışmada göstermişlerdir.

Yukarıda yapılan açıklamalardan anlaşılacağı gibi TM yöntemiyle Fe matrisli kompozitler yaygın olarak üretilirken mikroalaşımli çelik üretiminin sınırlı olduğu görülmüştür. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen mikroalaşımli çeliklerde karbo-nitrürlerin homojen dağılımını sağlamak, boyutlarını ve şekillerini kontrol etmek, çözünme ve oluşma sıcaklıklarını tam olarak belirlemek mümkündür. Sinterleme sıcaklığının iyi belirlenmesi, gerekli olan karbo-nitrürlerin çelik içerisinde kolay oluşmasını sağlayacaktır. Bulunan sonuçlar döküm, haddeleme ve kontrollü soğutma yöntemlerinin işlem basamaklarının belirlenmesine de katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemiyle Fe matris içerisine farklı oranlarda niyobyum, vanadyum ve bakır elementlerinin ayrı ayrı ve çoklu katılmasıyla istenilen bileşimde mikroalaşımli çelik toz karışım olarak elde edilmiştir. Elde edilen tozlar çekme numunesi şeklinde tasarlanan kalıplarda 750 MPa presleme basıncında sıkıştırılmış ve ardından atmosfer kontrollü tüp fırında sinterlenerek mikroalaşımli çelik üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen mikroalaşım çeliklerinin tane boyutu ve fazların dağılımı optik mikroskop ile belirlenirken çökeltilerin şekli, dağılımı ve türü SEM ve EDS yardımıyla analiz edilmiştir.

Mikroyapı analizinden sonra çekme, sertlik ve aşınma numunesi boyutlarında hazırlanan farklı kimyasal bileşimdeki mikroalaşımli çelik numunelere çekme testi, aşınma testi ve sertlik testi uygulanmıştır. Numunelerin % uzama, akma-çekme dayanımları, sertlik değerleri, mikroyapısal değişimlere bağlı olarak açıklanmıştır. Ayrıca kopan çekme numunelerinden elde edilen kırık yüzey görüntüleri SEM yardımıyla incelenerek kırılma türü tespit edilmiştir.

2.3. MİKROALAŞIM ELEMENTLERİ

2.3.1. Vanadyum (V)

Vanadyum, VC, VN ve VCN çökeltilerini oluşturur. Bu karbür, nitür ve karbonitrür östenit içinde Fe_3C 'den daha zor çözünebilir. Bu nedenle, sertleştirme sıcaklığı 1250 °C'dir. Böylece, henüz çözünememiş çökeltiler, östenitin sertleşebilmesi için gerekli karbonu çeker. Bu çelikler, yaklaşık 600 °C sıcaklığa kadar yapılan tavlamalara karşı dayanıklıdır. Menevişleme tavlama sırasında sertliğin fazlaca düşmesine Fe_3C 'nin ayrışması neden olur. Çok küçük miktarlardaki vanadyum bile, zor çözünebilir karbürler oluşturduğundan çeliğin aşırı ısıtılmaya karşı hassasiyetini azaltır.

2.3.2. Niyobyum (Nb)

Vanadyum gibi niyobyumda çökeltme sertleşmesi yoluyla akma mukavemetini artırır. Artışın büyüklüğü çökeltme niyobyum karbürlerinin miktarına ve boyutuna bağlıdır. Niyobyum, vanadyuma göre daha etkili bir tane küçültücü element olup mukavemet artırıcı etki yapmaktadır. Uygulamadaki niyobyum ilavesi normal vanadyum ilavesi miktarının üçte biri olan %0,02 ile %0,04 arasındadır. %0,01 oranında niyobyum ilavesi 35-40 MPa mukavemet artışı sağlar.

Çeliklerde sağlanan bu olumlu özellik çentik darbe direncinde düşüşe neden olur, bunu gidermek için özel bir haddeleme geliştirilmiştir, ayrıca karbon miktarı azaltılarak üst beynit oluşumundan kaçınılır. Genelde, yüksek sıcaklık da yapılan haddeleme işleminden kaçınılımalıdır. Bu işlem farklı büyüklükte taneler veya Widmanstätten

ferrit oluşumuna ve böylece de tokluğun düşmesine neden olur. Niyobyum içeren çelikler kontrollü haddeleme, kontrollü yeniden kristalleşme haddelemesi, hızlı soğutma ve doğrudan su vermeyle üretilir. Niyobyumlu çeliğe uygulanan kontrollü yeniden kristalleşme haddelemesi titanyum olmadan da etkili olabilir. Buna karşın vanadyumlu mikroalaşımli çeliklerde tane boyutunu küçültmek için titanyuma ihtiyaç duyulur. Niyobyum içeren çelikte ayrıca, titanyum olması durumunda niyobyum miktarı azaltılır, en önemlisi de niyobyum-titanyum içeren çeliklere daha yüksek sıcaklıklarda kontrollü yeniden kristalleşme haddelemesi yapılması mümkündür.

2.3.3. Titanyum (Ti)

Titanyum oda sıcaklığında sıkı paket hegzagonal (SPH), yüksek sıcaklıklarda ise hacim merkezli kübik (HMK) yapı gösteren allotropik bir malzemedir. Yaklaşık 885 °C civarında sıkı paket hegzagonal yapıdaki α fazı, hacim merkezli kübik yapıdaki β fazına dönüşür. Saf titanyum için bu sıcaklık “ β dönüşüm sıcaklığı” olarak adlandırılır. α fazını kararlı hale getiren azot ve oksijen gibi ara yer elementlerinin etkisi ile bu dönüşüm sıcaklığı yükselirken, yer alan alaşım elementlerinin etkisi ile sıcaklık azalmakta veya artmaktadır (Matthew, J., and Donachie, Jr., 1988; Barksdale, J., 1968).

Alüminyum, karbon, oksijen ve azot gibi alaşım elementleri α fazını daha kararlı hale getirerek dönüşüm sıcaklığını yükseltirler. β fazını kararlı hale getirip dönüşüm sıcaklığını düşüren elementleri ise izomorf grup ve titanyum ile ötektoid alaşımlar yapan elementler olarak iki ayrı grupta inceleyebiliriz. İzomorf grup β fazı içerisinde tamamen çözünebilen molibden, vanadyum, niyobyum (kolombiyum) elementlerinden oluşmaktadır.

Hem β fazını kararlı hale getirmek hem de yüksek sıcaklıklarda görülen metaller arası bileşiklerin oluşumunu azaltmak (veya önlemek) için bu izomorf grup elementleri alaşım içerisine katılmalıdır. Titanyum ile ötektoid alaşımlar yapan elementler ise mangan, demir, krom, kobalt, nikel, bakır ve silisyumdur. Ötektoid sıcaklığı saf titanyumun dönüşüm sıcaklığınının 330 °C kadar altındadır. İzomorf grup elementleri α ve β fazları içerisinde yaklaşık olarak eşit oranda dağılmaktadırlar. Bu nedenle hemen

hemen tüm ticari titanyum alaşımları bu elementlerden birini veya bir kaçını içermektedir (Matthew, J., and Donachie Jr., 1988).

Ticari saflıktaki titanyum (CP – Ti) %98,5-%99,5 oranında titanyum içermektedir. Ticari saflıktaki titanyum katkı elementi içeriğine göre Grade 1 – Grade 7 arasında 5 gruba ayrılmıştır. Farklı kaliteleredeki CP – Ti malzemelerin özellikleri Çizelge 2.2’ de verilmiştir.

Çizelge 2.2. CP – Ti Malzemelerin Genel Özellikleri (Matthew J., and Donachie, Jr., 1988).

	Akma Muk. (MPa)	Çekme Muk. (MPa)	Dönüşüm Sıcaklıkları (°C)		Katkı Elementleri (%Ağ.)					
			α	β	N	C	H	Fe	O	Pd
Grade 1	170	240	888	880	0,03	0,1	0,015	0,2	0,18	0
Grade 2	280	340	913	890	0,03	0,1	0,015	0,3	0,25	0
Grade 3	380	450	920	900	0,05	0,1	0,015	0,3	0,35	0
Grade 4	480	550	950	905	0,05	0,1	0,015	0,5	0,4	0
Grade 7	280	340	913	890	0,05	0,1	0,015	0,3	0,25	0,2

CP – Ti genellikle yüksek mukavemet gerektirmeyen ancak korozyon direncinin ön planda olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. İçindeki oksijen ve demir en önemli katkı elementleridir. Bu elementlerin miktarı arttıkça ticari saflıktaki titanyumun çekme ve akma mukavemeti de artar.

2.3.4. Alüminyum (Al)

Saf alüminyumun çekme dayanımı düşük olmakla birlikte, bakır, çinko, magnezyum, manganez ve silisyum gibi pek çok elementle alaşımlandırılarak mekanik özellikleri geliştirilebilir. Yüksek dayanım/ağırlık oranlarından dolayı alüminyum alaşımları, uçak ve uzay araçlarının vazgeçilmez bileşenleridir. Alüminyum nitür olarak çökelir.

2.3.5. Karbon (C)

Çeliklerin temel alaşım elementi olan karbon, çeliklerin üretim işlemleri sırasında yapıdaki yerini alır. Karbon miktarı, çeliklerin mekanik özelliklerini en çok etkileyen faktördür. Karbon, çeliğin akma ve çekme mukavemetini artırır, yüzde uzamayı, şekillenebilirliği ve kaynak kabiliyetini azaltır. İşlenebilirliğin ön planda olduğu çeliklerde karbon miktarı düşük tutulmalı, dayanım değerlerinin yüksek olması gerektiği durumlarda ise çeliğin karbon değeri yüksek olmalıdır.

Düşük karbonlu yumuşak çeliklerin şekillendirilmesi sırasında meydana gelebilecek en önemli problem mavi gevrekliktir. Bu olay karbon (ve/veya azot) atomlarının küçük çaplı olması nedeniyle kolay yayınmalarından kaynaklanır ve işleme sırasında kırılabilirlik yaratır.

Yumuşak çelikler 270-350 °C arasında şekillendirilirse küçük çaplı atomlar hızlı bir şekilde yayılır. Yayınan atomlar dislokasyonları kilitleyerek malzemenin akma dayanım sınırı noktasını yükseltir. Dolayısıyla malzeme daha gevrek davranır. Sözü edilen sıcaklıklar arasında çeliğin aldığı renk mavi olduğu için bu olaya mavi gevreklik denir.

2.3.6. Azot (N)

Azot oranı arttıkça kopma mukavemeti ile elastikiyet modülü artmakta, kopma uzaması, kopma büzülmesi ve kırılmaya karşı mukavemet azalmaktadır. Azot Fe_4N , $Fe_{16}N_2$ gibi nitür bileşiklerini yaparak çökeltilerin oluşumuna neden olmaktadır. Yaşlanma sertleşmesi meydana geldiği için de sünekliği kötü yönde etkilemektedir. Ayrıca darbe geçiş sıcaklığını da arttırmaktadır.

2.3.7. Bakır (Cu)

Bakır tozu, demir tozuna temelde sinterlenmiş peletin mukavemetini arttırmak için ilave edilir. Demir-bakır peletlerin sinterlenmesi sırasında bakır yüzdesine bağlı olarak boyutsal değişimler meydana gelmektedir. Saf demir parçalar genellikle sinterleme esnasında büzülürler. Artan miktarlarda bakır tozu ilave edilerek ve bakırın ergime sıcaklığının (1083 °C) üzerinde sinterleme yapılarak bu büzülme tersine çevrilir ve

sonuç olarak genişlemeye dönüştürülür. Genleşme %8–10 bakır ilavesine kadar, artan bakır miktarına paralel olarak artar. Bu, bakırın demir içinde çözünebilme sınırına bağlı olup bu değerden sonra azalmaktadır. Az miktarda bakır ilavesi ise (%1–2) saf demir peletlerin sinterleme esnasındaki büzölmelerini telafi etmek için kullanılabilir (Höganas, 1996).

Demir tozlarına hem bakır hem de karbonun birlikte ilave edilmesiyle, bunların tek başına ilave edilmesinden çok daha iyi mukavemet ve yüksek sertlik değerleri elde edilir. Demir-bakır karışımlarına grafit ilave edilmesi sinterleme sırasında bakırdan kaynaklanan genişmeleri azaltır. Demir-karbon karışımlarına bakır ilavesi atmosfer kalitesine bağımlılığı azaltma eğilimi de oluşturur. Diğer bir deyişle bakır ilavesi, dekarbürleyici atmosferlerde dekarbürizasyonu önlemeye yardımcı olur (Ataş, 2003).

2.4. MİKROALAŞIM ÇÖKELTİLERİNİN ETKİLERİ

2.4.1. Karbür Ve Nitrür Çökmesi

Mikroalaşım çeliklerinde özellikler çoğunlukla çökelti tarafından belirlenir. Çökelti dislokasyon hareketini engeller. Böylece sertlik ve dayanımın artmasına yol açar. Ti, V, Nb gibi mikroalaşım elementleri, karbür, nitrür ve karbonitrürler oluşumu üzerinden ek bir çökelti sertleşmesi meydana getirirler.

Mikroalaşım elementlerine ve termomekanik işleme bağı olarak östenitte çözünmüş mikroalaşım elementlerinin sadece bir kısmı çökelti. Çözeltide kalanlar, dönüşümden sonra veya dönüşüm sırasında çökeltirler. Çözeltideki mikroalaşım mikroyapının ve özelliklerin belirlenmesinde etkin rol oynarlar.

2.4.2. Sıcaklık Ve Soğuma Hızının Çökelmeye Etkisi

Soğuma hızı yükseldikçe, çökeltilerin oluştuğu sıcaklık o kadar düşük olur. Soğuma hızı çökeltilerin östenitte mi yoksa ferrit içerisinde mi çökeceğini belirler (Koltuk,1996; Karabulut,2004).

2.4.3. Mikroalaşım Karbür Ve Nitrürlerin Çözünürlüğü

Çeşitli karbür ve nitrürler için çözünürlük ve çözünürlük sınırları çalışmaları Irvine, Pickering ve Gladman (1967) tarafından yapılmıştır. Literatür çalışmalarına bakıldığında mikroalaşım karbür ve nitrürlerin çözünürlüklerinin farklılık gösterdiği görülmektedir. Örneğin Irvine, Pickering ve Gladman'ın (1967) verileri kullanıldığında %0,03 Al ve %0,015 N içeren çeliğin çözünme sıcaklığı 1273 °C olarak bulunmuştur. Narita'nın (1975) verileri kullanıldığında ise çözünme sıcaklığının 1126 °C olduğu tespit edilmiştir. Bu farklılık uygun sıcaklığı seçmede problem oluşturacak kadar önemlidir.

Karbür ve nitrürlerin çözünürlükleri birbirleriyle kıyaslandığında aşağıdaki sonuçlar çıkartılabilir;

- a. TiN'ün çözünürlüğü diğer mikroalaşım çökeltilerinden çok düşüktür.
- b. AlN'ün çözünürlüğü TiN'ün dışında diğer mikroalaşım çökeltilerinden çok az düşüktür.
- c. Mikroalaşım karbürlerinin çözünürlüğü benzer mikroalaşım nitrürlerinden genelde daha yüksektir.
- d. VC'ün çözünürlüğü diğer mikroalaşım çökeltilerinden çok daha yüksektir.

2.5. MİKROALAŞIMLI ÇELİKLERDE DAYANIM ARTTIRICI MEKANİZMALAR

2.5.1. Tane Boyutunu Küçültme

Mikroalaşım çeliklerinde 1000 °C'den 1250 °C'ye kadar pratik olarak çözünmeyen ve böylece tane sınırı hareketini engelleyen karbür ve nitrürler oluşmaktadır (Pawelski, 1981). Mikroalaşım elementleri, partikül şeklinde belirli bir büyüklüğe kadar mevcut olmaları halinde, tane büyüme işlemini etkili bir biçimde engellemektedir. Partiküllerin kabalaşmasıyla ya da çözünmesiyle her mikroalaşım elementine uygun sıcaklık alanlarında bu etki ortadan kalkar ve östenit aşırı derecede kabalaşır (Dahl, 1991; Hagen, 1991; Kai, 1991).

Etkili bir termomekanik proses için gereken şart, östenitleştirme yoluyla deformasyon öncesinde uygun bir başlangıç yapısının ortaya çıkmasıdır. İnce bir ferrit tanesi için dönüşüm öncesi ince bir östenit tanesi önemli bir şart olduğundan, burada bir yanda oldukça yüksek seçilmiş östenitleştirme sıcaklığıyla aşırı bir tane kabalaşmasından kaçınılmalı, diğer taraftan sıcaklık o kadar yüksek olmalıdır; öyle ki bundan sonraki bir termomekanik proses için östenitte yeterli derecede mikroalaşım elementi oranı çözünebilir (Taş, 2012).

2.5.1.1. Tane Boyutunun Belirlenmesi

Tane boyu ölçüm çizgisinin hadde yönüne 45° açı oluşturacak şekilde belirlenmesini içeren ortalama doğrusal kesme metodu kullanılarak ölçülebilir. Ölçüm çizgisinin kesmiş olduğu tane sınırları sayılır. Ölçüm çizgisinin toplam uzunluğu, bulunan tane sınırı sayısına bölünerek tek fazla yapılarda ortalama tane boyutu bulunur. Tane boyutu hesaplama işleminde aşağıda verilen eşitlik kullanılır. Ölçüm işlemi için en az 500 tane sınırı sayılmalıdır.

$$\bar{t} = \frac{L}{n} \quad (2.1)$$

Burada; \bar{t} = İlgili fazın tane büyüklüğü

L = Ölçüm çizgisinin toplam uzunluğu

n = Ölçüm çizgisi tarafından kesilen tane sınırı sayısı

Çift fazlı yapılarda ortalama tane boyutunun hesaplanması tek fazlı yapılara göre biraz farklılık göstermektedir. Örneğin ferrit ve perlit fazlarından oluşan çift fazlı bir yapıda ferrit fazının tane büyüklüğü aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir.

$$\bar{\alpha} = \frac{L \cdot f\alpha}{n\alpha} \quad (2.2)$$

Burada; $\bar{\alpha}$ = ferrit tane büyüklüğünü(μm)

L = ölçüm çizgisinin toplam uzunluğunu

$f\alpha$ = % ferrit miktarını

$n\alpha$ = ölçüm çizgisi tarafından kesilen ferrit tanelerinin toplam sayısını ifade etmektedir.

Ayrıca karbon oranı yüksek olan çeliklerde perlit fazının oranı yüksek olduğundan çeliğin dayanımını ferrit fazına göre daha fazla etkilemektedir. Bu nedenle karbon oranı yüksek olan çeliklerde (>%0,25) perlitin tane boyutunun hesaplanması önem arz etmektedir. Aşağıda belirtilen formülün kullanılması ile ortalama perlit tane boyutu hesaplanabilir (Gladman,1997; Karabulut, 2004).

$$\bar{p} = \frac{L \cdot fp}{np} \quad (2.3)$$

Burada; \bar{p} = Perlit tane boyutunu(μm)

L = Ölçüm çizgisinin toplam uzunluğunu

fp = % perlit miktarını

np = Ölçüm çizgisi tarafından kesilen perlit tanelerinin toplam sayısını ifade etmektedir.

Ortalama doğrusal kesme metodunun standart sapması Blank ve Gladman (1970) tarafından geliştirilen formül ile hesaplanmaktadır. Bu formülde tek kesme değerinin

standart sapması (G_i / i) 0,7 gibi sabit bir değer olduğu kabul edilmiş olup aşağıdaki formülle ifade edilmektedir.

$$(G_i / i) n_i^{1/2} = 0,7/n_i^{1/2} \quad (2.4)$$

Burada; G_i = Standart sapma

n_i = Ölçülen tane veya tane sınırı sayısı.

2.5.1.2. Ferrit Ve Perlit Oranlarının Belirlenmesi

Çeliklerin ferrit ve perlit oranları Gladman ve Woodhead'ın (1960) tanımlamış olduğu metalografik nokta sayım metodu kullanılarak yapılmaktadır Ferrit veya perlit hacimsel oranı eşitlik 2.5'teki formül kullanılarak hesaplanırken eşitlik 2.6 ise standart sapmayı belirlemede kullanılmaktadır.

$$f = \frac{n}{N} \quad (2.5)$$

Burada; f = Ferrit veya perlit fazının hacimsel oranı

n = Ferrit veya perlit fazına karşılık gelen nokta sayısı

N = Sayılan toplam nokta sayısı

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{f(1-f)}{N}} \quad (2.6)$$

Burada; σ_n = Standart sapma

f = Ferrit ya da perlit fazının hacimsel oranı

N = Sayılan toplam nokta sayısıdır.

2.5.2. Çökeltme Sertleşmesi

Mikroalaşım çeliklerinde çökelti sertleştirme mekanizması çok önem arz etmektedir. Çökelti dislokasyon hareketini engellerler, bu da dayanımı arttırır. Çökeltme olaylarından yararlanmak için haddeleme sırasında ve sonrasında, deformasyondan

önce geniş ölçüde bir çözünürlük hedeflenebilen karbonitrür oluşturuçular tercih edilir.

2.6. MİKROALAŞIMLI ÇELİKLERİN AVANTAJLARI

Kullanılan alaşım miktarı azdır. Ağırlık olarak %0,2'nin altında katılan niyobyum, vanadyum, titanyum gibi elementlerin oluşturduğu karbo-nitrürler çeliğin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Alaşım miktarının az olması sebebiyle ağırlık yönünden de hafiftirler ve maliyet açısından da daha ucuzdurlar. Üretim imkânları da daha hızlıdır. Zaman ve enerji yönünden kayıplar daha azdır.

2.7. MİKROALAŞIMLI ÇELİKLERİN UYGULAMA ALANLARI

- a. Büyük çaplı borular
- b. Otomotiv endüstrisi
- c. Kaynaklı çelik konstrüksiyonlar (Çelik köprüler, çelik binalar)
- d. Kaynak edilebilir hareketli konstrüksiyonlar ve makine elemanları (ör; Vinç, konstrüksiyon, kamyon, tren, vagon, sürekli taşıyıcılar, tarım ve zirai makinalar)
- e. Basınçlı kaplar ve depo tankları

BÖLÜM 3

KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ve sanayileşmeden kaynaklanan malzeme ihtiyacı, kompozit malzemelerin keşfedilip, geliştirilmesini sağlamıştır. Kompozit malzemeler geleceğin kimyası olarak adlandırılıp üzerinde çalışmalar yapılan çok kıymetli bir malzeme grubudur.

Belirli istenilen özelliklere sahip bir malzeme elde etmek için, özellikleri ve kimyasal bileşenleri birbirinden farklı, birbiri içerisinde makro anlamda çözünemeyen iki ya da daha fazla malzemenin birleştirilmesi ile meydana gelen yeni malzemeye kompozit malzeme denir. Daha iyi kavranması için detaylı bir tanım yapılmıştır. Bu şartları sağlayan her birleşik malzeme kompozit olarak isimlendirilir. Bu sebeple kompozit malzemeler çok geniş bir yelpazede incelenebilir. Ancak birleştirilmiş her malzemenin kompozit olmadığına dikkat edilmelidir. Örneğin alaşımlar kompozit değildir. Çünkü makro anlamda birbirleri içinde kaynaşmış metallere oluşur. Bir malzemenin kompozit olup olmadığını anlamak için kesit alınıp bakılabilir. Tunç; bakır ve kalayın birleştirilmesi ile oluşan bir alaşımdır ve homojen bir özellik gösterir.

İnsan vücudu, en dış tabakadan içeriye doğru; deri, lifler, kan, kaslar, kemik, kemiğin katmanları ve ilikten müteşekkil bir kompozittir. Beton, araç tekerleği ve tenis topu da birer kompozittir.

Kompozit malzemeler, matris ve takviye malzemesinden meydana gelir. Takviye yük taşır ve mukavemeti artırır. Matris ise takviyeyi tutmakla vazifelidir.

Kompozitler, metal matrisli, plastik matrisli ve seramik matrisli kompozitler olarak sınıflandırılmıştır. Metal matris malzemesi olarak; alüminyum, titanyum ve magnezyum en sık kullanılan metallerdir. Plastik matris malzemesi olarak; epoksi, polietilen, polipropilen kullanılabilir. Seramik matris malzemesi olarak ise; alümina, silika, baryum alümina silikat gibi malzemeler kullanılır. Fazla detaylandırmadan, kompozitlere neden ihtiyaç duyulduğunu görelim.

Hızla gelişen teknoloji ve hayatın daha hızlı hale gelmesi ve güvenlik endişesi, dayanıklı, korozyona dirençli, ısı özellikleri iyi, bütün bunları sağlayacak kadar elde edilebilir, hafif, aynı zamanda ucuz malzemeye olan ihtiyacı artırmıştır. Daha derin düşünüldüğünde, gelişen sanayi ve ulaşım istenileni daha çabuk elde etme gayesi, yeni ihtiyaçlar ortaya çıkarmıştır. Uzaya gönderilecek olan bir roket, düşen sıcaklık ve sürtünmeden kaynaklanan aşınmalara maruz kalacaktır. Bu sebeple roket tasarlanırken yüksek sıcaklığa ve aşınmaya dayanıklı malzeme kullanılmalıdır. Daha yüksek hızlara ulaşmak için, keşfedilmiş en iyi malzemeye ihtiyaç vardır.

Yüksek hızlı trenler rüzgâr sebebiyle çok yüksek basınçlara maruz kalır. Ayrıca kuşların cama çarpma riski yüksektir. Bu yüzden trenin camı bu kuvvetlere mukavemet edebilecek malzemeden imal edilmelidir. Rüzgâr türbinleri, askeri botlar, kurşungeçirmez yelekler, uçak kanatları, gaz türbinleri, ısı değiştirici tüpleri ve daha birçok alanda da bu özellikler aranmaktadır. Gemilerde, askeri araçlarda, silahlarda da yeni gelişmeler yaşanmakta ve yeni malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Günümüzde, aranan tüm bu özellikleri sağlayan tek malzeme grubunun kompozitler olduğu düşünülmektedir. Kompozitler gelişen teknoloji ile kullanımı yaygınlaşan bir malzeme olduğundan, birçok ülkede Ar-Ge çalışmaları bu malzeme üzerinde devam etmektedir. Ülkemizde de mühendislerimizin kompozit malzemeler üzerine yaptığı araştırmalar ve çalışmalar ümit vericidir. Bor madeni kompozit malzemelerde kullanımı yaygın bir metaldir. Dünya bor rezervinin yaklaşık %75'i de ülkemizde bulunmaktadır. Örneğin; bor karpit, kurşungeçirmez yelekler için vazgeçilmez bir malzemedir. Ayrıca metal matris içerisinde kullanılabilen nadir elyaflardan birisi de boron elyaftır. Ancak pahalıdır.

Kısacası diğer malzemelere göre daha yüksek mukavemet/yoğunluk oranına sahip olmaları başka bir deyişle, daha dayanıklı ve hafif olmaları kompozitleri kıymetli yapan en büyük özelliktir.

3.2. KOMPOZİT MALZEMELERİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Günümüzde gemi yapımından bina yapımına, ev aletleri üretiminden uzay teknolojisine kadar hemen hemen her alanda çok yaygın bir kullanımı bulunan kompozit malzemenin üretimi son birkaç yüz yıla mal edilmiş gibi görülse de ilk örnekleri çok eskilere dayanmaktadır. Kompozit malzeme kavramının ortaya atılması ve konunun bir mühendislik konusu olarak ele alınması ancak 1940'lı yılların başında gerçekleşmiştir.

Çok bileşenli malzemenin ilk örnekleri, doğada bulunan malzemeye yapılan müdahalelerle onun kullanılabilir hale getirilmeye başlandığı aşamadır. İlk çağlardan beri insanlar kırılabilir malzemelerin içine bitkisel veya hayvansal lifler koyarak bu kırılabilirlik özelliğinin giderilmesine çalışmışlardır. Bu konularda en iyi örneklerden biri kerpiç malzemedir. Kerpiç üretiminde killi çamur içine katılan saman, sarmaşık dalları gibi sap ve lifler, malzemenin gerek üretim, gerek kullanım sırasındaki dayanımını artırmaktadır (Zini ve ark., 2011; Zarrabi Ahrabi ve ark., 2011).

Öte yandan, günümüzde kompozit malzemenin donatılmasında yaygın olarak kullanılan liflerle ilgili uygulamanın da çok yeni olmadığı eldeki bulgulardan anlaşılmaktadır. Örneğin cam liflerinin üretimi, eski Mısır'a kadar tarihlendirilmektedir. Daha M.Ö 1600 yıllarında Mısır'da ince cam liflerinin yapımının bilindiği, XVIII. Hanedan devrinden kalan, çeşitli karanlık ve renkte cam lifleriyle bezenmiş amforaların mevcudiyetinden anlaşılmaktadır. Cam liflerinin sanayide kullanımıyla ilgili ilk kayıt, 1877 tarihlidir. Hidrolik bağlayıcılar ve elyaf malzeme kullanılarak yapay taş plakaların üretilmesi yöntemi hakkında bu yüz yılın başında alınmış patentlere rastlanmaktadır. Günlük uygulamalarda en yaygın kullanım olanağı bulmuş olan liflerle donatılmış kompozit malzemelerden ikisi, asbest lifleriyle donatılmış kompozit malzemeler ve cam lifleriyle donatılmış polyster kompozitlerdir. İlk

kez ince levha yapımında kullanılan çimento ve asbest kompozitleri yıllar boyu önemini koruyarak bu gün hala kullanılan bir malzeme olma özelliğini sürdürmektedir.

3.3. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI

Kompozitler genel olarak kullanılan matris malzeme cinsine ve takviye elemanlarının şekline veya yerleştirme biçimine göre iki ana başlık altında toplanır.

1. Matris malzeme cinsine göre kompozitler
 - a. Metal matris kompozitler (MMK)
 - b. Seramik matris kompozitler (CMK)
 - c. Polimer matris kompozitler (PMK)
2. Takviye Elemanlarının Şekil ve Yerleştirilmesine Göre
 - a. Elyafli kompozitler
 - b. Parçacıklı kompozitler
 - c. Tabakalı kompozitler
 - d. Karma kompozitler

3.4. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler, istenen ve gerekli özellikleri sağlamak üzere en az biri metal olan iki veya daha fazla farklı malzemenin sistematik bileşimiyle elde edilen yeni malzemelerdir.

Metal matrisli kompozit malzemeler tek bileşenli alaşımlarla elde edilemeyen özellikleri sağlamak üzere, bir metal matris içinde sürekli veya kısa fiber, whisker veya partikül şeklinde takviye fazı içerir. Günümüz şartlarında üretilen metal matrisli kompozit malzemeler üç gruba ayrılmaktadır.

- a. Elastiklik modülünün, belli oranda da mukavemetin artmasıyla sonuçlanan, bağlayıcı matris içine partikül şeklindeki takviye malzemelerinin ilavesi ile oluşturulan partikül takviyeli metal matrisli kompozitler,

- b. Partikül takviyeli metal matrisli kompozitlere göre daha büyük yük iletimi yeteneğine sahip, yüksek dayanımlı whisker veya kısa fiber takviye metal matrisli kompozitler.
- c. Fiberin yüksek performanslı tüm özelliklerini taşıyan sürekli fiber esaslı metal matrisli kompozitler.

Genel olarak bakıldığında metal matrisli kompozitlerin, metallere göre üstün olan özellikleri şunlardır:

- a. Yüksek mukavemet / yoğunluk oranı, başka bir deyişle spesifik mukavemet
- b. Yüksek elastiklik modülü / yoğunluk oranı, başka bir deyişle spesifik modül
- c. Daha iyi yorulma direnci
- d. Yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyabilme ve düşük sürtünme oranı gibi daha iyi yüksek sıcaklık özellikleri
- e. Düşük termal genleşme katsayısı
- f. Daha iyi aşınma direnci

Metal matrisli kompozitlerin dezavantajları olarak ise şu maddeler sayılabilir:

- a. Sürekli fiber takviyesinin söz konusu olduğu durumlarda zor ve karmaşık üretim prosesleri (döküm yöntemi hariç)
- b. Metallere göre sünekliğin belli oranda azalması Yüksek maliyetli üretim sistemi ve teçhizat
- c. Yeni gelişen bir teknoloji olması nedeniyle firmaların ve üreticilerin deneyimsiz oluşu

3.4.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Kullanılan Matris Malzemeleri

Metal matrisli kompozitler için matris malzemesi olarak genellikle hafif metaller tercih edilmektedir. Matris malzemesi olarak MMK malzemelerde, alüminyum ve alaşımları ilk sırayı almaktadırlar. Bu alaşımların tercih edilmesinin nedeni düşük yoğunluk, düşük ergime sıcaklığına sahip olmaları ve birçok seramik takviye elemanını kolay ıslatabilmeleridir. Alüminyum saf olarak kullanılabildiği gibi alaşım

olarakta kullanılabilir. Yüksek aşınma dayanımı ve düşük sürtünme değerleri için Al-Si alaşımları, düşük yoğunluk ve yüksek termal iletkenlik için Al-Mg ve Al-Cu alaşımları matris alaşımı olarak kullanılabilir. Yüksek performanslı kompozit malzeme üretimi için matris malzemesi, takviye fiberleri veya partikülleri iyi ıslatabilmeli, iyi bir arayüzey bağı oluşturmalı, mümkün olan en düşük basınç ve sıcaklıkta hızlı şekilde katılma yapabilmelidir. Ayrıca üretim esnasında veya bundan sonraki işlemler esnasında, matris ve takviye elemanı arasında diğer kimyasal etkileşimler olmamalı ve matris kararlı kalmalıdır. Metal matrisli kompozit malzemelerde, matris malzemesi olarak genellikle Al, Ti, Mg, Ni, Cu, Co ve Zn gibi metaller ve alaşımları kullanılır. Fakat bunlardan sadece Al, Ti ve Mg alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır (Akdoğan, 2008).

3.4.2. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Kullanılan Takviye Malzemeleri

Üretilecek kompozitin yapısal bir uygulamada kullanımı durumunda düşük yoğunluğa, yüksek modül ve mukavemete sahip takviye elemanına gereksinimi vardır. Metal matrisli kompozit malzemelerde en çok kullanılan takviye elemanları Al_2O_3 , SiC, Bor, TiC ve karbondur (Akdoğan, 2008). Doğada birçok seramik parçacık halinde bulunduğu için, bunlar partikül takviyeli kompozitler için geniş bir aralıkta takviye potansiyeline sahiptir. Partikül takviyeli kompozitlerin avantajları şunlardır:

- a. Sürekli veya kısa fiberlilere göre, partikül takviyeli kompozitler daha ucuzdurlar.
- b. Toz metalurjisi ve döküm gibi üretim teknikleri ve bunu takiben haddeleme, dövme ekstrüzyon gibi geleneksel ikincil işlemler uygulanabilir.
- c. İzotropik özellikler gösterirler.
- d. Rijitlikleri ve aşınma dayanımları iyidir.

Uygulamalarda mukavemetin yüksek olması gerektiği durumlarda, kısa fiberler veya whisker katkılı kompozit malzemeler kullanılır. Rijitlik ve mukavemetin en kombinasyonunu ise anizotropik özelliklere ve en önemlisi de yüksek maliyete sahip sürekli fiber katkılı metal matrisli kompozitler verir. Metal matrislerde kullanılan en pahalı takviye elemanı bordur. Ardından sırasıyla SiC, C ve Al_2O_3 gelmektedir.

3.5. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Metal matrisli kompozit malzemelerin, geleneksel malzemeler karşısında üstün mekanik özellikler sergilemesi, son yıllarda bu malzemelerin üretim teknikleri üzerinde daha yoğun çalışmalar yapılmasına yol açmıştır. Üretim yöntemleri; katı faz üretim yöntemleri, sıvı faz üretim yöntemleri ve diğer yöntemler olarak sınıflandırılabilir (Akdoğan, 2008).

1. Katı Faz Üretim Yöntemleri
 - a. Toz Metalurjisi Teknikleri
 - b. Difüzyon Bağı Yöntemi
2. Sıvı Faz Üretim Yöntemleri
 - a. Sıvı Metal İnfiltrasyon
 - b. Sıkıştırma Döküm
 - c. Sıvı Metal Karıştırma
 - d. Plazma Püskürtme
3. Diğer Yöntemler
 - a. Rheocasting ve Compcasting Döküm Teknikleri
 - b. Vidalı Ekstrüzyon
 - c. In-Situ Tekniği
 - d. XD Tekniği

Üretim yönteminin seçiminde, üretilecek mamul veya yarı mamülün önceden belirlenen fiziksel ve mekanik özellikleri değerlendirilip, şu parametreler dikkate alınarak yöntem belirlenmesi yapılır:

- a. Çalışma sıcaklığı aralığı
- b. Takviye malzemesi şekli
- c. Matris malzemesi ile takviye malzemesinin uyumu
- d. Matris ve takviye malzemelerinin ek işlem gereksinimi
- e. Matris malzemesi ile takviye malzemesi arasında oluşabilecek reaksiyonlar
- f. Elde edilecek üründen istenen boyut tamlığı
- g. Takviyenin matris malzemesi içerisinde dağılımının homojen olması
- h. Matris-takviye arayüzey bağının tam olarak sağlanabilmesi.

3.6. KOMPOZİT MALZEMELERİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

Kompozit malzemelerin avantajları:

Ağırlıkça tasarruf edilmiştir. Çatlak ilerlemesi olayı minimize edilmiştir. Titreşimleri absorbe edilme özelliği sağlanmıştır. Kompozitlerden bazıları çok yüksek akma sınırı değerlerine sahiptir. Korozyon problemi yoktur. Bunda matris ve malzemenin uygun seçilmesinin önemi büyüktür. Aksi takdirde birbirleri ile temasta bulunan malzemeler pil oluşturacak ve galvanik korozyona neden olacaktır. Kopma uzaması metallere göre daha yüksektir. Yorulma dirençleri oldukça yüksektir.

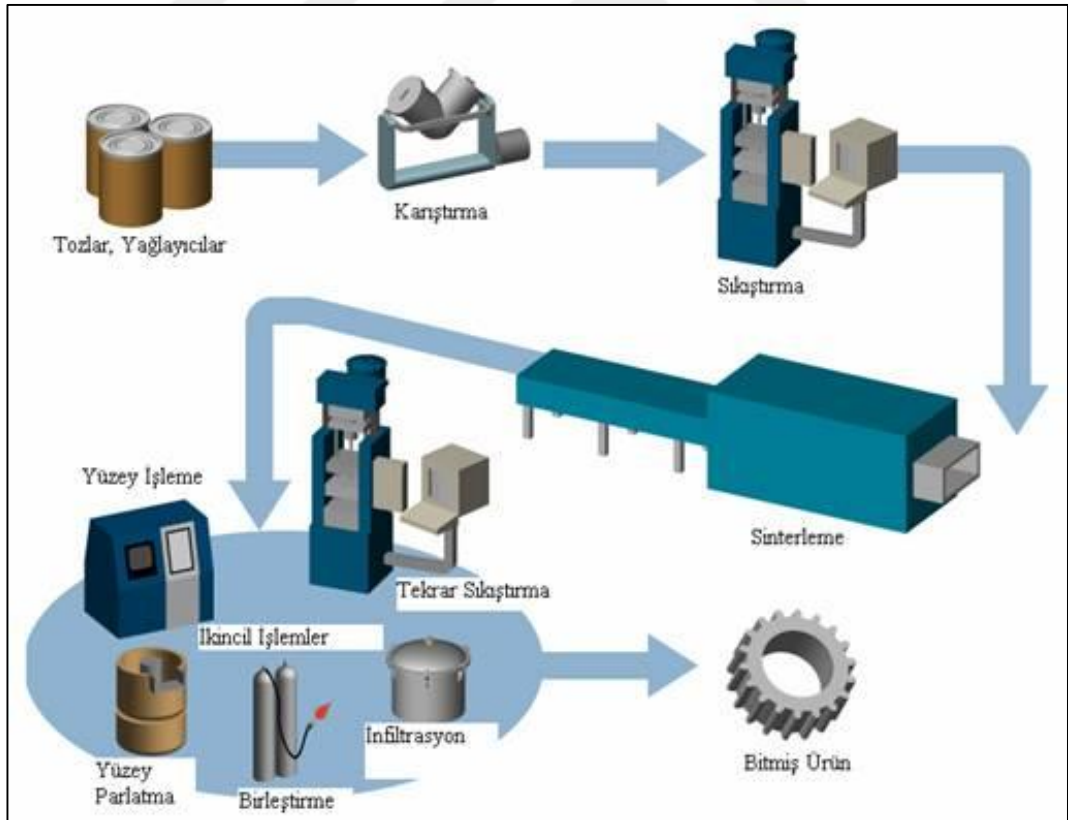
Kompozit malzemelerin dezavantajları:

Üretimi nispeten pahalıdır. Metallere yapışmazlar. Fırınlamadan (pişirmeden) kullanılamazlar. Değişik doğrultuda değişik mekanik özelliklere sahiptir. Aynı kompozit malzemeler için çekme, basma, kesme, eğilme mukavemet değerleri farklı farklıdır. Nem ve hava zerrecikleri, kompozitlerin mekanik ve yorulma özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Delik delme ve kesme türü işlemler liflerde açılmaya yol açmaktadır.

BÖLÜM 4

TOZ METALURJİSİ

Toz metalurjisi (T/M), yönteminde toz halindeki saf metaller, karbon, seramik ve plastik malzemeler birbirleriyle karıştırıldıktan sonra basınç altında preslenir. Daha sonra partiküllerin temas yüzeyleri arasında kuvvetli bir bağ oluşturmak ve istenilen özellikleri sağlamak amacıyla, "sinterleme" olarak bilinen, kullanılan metal tozlarının ergime noktasının altındaki bir sıcaklıkta yapılan bir işleme tabi tutulur (Yavuz ve Güner, 2002). Eğer toz karışım halindeyse, karışımdaki en yüksek ergime noktasına sahip tozun ergime sıcaklığının altında yapılır (Anık ve diğ., 1999).



Şekil 4.1. Bir ürünün TM ile üretimi (Öztürk, 2012).

Toz metalurjisi (T/M), çeşitli metal işleme teknolojileri arasında en farklı üretim tekniğine sahip yöntemdir. Yüksek kaliteli ve karmaşık parçaların ekonomik olarak üretilmesi, toz metalurjisinin kullanımını daha yaygın hale getirmektedir. T/M farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarının önce preslenmesi ve daha sonra taneciklerin sinterleme yoluyla birleştirilerek sağlam, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürülmesidir.

Toz metalurjisi küçük, karmaşık ve boyutsal hassasiyeti yüksek parçaların imalatına oldukça uygundur. Malzeme kaybı yok denecek kadar azdır. Bu yöntemde malzeme kayıpları yoktur ve elde edilen toleranslar isteğe uygun olmakla birlikte düzgün yüzeyler elde edilmektedir (Yavuz ve Güner, 2002). Bunların sonucu olarak, T/M konusu sürekli gelişmekte ve geleneksel metal şekillendirme yöntemlerinin yerini almaktadır.

T/M'nin uygulama alanları oldukça geniştir. Tungsten lamba filamentleri, dişçilik, dişli çarklar, yağlamasız yataklar, elektrik kontakları, nükleer güç yakıt elemanları, ortopedik gereçler, ofis makinaları parçaları, yüksek sıcaklık filtreleri, uçak fren balataları, akü elemanları ve jet motor parçaları metal tozlarından üretilen parçalara örnek olarak verilebilir. Ayrıca, metal tozları boyalar, gözenekli betonlar, basılmış devre levhaları, zenginleştirilmiş un, patlayıcılar, kaynak elektrotları, roket yakıtları, baskı mürekkepleri, lehimleme aletleri ve katalizörlerin üretilmesinde de kullanılmaktadır. Bununla birlikte uçak endüstrisi, ileri teknoloji kompozitleri, elektronik parçalar, magnetik malzemeler ve talaşlı imalatta kullanılan kesici takımların üretiminde hızlı bir büyüme göstermiştir (Yavuz ve Güner, 2002). Bu pazarın %75'i otomotiv endüstrisi tarafından kullanılmaktadır. Avrupa yapımı arabalar 7 kg, Japon yapımı arabalar ise 5 kg T/M parçaya sahip olduğu halde, Amerikan arabaları 16 kg'dan daha fazla T/M parça içermektedir.

4.1. TOZ ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Metal tozların üretiminde temel olarak dört çeşit yöntem vardır:

- a. Kimyasal tepkimelerle toz üretimi,

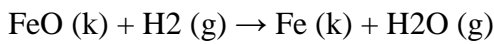
- b. Elektroliz yöntemi,
- c. Atomizasyon yöntemi,
- d. Mekanik öğütme veya Mekanik alaşımlama

4.1.1. Kimyasal Tepkimelerle Toz Üretimi

Genelde tüm metal tozları kimyasal tekniklerle üretilebilir (German, 1994). Kimyasal yöntemle üretimde; katı, sıvı veya buhar fazı tepkimeleri ile toz üretimi gerçekleştirilebilir. Bu yöntemle üretilen tozların ebatları 5-10 µm ile 100-500 µm arasında ve değişik şekilli olabilmektedir. Bu üretim yöntemi; gaz altında katının ayrışması, temel ayrışma, sıvıdan çökeltme ve gazdan çöktürme olmak üzere dörde ayırmak mümkündür (Roll, 1984).

4.1.1.1. Gaz Altında Katının Ayrışması (Doğrudan İndirgeme)

Bu yöntemde, saf metal oksit tozları gerek karbon monoksit gerek de hidrojen gazı ile tepkimeye sokularak yüksek sıcaklıklarda metal oksit indirgenmesi gerçekleşir. Bu yöntemle, demir, bakır, tungsten, molibden, nikel ve kobaltın oksitleri indirgenerek bunların tozları üretilir. Gaz altında metal oksit indirgenmesine en iyi örnek demir oksit'in (FeO) indirgenmesi için geçerli olan tepkimedir (Öveçoğlu, 1997).

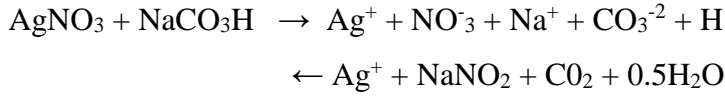


4.1.1.2. Termal Ayrışma (Karbonil)

Buhar fazında ayrışma ve yoğunlaşma süreçlerinin birleşimi ile metal tozlarını üretmek mümkündür. Bu süreçlerin birleşimdeki en temel örnekleri demir karbonil Fe (CO)₅ veya nikel karbonil Ni (CO)₄ tepkimelerini içeren üretim yöntemidir. Üretilen bu tozlar 2-4 µm veya 2-10 µm arasında ve yaklaşık %99,6 saflıktadır (Roll, 1984). Diğer metallere; bakır, krom, platin, radyum, altın ve kobalt karbonil üretimi için gereken yüksek enerji ihtiyacı ile karbondioksit sirkülasyonunun beraberinde getireceği potansiyel tehlikelerden ötürü dünyada sadece nikel ve demir karbonil üretimi tam olarak benimsenmiştir (Öveçoğlu, 1997).

4.1.1.3. Sıvı Fazdan Çöktürme

Sıvı çözeltide, nitrat, klorür ve sülfatlar olarak bulunan tuzlar çökeltilir. Çökeltilen bu tuzlar ısıtılarak parçalanır. Tuz suda eritilir ve ikinci birleşik yardımı ile çökeltir. Örnek olarak aşağıda gümüş nitratın potasyum karbonhidrat ile tepkimesini ele alalım (Boz, 1999).



Son ürün olan katı gümüş çözeltisi öğütülerek toz ürün haline gelir. Kimyasal yöntemlerle çökelti fazında elde edilen tozların tipik boyutları 1 µm dolayında olup yüksek derecede safiyete sahiptirler. Bu yöntemle, kobalt, nikel veya demir ile kaplanmış torya (ThO₂), titanya (TiO₂) ve volfram karbür (WC) ve süper alaşım malzemeleri üretilir (Boz, 1999).

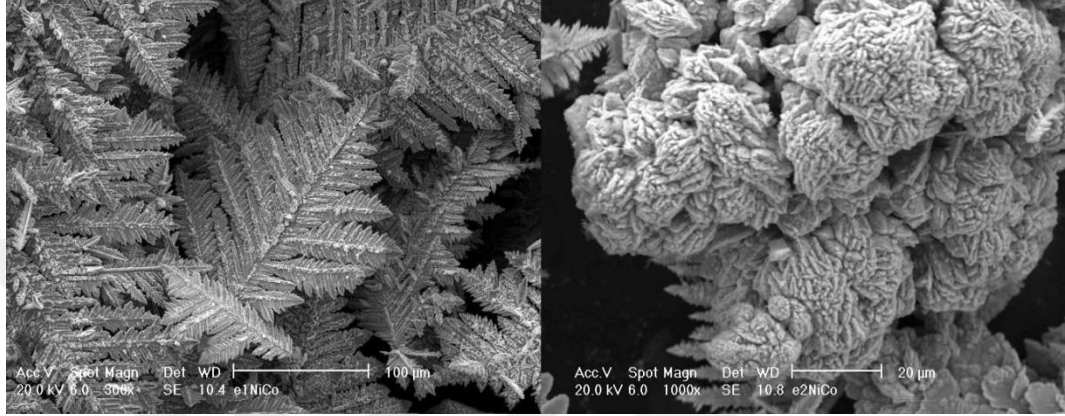
4.1.1.4. Gazdan Çöktürme

Gaz bileşiklerin oluşturduğu kimyasal tepkimeler sonucu reaktif metallere ve nano ölçekli partiküllerden tozlar üretilir. Gaz esaslı tepkimelerin en büyük avantajı, tepkime sırasında toz üretiminde ergitmenin ortadan kalkması sonucu potanın kirlenmemesi ve yeniden kullanılabilir olmasıdır. Bu tür üretim sürecine en iyi örnek molibden trioksit'in saf hidrojen ile tepkimeye girerek metalik molibden tozunun üretimidir.

Bu yöntemle, vanadyum, niyobyum, volfram, hafniyum, gümüş, nikel ve zirkonyum metallere klorürleri, florürleri ve hatta oksitleri işleme sokularak çok küçük tane boyutlarında %99,6 saflığındadır (Roll, 1984).

4.1.2. Elektroliz Yöntemi

Yüksek iletkenliğe sahip metal tozlarını üretmenin bir başka yöntemi de elektroliz bir hücrenin katot çubuğunda metal tozlarını çöktürmektir. Bu yöntemi kullanarak %94'e varan saflıkta Cu, Fe, Zn ve Ag tozlarını üretmek mümkündür (Kurt, 1992).



Şekil 4.2. Elektrolit olarak üretilmiş Ni/Co tozların morfolojisi (Anonim).

Üretilen tozun ham maddesi anoda çözünerek katoda birikir. Hücreye verilen DC voltajı ise elektroliz biriktirmenin doğru yönde ilerlemesini sağlar (Öveçoğlu, 1997). Elektrolizle üretilen tozlar, yıkanarak elektrolitten ve tuzlardan iyice temizlenmeli ve kurutma inert gaz altında yapılarak oksitlenme önlenmelidir. Tozlar, kurutulduktan sonra ince taneli toz haline gelinceye kadar öğütülür. Elektroliz hücrelerinde üretilen tozlar genellikle süngerimsi biçimlerde ve dentiritik yapılara sahiptirler. Ancak maliyetinin yüksekliği nedeni ile üretimi sınırlıdır (German, 1994).

4.1.3. Atomizasyon Yöntemi

Atomizasyon yöntemi eritilebilen tüm metallerden toz üretmede kullanılabilen bir yöntemdir. Bu yöntemin üretim tekniği; bir sıvı metalin pota dibindeki bir delikten akması sırasında; ergimiş metalin üzerine basınçlı gaz veya sıvı gönderilmesi ile çok ince parçalara ayrılarak katılaşmasıdır (Kurt, 1992). Dünyada üretilen tozların %80'den fazlası atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir. Diğer üretim tekniklerine göre; şekli, tane büyüklüğü ve dağılımın kontrolü çok kolaydır. Özellikle alaşım

tozlarının üretimi için çok uygundur. Çünkü en iyi homojenliği bu yöntem sağlar. Atomizasyon yöntemi ile toz üretmede;

- a. Su atomizasyonu
- b. Gaz atomizasyonu
- c. Döner disk atomizasyonu
- d. Döner elektrot atomizasyonu gibi değişik teknikler kullanılır (Boz, 1999).

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi, geleneksel atomizasyon süreçlerinde atomize edilecek olan metal ergitme potasından (tandıştan) sıvı, huzmeler halinde akarken tank içerisinde bu huzmeye belirli bir açı ve hızla çarpan gaz veya su jetlerinin etkisiyle atomizasyon gerçekleşir. Ergitme işlemi ayrı bir potada olabileceği gibi, tandış etrafına sarılan indüksiyon bobinler ile de gerçekleştirilebilir (Roll, 1984).

4.1.3.1. Su Atomizasyonu

Su ile atomizasyon, sağladığı yüksek soğuma hızları sayesinde kitlesel endüstriyel üretime uygun olmasına karşın üretilen tozlar düzensiz şekildedir ve önemli miktarlarda oksit içerirler. Su ile atomizasyon 1600 °C'nin altında eriyen metallere elementel veya alaşım tozları üretmek için yaygın olarak kullanılır. Atomizasyonla üretilen metal tozlarının %30'u sıvı metali su jeti ile keserek elde edilir. Yassı huzmeli V jetleri adı verilen iki sistem vardır. Biri iki tarafında iki ağızlıktan, dar açıyla ayrılan yassı huzmeli; diğeri ise iki tarafı perdeli yassı huzmeli jetlerdir. Yassı huzmeli V-jetleri, demir ve paslanmaz çelikten (su ile) nikel ve kobalt alaşımlarına (gaz ile) kadar yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Serbest düşüşle akmakta olan sıvı metalin V'den dışarı sıçramasını ve saçılmasını önlemek gerekir. Sıvı metal dağınımına uğrayana kadar cep içinde kalmalıdır. Bu sebeple eşdeğer bir enerji verimliliği için açık V jetleri, kapalı veya dörtlü jetlere oranla daha yüksek basınçlarda çalışmak zorundadır (Kurt, 1992).

4.1.3.2. Gaz Atomizasyonu

Gaz ile atomizasyon süreçlerinde ise, hava, azot, helyum veya argon gazları kullanılır. Bu yöntemin su ile atomizasyon yöntemine olan en önemli üstünlüğü, tozların küresel biçimlerde üretilibilmeleridir (Roll, 1984)

Bazı reaktif elementler (titanyum, zirkonyum gibi) metallere ile nikel esaslı süper alaşımların geleneksel atomizasyon süreçleriyle üretilmeleri mümkün değildir. Bu tür reaktif metallere toz haline getirilmesinde dönen elektrot prosesi (rotating electrode process REP) adı verilen bir savurma atomizasyon yöntemi geliştirilmiştir (Öveçoğlu, 1997).

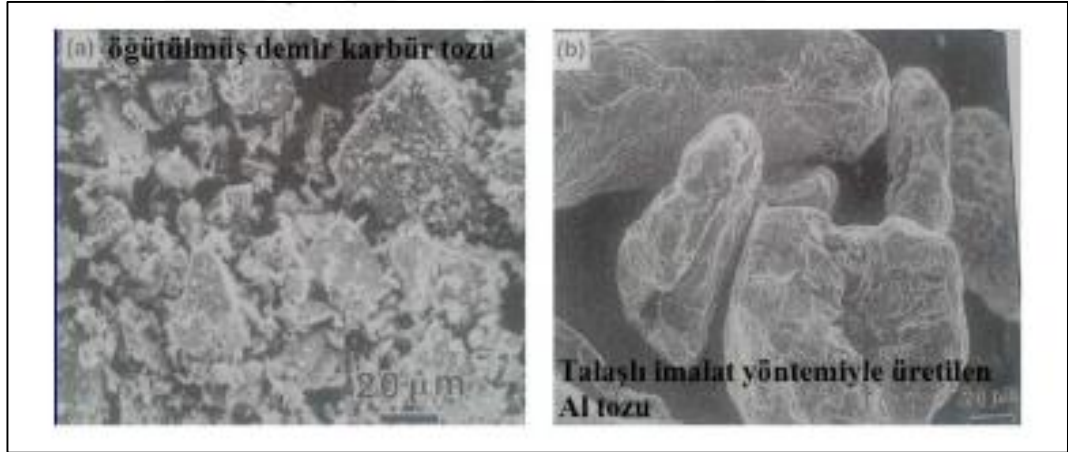
Dönen elektrot atomizasyonun da, atomize edilecek olan metal çubuğu yatay eksen etrafında dönerken, kullanılan volfram katot malzemesi bu çubuk üzerinde ark oluşturur. Bu ark sonucu kısmi ergitme gerçekleşir ve metal çubuktan savrulan damlacıklar atomize olur. Volfram katot çubuğu veya plazma üreten uç kullanılarak gerçekleşen ark sayesinde metalik çubuktan küçük parçalar ergitilerek savrulur (Boz, 1999).

Dönen disk yönteminde ise, ergimiş metal bir potadan dönen bir disk üzerine dökülür. Ergimiş damlacıklar merkezkaç kuvvetinin etkisi ile dağılarak, asal bir gazla doldurulan bir odacıkta toplanır. Tane büyüklüğü 30-500 mikron arasında değişir ve taneler oldukça küreseldir (Boz, 1999).

Bir başka atomizasyon yöntemi de vakum şartlarında gerçekleşen, atomizasyon süreçleriyle gerçekleştirilir. Bu yöntem ile oksidasyona karşı duyarlı nikel, kobalt, demir ve alüminyum alaşımları için geliştirilmiş olup vakum ve hidrojen gazı altında atomizasyon gerçekleştirilir. Vakum atomizasyonu cihazında metal indüksiyon ocağında ergitilir ve üretilen vakum sonucu ergiyik içerisine daldırılan bir seramik tüp vasıtasıyla atomizasyon kazanına iletilir. Bu iletim sonucu ani olarak genişleyen sıvı metal önce damlacıklara ayrılır, daha sonra bu damlacıklar ani ve aşırı soğuyarak toz haline geçerler (Öveçoğlu, 1997).

4.1.4. Mekanik Öğütme

Mekanik yöntemle ekonomik olarak toz imali için, kimyasal bağları zayıf olan ve kayma sistemi az olan karışık kristalli yapılarda malzemeler ile çok sert ve gevrek olan metal alaşımları ve seramikler kullanılır. Sünek malzemeler pul şeklinde tozların elde edilmesine neden olacağından, genellikle kolay parçalanabilen kırılabilir, sert ve gevrek malzemeler bu metot için uygundur (Ekşi, 1996). Bu şekilde üretilen başlıca metal tozları Al, Cu ve pirindir. Bunlardan başka, Sn, Pb, Mn, Co, Si, Zn, Fe, Fe-esaslı ve Cu- esaslı tozlarda üretilir. Mekanik öğütme sırasında üretilen tozun yapısına ve özelliklerine etki eden en önemli parametreler, öğütmede kullanılan toplam toz ağırlık oranı, öğütme süresi ve öğütmede kullanılan sıvı ya da öğütme atmosferidir. Öğütme işlemi sırasında, toz parçacığının üzerine darbe, aşındırma, kesme ve basma olmak üzere dört tür kuvvet etki eder.



Şekil 4.3. Mekanik yöntemlerle üretilen metal tozları.

Darbe, öğütme ortamında kullanılan bilyelerin ya da diğer tozların herhangi bir toz parçacığı üzerine anlık çarpmasıdır. Aşınma bilye/toz etkileşimi ile olabileceği gibi, toz / toz etkileşimleri sonucu da oluşabilir (Boz, 1999).

Klasik öğütme süreçleri ile mümkün olmayan katı alaşımlama işlemi, yüksek enerjili öğütme ortamı sağlayan atritör, gezegen bilye değinileni, bazı titreşimli değirmenler ile laboratuvar ölçekli spex değirmenlerinde mekanik alaşımlama (MA) ile gerçekleştirilir (Öveçoğlu, 1997).

4.2. TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN MALZEMELERDE PARÇA KARAKTERİZASYONU

Toz metalurjisi parçacıkların bir araya gelmesiyle oluşan tozlarla başlar. Parçacık tozun bölünemeyen en küçük birimidir. Genellikle 3mm'ye kadar olan parçacıklar toz metalurjisi ile ilgilidir. İşlem kontrolünün sürdürülmesinde toz özelliklerinin (tane boyutu, şekli, yoğunlaşması, sertliği, homojenliği vb.) tespit edilmesi ve bu özelliklerin ürün performansını nasıl etkiledikleri iyi bilinmesi gereklidir (Saritaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

4.2.1. Toz Numunesi Alımı

Toz numunesi alma önemli ve zor bir iştir. Numune alma işlemi birçok noktadan küçük numuneler alınarak harmanlamak suretiyle yapılmalıdır. Parçacıklar genellikle kohesivdir, dolayısıyla birbirlerine yapışma eğilimleri de yüksektir. Bu sebeple parçacıkların topaklanması muhtemeldir. Genellikle topaklanmalar yüzey neminden kaynaklanabilir. Bir arada tutunan topaklanmalar, çok küçük kayma gerilmeleriyle ortadan kaldırılacak zayıf kuvvetlerle tutunan parçacıklar kümesi olarak tanımlanmaktadır. Çoğu parçacık için yüzey aktifleştiren sıvılar, mekanik ve ultrasonik çalkalama yöntemleri parçacıkların dağıtılması ve özelliklerin belirlenmesinde etkindir. Topaklanmayı dağıtmada en çok tercih edilen yöntemler mekanik karıştırma ya da ultrasonik çalkalamadır (Saritaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

4.2.2. Parçacık Boyut Ölçümü

Tane boyutu bilgisi tozları ele alan herkes için gereklidir. Eğer partikül küresel değil ise tek bir partikül boyutunu belirlemek kolay bir iş değildir. Tek bir partikül boyutunu saptamak çoğunlukla parçacığın yaklaşık geometrik yapısının silüetinden yola çıkılarak varsayım dayanan çap özelliğinden yararlanılır (Kousaka, 1997). Toz parçacıklarının eleklerle veya diğer metotlarla tespit edilen boyutudur. Tozların tamamının aynı boyutta olduğu söylenemez, ancak ortalama tane boyutundan söz

edilebilir. Toz şekli; parçacık şekli karmaşık oldukça parçacık boyutu ölçüm teknikleri de değişir.

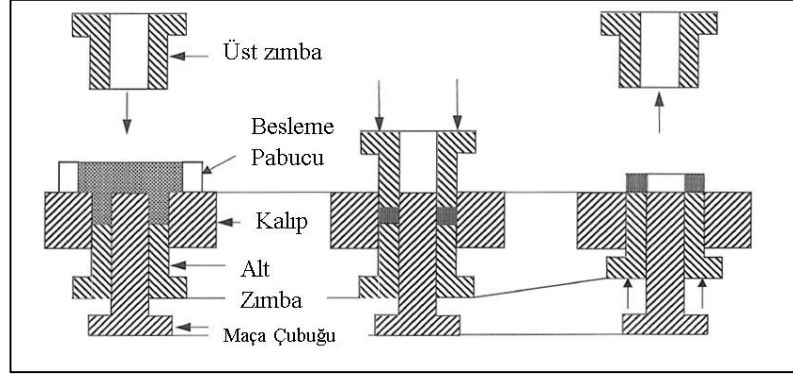
Parçacık tozla karmaşık şekilli ise üç dört boyut ölçümü gerekir. Çok fazla karmaşık şekilli parçacığın tane boyutu yüzey alanından gidilerek bulunabilir.

Tozların tane büyüklüklerini genellikle elek analizi ölçüm tekniği ile yapılır. Ölçüm döküm kumu tane büyüklüğü tespiti gibi yapılır. Elek büyüklüğü delik büyüklüğü ile ölçülür. Elek büyüklüğü meş (mesh) ile belirtilir. Günümüzde metrik sisteme geçiş olduğundan artık eleklerde delik büyüklüğü mikron cinsinden değeri yazılıdır. Elek hiçbir zaman bir toz tanesinin gerçek boyutunu ölçmez, sadece belirli bir değerden büyüktür veya küçüktür diye ayırır.

4.3. TOZLARIN SIKIŞTIRILMASI VE PRESLENMESİ

4.3.1. Tek Yönlü Sıkıştırma

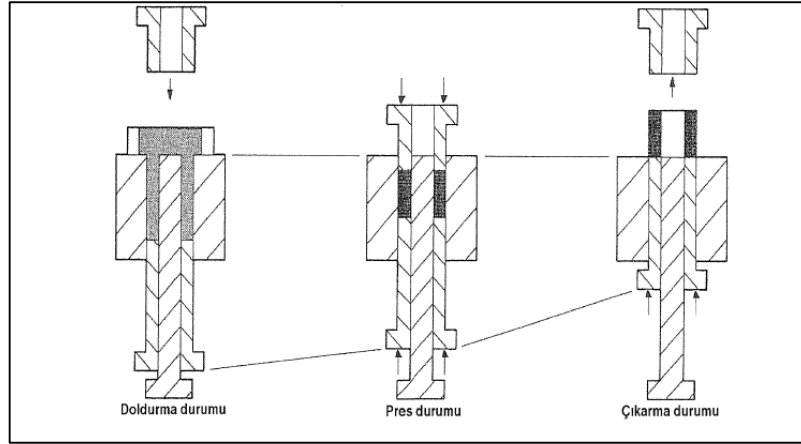
Presleme, üretilecek malzemenin türüne göre uygun sertlik ve aşınma direncine sahip bir kalıpta (sıkıştırma çelik veya karbür kalıp) içerisinde genellikle 300- 800 MPa basınç aralığında yapılır. Presleme öncesinde yapılan malzeme şarjı sırasında kalıptan taşan tozlar bir sonraki preslemede kullanılmak üzere değerlendirilir. Tek yönlü veya çift yönlü çalışan pistonlar yardımıyla gerçekleştirilen preslemede karmaşık şekilli parçaları tek bir proses sürecinde 25 parça/ dakika hızla üretebilmek mümkündür. Presleme neticesinde kompakt hale getirilen parçalar kalıptan çıkartılarak mukavemetlerinin artırılması amacıyla sinterleme işlemine tabi tutulmaktadır.



Şekil 4.4. Tek yönlü sıkıştırma.

4.3.2. Çift Yönlü Sıkıştırma

Yukarıdan ve aşağıdan basınç uygulanır. Birinci ve ikinci sınıf parçalar üretilebilir. Homojen ham yoğunluk elde edilemez. HID oranı 1,5’u geçmez. Toz parçacıkları arasındaki sürtünme, parçacıklarla ve zımbalarla kalıp yüzeyi arasındaki sürtünme nedeniyle ham kompakt içindeki yoğunluk (ham yoğunluk) dağılımı önemli farklılıklar gösterebilir. Sürtünmeyi azaltarak (yağlayıcı kullanarak) veya uygun sıkıştırma yöntemleri uygulanarak bu farklılıklar azaltılmaya çalışılır.

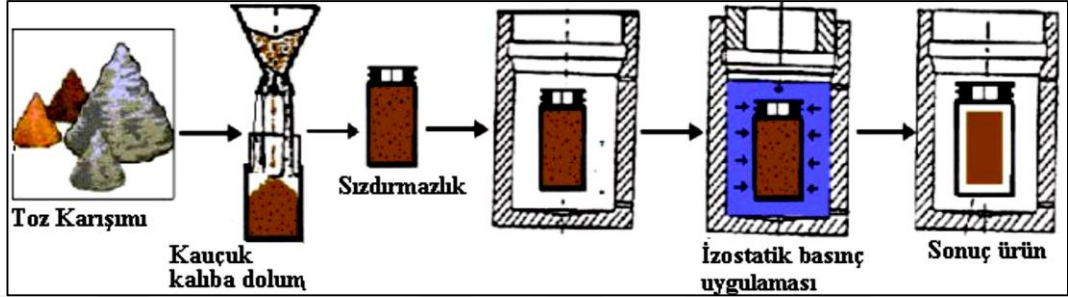


Şekil 4.5. Çift yönlü sıkıştırma.

4.3.3. İzostatik Sıkıştırma

İzostatik sıkıştırma, tozların bir akışkan basıncı ile sıkıştırılmasıdır. Sıkıştırma işlemi oda sıcaklığında yapılıyorsa işleme soğuk izostatik presleme (CIP) adı verilir (Ekşi ve

Sarıtaş, 2002). Soğuk izostatik presleme uygulamasında, tozlar kauçuk bir kalıba doldurularak yağ ile dolu basma hücresine yerleştirilir. Basma pistonu ile basınç uygulandığında, yağ sayesinde kalıbın her yerine eşit baskı uygulanır ve numunenin her tarafı eşit yoğunluğa sahip olur (Aydın, 1997).



Şekil 4.6. Soğuk izostatik presleme işlem adımları.

Hedeflenene yakın bir boyut ve şekil istenen parça üretiminde izostatik presleme uygulanmaktadır. Basma hücresinde yağın yanı sıra su veya gaz ile de basınçlı sistem gerçekleştirilebilmektedir. İzostatik preslemenin avantajları;

- Karmaşık şekilli parçaların preslenme kabiliyetleri
- Pahalı toz girişindeki maliyetin azalması
- Malzeme kaybının az olması
- Preslenmesi zor olan parçaların üretimi
- Presleme sırasında bağlayıcıya ihtiyaç olmaması
- Parçayı son şekil ve boyuta yakın üretme
- Homojen yoğunluk gibi özellikler yer almaktadır (Boz, 2003).

T/M ile parça üretiminde en önemli faktör sıkıştırılabilirliktir. Sıkıştırma 3 aşamada incelenebilir:

- Bu aşama taneciklerin boyut ve şekil gibi fiziksel özelliklerin geniş ölçüde dağılımının yeniden düzenlenme aşamasıdır (Kurt and Davies, 1996). Sıkıştırma basıncının ilk uygulandığı anda plastik deformasyon söz konusu değildir. Bazı partiküllerde kırılmalar olabilir. Bu aşamada partiküller arası boşluk biraz daha azalarak partiküller arasında sürtünme başlar.

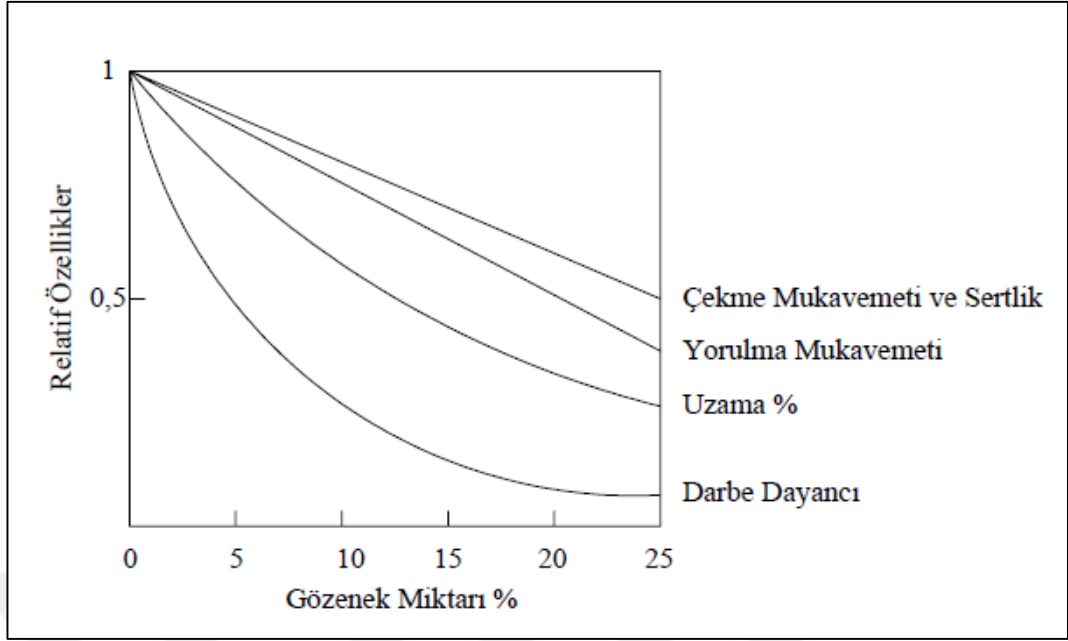
2. İkinci aşamada artık taneciklerde elastik ve plastik deformasyon görülmeye başlanır. Partiküller arasında bağlar oluşabilir ve mekaniksel kilitlenmeler gözlenebilir.
3. En son aşamada ise partiküller kırılır ve plastik deformasyon nedeniyle tanecikler arasındaki boşluk tamamen yok olmuştur. Bu aşamada tanecikler arasında soğuk kaynak görülmektedir.

T/M üretim sürecinde genellikle tek eksenli kalıpta presleme tercih edilir. Bunun nedeni, seri ve hızlı parça üretimidir. Toz taneciklerin saflığı, boyutu ve şekli, sıkıştırılabilirliklerine önemli derecede etki etmektedir.

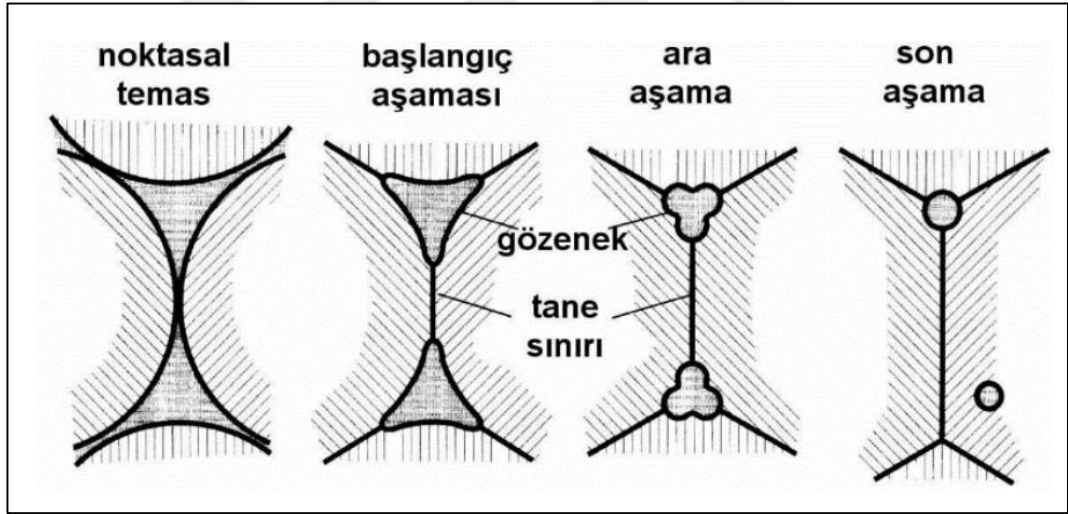
Örneğin, toz taneleri ince ise toz akış hızı ve presleme yoğunluğu düşük olur. Bunun yanı sıra tane boyutu küçük tozlar daha verimli sıkıştırılabilmektedirler. Küresel şekilli tozlar dağınık şekilli tozlara oranla presleme basıncını daha iyi iletirler ve bunun yanı sıra paketlenme özellikleri daha iyidir (Söyler, 2007). Presleme aşamasından sonra sıkıştırılan malzemeye yoğunluk kazandırma amacıyla sinterleme işlemine geçilir.

4.4. TOZLARIN SİNERLENMESİ

Sinterleme birbirine temas eden parçacıkların yüksek sıcaklıklarda ısıtılması sonucu birbirine bağlanmasını sağlar. Parçacıklar arası mekanik bağlar kimyasal nitelik kazanır. Bu bağlanma ergime sıcaklığının altında katı halde atom hareketleriyle de oluşabilir. Fakat birçok durumda sıvı faz oluşumu ile birlikte gerçekleşir. Parçacıklar arası bağlanma mikroyapıda temas eden parçacıklar arasında boyun büyümesi ile kendini gösterir. Bu tür boyun büyümesi ham mukavemete oranla mukavemetin artması ve diğer birçok faydalı özelliğin gelişmesini sağlar. Sinterleme yüksek sıcaklıkta atomların hareketi (yayınma veya difüzyon) ile parçacıkların birleşmesi sonucu serbest parçacıklara göre yüzey enerjisinin azalmasıyla gerçekleşir.



Şekil 4.7. Kalıcı gözeneğin mekanik özelliklere etkisi (TTMD).



Şekil 4.8. Gözenek yapısının değişimi (German, 1984).

4.5. TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN MALZEMELERİN ANALİZİ

Bu kısımda toz metalurjisi ile imal edilen malzemelerin tane büyüklüğü, fazların yapısı vb. mikroyapısal özellikleri; gözenek yapısı ile ilgili özellikler; sertlik, dayanım ve çekme gibi mekanik özellikleri; yüzeyle ilgili korozyon ve aşınma özellikleri ve yoğunlukla ilgili özellikler ele alınacaktır.

4.5.1. Mikroyapısal Özellikler

Bir malzemenin mikroyapısı, malzemeyi oluşturan bileşenlerin düzeni, geometrik oluşumunun kimyasal ve yapısal tabiatı ile tanımlanmakta ve bu şekilde, malzemenin bileşen fazlarını ve ihtiva ettiği kusurları kapsamaktadır. Bir malzemenin mikroyapısı onun özelliklerini önemli ölçüde belirlemektedir. Bir malzemenin bütün potansiyelini kullanabilmek için, sadece malzemenin mikroyapısının oluşumuna katkıda bulunan faktörlerin anlaşılması değil, mikroyapı ve özellikler arasında mevcut olan kalitatif ve kantitatif ilişkilerin anlaşılması da gerekmektedir. Bu, bir taraftan malzeme biliminde bulunan ilişkilerin, diğer taraftan malzemenin üç boyuttaki mikroyapısının anlaşılması gerekmektedir.

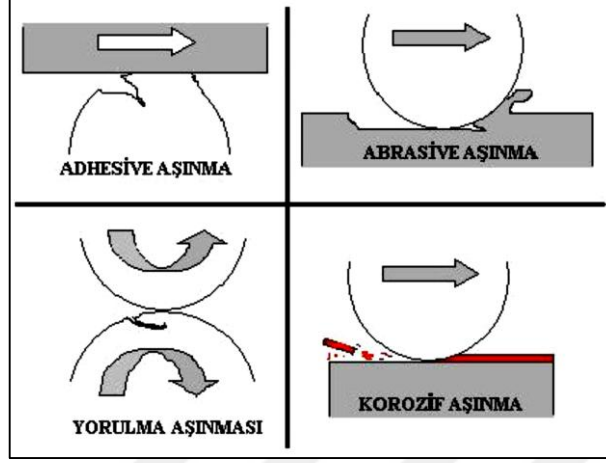
4.5.2. Mekaniksel Özellikler

Belirli bir uygulama alanı için malzeme seçimi o malzemenin mekanik özelliklerine bağlı olduğundan, bu özelliklerin ölçülmesinde kullanılan standart deneyleri tanımak ve bu deneylerden elde edilen sonuçları değişik parametrelere bağlı olarak değerlendirmek büyük önem taşır. Bir malzemenin statik yüklere dayanma kapasitesi çekme ve basma deneyleri ile belirlenir. Kalıcı şekil değiştirmelere karşı direnç hakkında bilgi statik deneyler ile sağlanabilir. Darbe deneyi malzemenin darbe şeklindeki zorlanmalara dayanımını belirlemek için kullanılır. Bu deneyler değişik sıcaklıklarda yapılarak bir malzemenin sünek-gevrek geçiş sıcaklıkları belirlenebilir. Yorulma deneyi ile bir malzemenin değişken ve tekrarlı zorlanmalar altındaki davranışları ve bu etkiler altındaki faydalı ömrü belirlenebilir. Sürünme deneyleri, malzemenin yüksek sıcaklıkta uzun süreli yüklemeler altındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla uygulanır.

4.5.2.1. Aşınma Direnci

Bir malzemenin çizilmeye ve aşınmaya karşı direnci ise sertlik nedeniyle ile belirlenebilir. Genel olarak aşınma, dış etkiler altında temas yüzeylerinde oluşan fiziksel ve kimyasal değişimlerin sonucudur. Dış etkilerin, fiziksel ve kimyasal

değişikliklerinin çokluğu nedeniyle pratikte bir aşınma hali değil birçok aşınma halleri vardır. Bunların başlıcaları Adhesiv, abrasiv, yorulma ve korozif aşınmalardır.



Şekil 4.9. Aşınma tiplerinin şematik gösterimi (Yıldız, 2006).

Adhesiv aşınma (adhezyon aşınması) makine elemanlarında görülen en yaygın aşınma türüdür. Bu aşınmanın temel esası kaynak bağı teorisi ile açıklanabilir. Özellikle kayma sürtünmesi yapan ve metalografik yapıları benzeyen metallerin kaynaklaşmasıdır. Çok iyi parlatılmış yüzeylerin bile çok küçükte olsa bazı bölgeleri birbirine temas eder. Yüzeyde bulunan bu oksit tabakası parçalanarak aşınma çiftinde soğuk kaynaşma meydana gelir. Kayma hareketi esnasında bu noktalar kesilerek kopman başlar ve kopan partiküller yüzeyde çizilmelere yani aşınmaya sebep olur (Levent, 2005).

Abrasiv aşınma çizilme aşınması olarak bilinen, birbirine göre izafi hareket yapan iki cisim temas yüzeyleri arasına ortamdan kaynaklanan yabancı sert parçacıkların girmesiyle ortaya çıkan, aşındırdığı yüzeyde çizikler ve kesikler şeklinde hasara sebebiyet veren bir aşınma türüdür. Yabancı katı parçacıklar, nispeten yüzey sertliği daha düşük olan yüzeye gömülürler. Daha sonra bu parçacıklar sert yüzeyden sanki eğelercesine veya zımparalarcasına malzeme kaldırır. Sert parçacıklar gömüldükleri yüzeyde de tahribat yaparlar. Bu aşınma zamanla o kadar hızlanır ki kısa sürede makine elemanları yüzeyinde hareket yönünde malzeme kaybından ötürü büyük çizikler ve oyuklar oluşur. Aşınma sonucu kopan parçalar da bu mekanizmaya dahil olurlar ve kısa sürede makine elemanları fonksiyonunu yitirir.

İki parça arasındaki temasın tekrar edilen dönüşleri, aşınma parçalarının meydana gelmesi açısından adhesive ve abrasive aşınma için gerekli olmamaktadır. Fakat burada, aşınma parçalarının meydana gelmesi için esas olan temas, tekrarlarının belirli bir miktarının olduğu yerlerdeki aşınmanın diğer durumları mevcuttur. Bu şekildeki temas dönüşleri sonrası meydana gelen aşınma, yorulma aşınması olarak adlandırılmaktadır (Yıldız, 2006).

Korozif aşınma; korozif ortamda çizilerek veya yapışarak aşınmanın çok daha hızlı bir şekilde oluşmasıdır. İstenmediği halde kimyasal veya elektrokimyasal etki sonucu yüzey üzerinde başlayan malzeme değişimi korozyon olarak tanımlanabilir. Burada metallerin çoğu, korozyon etkisiyle kararlı hallerinden değişmeye zorlanır. Bu aşınma türü en tehlikeli tiptir (Yıldız, 2006).

4.5.3. Yüzeyle İlgili Özellikler

Malzemelerin yüzeyle ilgili özellikleri arasında korozyon ve oksitlenme gibi durumlar söz konusudur. TM yöntemiyle üretilen malzemelerde gözeneklilik miktarının fazla olması durumunda bu gözeneklerde biriken akışkan sebebiyle korozyon daha hızlı gerçekleşebilir. Fakat uygun sinterleme şartlarında üretilen malzemeler daha yüksek çevre direnci göstermektedir.

BÖLÜM 5

DENEYSEL METOD

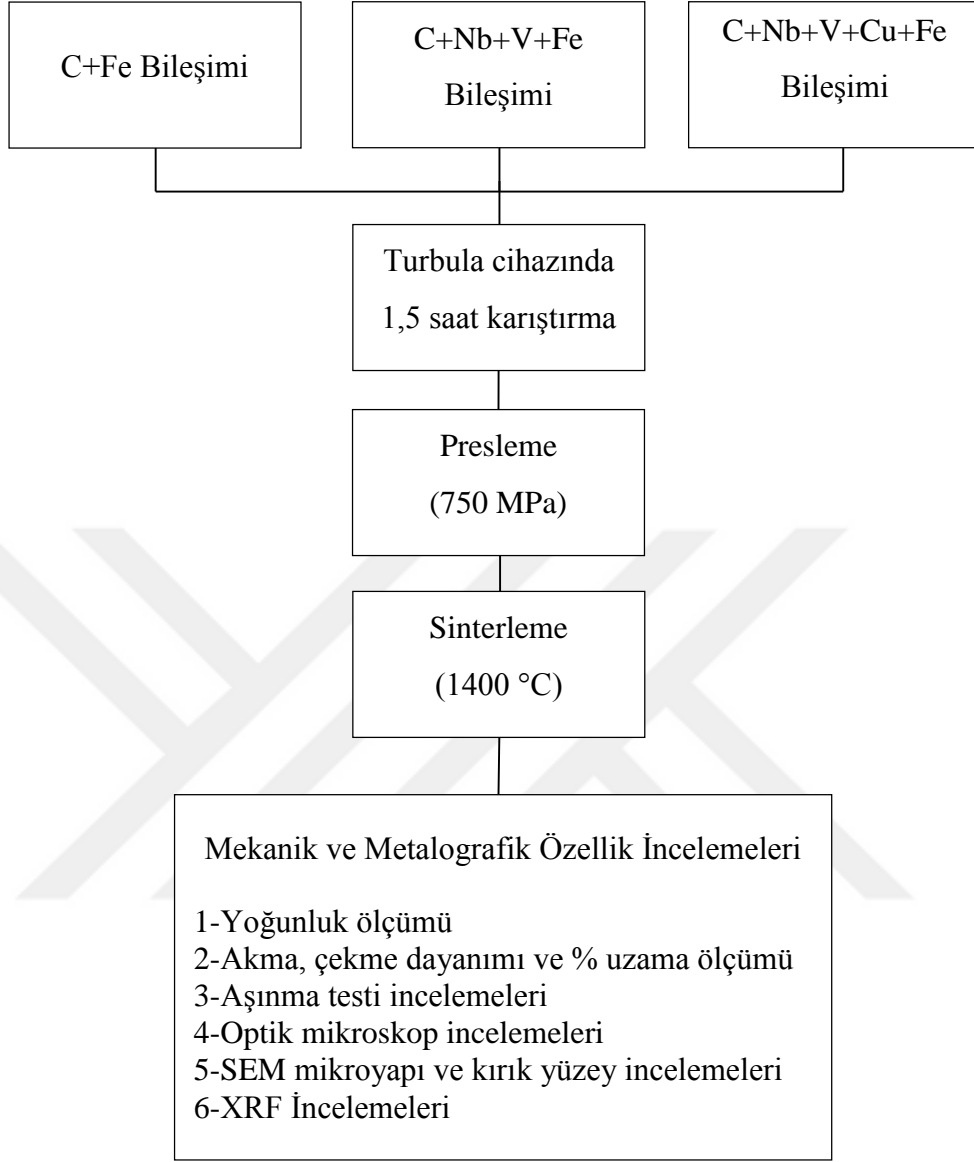
5.1. GİRİŞ

Bu çalışmada, çelik numuneler toz metalurjisi yöntemi ile istenilen bileşimlerde imal edilmişlerdir. Farklı oranlarda eklenen mikroalaşım element miktarının ve sinterleme sıcaklığının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır.

Bölüm 5.2’de deneysel çalışmada izlenen işlem basamakları, bölüm 5.3’de deneysel çalışma ortamının hazırlanışı, bölüm 5.4’te deneysel çalışma için gerekli olan tozların temini, bölüm 5.5’te tozların karıştırılması ve preslenmesi işlemleri, bölüm 5.6’da sinterleme aşaması, bölüm 5.7’de sertlik ölçümleri ve çekme testinin uygulanışı, bölüm 5.8’de aşınma testi, bölüm 5.9’de optik mikroskop ve SEM görüntüleri incelemeleri, bölüm 5.10’de yoğunluk, gözeneklilik, ferrit-perlit oranı ölçümleri, bölüm 5.11’de XRF incelemeleri açıklanmıştır. Çekme testleri Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Mekanik Laboratuvarında yapılmıştır. SEM, XRF ve aşınma deneyleri Karabük Üniversitesi, Demir-Çelik Enstitüsü, Margem laboratuvarlarında yapılmıştır. Optik mikroskop incelemeleri ise Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Malzeme Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

5.2. DENEYSEL ÇALIŞMADA İZLENEN İŞLEM BASAMAKLARI

Deneysel çalışmada izlenen işlem basamakları Şekil 5.1’de görülmektedir. Şekil 5.1’de olduğu gibi ilk olarak tozların temini, karıştırılması, preslenmesi ve daha sonra sinterlenmesi işlemleri gerçekleştirilmektedir. Çalışma daha sonra ise mekanik testlerin yapılması ve mikroyapı incelemelerinin gerçekleştirilmesini kapsamaktadır.



Şekil 5.1. Deneysel çalışmada izlenen işlem basamakları.

5.3. DENEYSEL ÇALIŞMA ORTAMININ HAZIRLANMASI

Tozların tartılması ve üretimi yapılan numunelerin yoğunluk ölçümlerinin yapılması için RADWAG AS-60-220 C/2 hassas terazi ve RADWAG AS yoğunluk ölçme kiti kullanılmıştır. Tozların istenilen bileşimde homojen olarak karıştırılması için Willy A. Bachofen AG T2F marka turbula mixer cihazı kullanılmıştır. Tozların preslenmesi için ise 100 Ton kapasiteli HİDROLİKSAN marka hidrolik tek pistonlu pres kullanılmıştır.

Ayrıca sintereleme işlemi için maksimum çalışma sıcaklığı 1600 °C olan Protherm PTF 16/75/610 marka atmosfer kontrollü tüp fırından yararlanılmıştır.

5.4. DENEYSEL ÇALIŞMA İÇİN GEREKLİ OLAN TOZLARIN TEMİNİ

Mikroalaşımli çelik üretimi için gerekli olan tozların temini yapılmış olup, özellikleri ve temin edilen firmaların isimleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Tozlar ve özellikleri

Elementel Tozlar	Toz Boyutu (µm)	% Saflık Değeri	Temin Edilen Firma
Demir	<150	99,9	Sintek
Karbon	10-20	96,5	Sintek
Niyobyum	<45	99,8	Aldrich
Vanadyum	44	99,5	Aldrich
Bakır	<75	99	Aldrich

Çizelge 5.1’de belirtilen tozlar, Bölüm 5.5’de verilen kimyasal bileşimlerde karıştırılarak alaşımli çelik ve mikroalaşımli çelik üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen numuneler için çekme testi, aşınma testi, korozyon testi, yorulma deneyi uygulanmış; mikroyapıları incelenmiş; yoğunluk ve gözeneklilik, ferrit-perlit oranı ve ortalama tane boyutu hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

5.5. TOZLARIN KARIŞTIRILMASI VE SIKIŞTIRILMASI

Karıştırma işlemi öncesinde tozlar Çizelge 5.2.’de kimyasal kompozisyonu verilen oranlarda RADWAG AS-60-220 C/2 marka hassas terazi ile 0.0001 hassasiyetinde tartılmıştır. Tartımı yapılan tozlar Turbula marka üç eksenli karıştırıcı ile 1,5 saat süreyle bilyesiz olarak karıştırılmıştır.

Çizelge 5.2. Mikroalaşımli TM çeliklerin kimyasal kompozisyonları.

Bileşen	Karbon (%ağ.)	Niyobyum (%ağ.)	Vanadyum (%ağ.)	Bakır (%ağ.)	Demir (%ağ.)
Alaşım 1	0,45	-	-	-	Geri Kalanı
Alaşım 2	0,45	0,075	0,075	-	Geri Kalanı
Alaşım 3	0,45	0,075	0,075	0,5	Geri Kalanı
Alaşım 4	0,45	0,075	0,075	5	Geri Kalanı
Alaşım 5	0,45	0,075	0,075	10	Geri Kalanı
Alaşım 6	0,45	0,075	0,075	15	Geri Kalanı

Erden (2016) yaptığı çalışmada mikroalaşım elementlerinden ağırlıkça sabit oranda (%0-0,05-0,075 ve 0,1) vanadyum ve niyobyum elementi ilave ettiği çalışmasında en yüksek mekanik özellikleri ağırlıkça %0,075 kullandığı alaşımda elde etmiştir. Tane boyutunun küçülmesi ve perlit miktarının artışı gözlemlenmiş, bunları da mikroalaşım elementlerinin karbür ve nitrür yapıcı özelliğine bağlamıştır. Bu çalışmada bakırın etkisi araştırıldığı için mikroalaşım elementlerinin miktarları Erden'in çalışmasından yola çıkarak baz alınmıştır.

Yine Erden (2016) karıştırma süresi ile alakalı olan çalışmasında tozları 1,5 saat süreyle karıştırdığında en yüksek akma ve çekme dayanımı değerlerine ulaşmıştır. Karıştırma süresinin daha da artmasının mekanik özellikleri etkilemediğini belirten Erden'in bu çalışmasından dolayı bu çalışmada da karıştırma süresi 1,5 saat tutulmuştur.

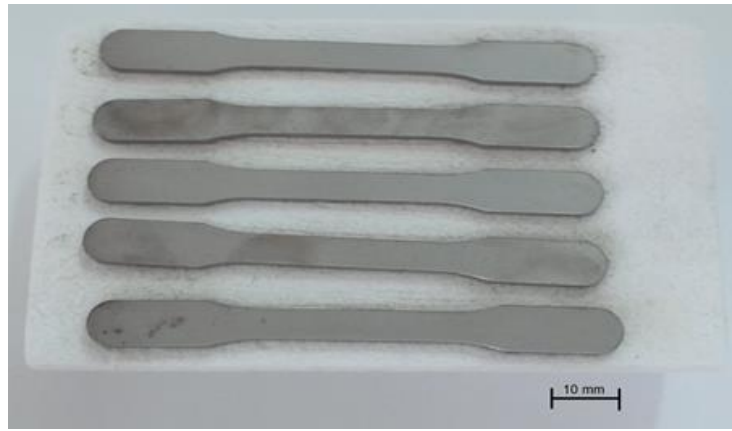
Hazırlanan karışım tozların preslenmesi 100 Ton basma kapasiteli Hidroliksan marka preste 750 MPa presleme basıncında çekme numunesi şeklinde ve tek yönlü olarak yapılmıştır. Çekme deney numune boyutları ASTM (E8M) toz metal malzeme standartlarına uygun olarak hazırlanan kalıp ile sıkıştırılarak bütün haline getirilmiştir.

Erden (2017) diğer bir çalışmasında ise toz metalurjisinde presleme basıncının etkisini araştırmıştır. Yaptığı çalışma sonucunda 750 MPa basınç altında preslediği numunelerin en yüksek akma ve çekme dayanımına sahip olduğunu gözlemiştir. Bunun nedenini malzemelerin yoğunluğunun artmasıyla ilişkilendirmiştir. Bunun

üzerindeki presleme basınçlarının malzemelere dayanım artışı sağlamadığını ayrıca yüksek basınçların kalıba zarar vereceğini belirtmiştir.



Şekil 5.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan a) hassas terazi, b) hidrolik pres ve c) turbula cihazı görüntüleri.



Şekil 5.3. Soğuk preslenmiş çekme numunelerinin görüntüsü.

5.6. SİNERLEME İŞLEMLERİ

Üretilen numunelerin sinterleme işlemleri argon atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemi Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği, Mekanik Metalürji laboratuvarında bulunan maksimum sıcaklığı 1600 °C olan Protherm PTF 16/75/610 marka atmosfer kontrollü boru fırında yapılmıştır. Çizelge 5.2.'de belirtilen bileşimdeki numuneler 1400 °C'de sinterlenmiştir. Sinterleme işlemi numunelerin sinterleme sıcaklığına 5 °C/dak. hızla ısıtılması ile başlanmıştır. Sıcaklık sinterleme sıcaklığına ulaştıktan sonra numuneler bu sıcaklıkta 1 saat bekletilip ardından oda sıcaklığına yine 5 °C/dak. hızla soğutulmuştur. Şekil 5.4 atmosfer kontrollü fırını göstermektedir.

Özdemirler ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada sinterleme sıcaklığının NbC ilave edilen TM çelikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak 1400 °C sıcaklıkta sinterlenen numunelerin daha iyi mekanik özellikler sergilediğini gözlemlemişlerdir. Bunun sebebini ise malzemelerin yoğunluklarının ve perlit miktarının artışıyla açıklamışlardır.



Şekil 5.4. Deneysel çalışmalarda kullanılan atmosfer kontrollü fırın.

5.7. NUMUNELERE SERTLİK ÖLÇÜMLERİ VE ÇEKME DENEYİNİN UYGULANMASI

Sertlik ölçümleri alaşımsız ve mikroalaşımlı bütün numuneler için uygulanmıştır. Numunelerin yüzeyleri Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekanik Laboratuvarında bulunan PRESİ MECAPOL P262 marka cihaz ile zımparalanmış ve ardından hazır hale getirilmiştir. Yüzeyleri hazırlanan numunelerin sertlik ölçümleri SHIMADZU marka sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Sertlik ölçümleri HV₁ (1 kg) yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numuneden 5 adet sertlik ölçümünün ortalaması alınarak sertlik değeri belirlenmiştir.

Sinterlenen çekme numuneleri 1 mm/dak. çekme hızında çekme deneyi uygulanarak koparılmıştır. Her deney sonrasında gerilme-%gerinim diyagramları elde edilmiştir. Bu diyagramlardan numunelerin akma dayanımı (%0,2) çekme dayanımı ve % uzama değerleri hesaplanarak alaşım miktarındaki değişimden dolayı mekanik özelliklerdeki farklılık tespit edilmiştir.

5.8. AŞINMA TESTİ İNCELEMELERİ

Aşınma testi incelemeleri, Karabük Üniversitesi, Demir-Çelik Enstitüsü, MARGEM Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. 1400 °C’de sinterlenen, 800 mesh zımparaya kadar yüzeyi zımparalanan TM numunelere UTS-10 Tribometer test cihazında Reciprocating Wear Test (ileri-geri tip aşınma testi) uygulanmıştır. Aşınma testini uygulamak için AISI 52100 malzeme çelik bilye kullanıldı ve strok mesafesi 10 mm tutuldu. Toplam alınan yol ise 1000 metre’dir. Uygulanan yükler 15 N ve 30N, kayma hızı ise 72 mm/sn. olarak belirlendi. Her aşınma testi sonrasında malzemeler etanol ile temizlenerek, 0,1 mg hassasiyetli terazide ağırlık değişimleri ölçülmüştür. Cihaza ait yazılım programı ile aşınma derinlikleri, sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti hesaplandı. Daha sonra TM çelik numunelerin aşınma yüzeyleri SEM’de incelenmiştir.

5.9. OPTİK MİKROSKOP VE SEM İNCELEMERİ

Mikroyapı incelemeleri, Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalografi laboratuvarında bulunan X50-X500 büyütme kapasiteli Nikon Epiphot 200 marka optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir. Her numunenin değişik bölgelerinden farklı büyütmelemlerde görüntüler alınmış ve bu görüntülerin bütün mikroyapıyı temsil edebilir nitelikte olmasına dikkat edilmiştir. SEM incelemeleri ise Karabük Üniversitesi, Demir-Çelik Enstitüsü, MARGEM Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

5.9.1. Metalografik İncelemelerde Kullanılan Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada argon atmosferinde sinterlenmiş numunelerin mikroyapısını incelemek için optik mikroskop kullanılmıştır. Farklı bileşime sahip mikroalaşımli sinterlenmiş numuneler polisaj cihazı ile sırasıyla 120, 240, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2500 meshlik SiC zımparayla yüzeydeki pürüzler yok edilinceye kadar zımparalanmıştır. Bu yüzeyler alümina aşındırıcısıyla parlatılarak dağlamaya hazır hale getirilmiştir. Dağlama öncesinde numunelerin parlatılmasında kullanılan kimyasal kalıntıları ortadan kaldırmak için ultrasonik temizleyici ile 30 dakika temizleme işlemi yapılmıştır.

5.9.2. Dağlayıcıların Hazırlanması Ve Dağlama İşleminin Yapılması

Metalografik incelemeler için parlatılan ve dağlamaya hazır hale getirilen numunelere methanol içerisinde %2 nitrik asit karıştırılarak elde edilen nital çözeltisi hazırlanmıştır. Dağlama işlemi, numunelerin nital çözeltisi içerisinde daldırılarak 3-5 saniye bekletilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemi tamamlandıktan sonra dağlanan yüzeyler alkol ile temizlenip kurutulmuş ve ardından optik mikroskopta incelemeye hazır hale getirilmiştir.

5.10. YOĞUNLUK, GÖZENEKLİLİK, FERRİT-PERLİT ORANI ÖLÇÜMLERİ

Numunelerin yoğunluk ölçümleri, Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında bulunan RADWAG AS-60-220 C/2 marka hassas terazide RADWAG AS yoğunluk ölçüm kiti ile Archimets prensibine göre yapılmıştır.

Üretilen malzemelerin gözenek oranının belirlenmesinde aşağıdaki Eşitlik 5.1.'de verilen formül kullanılmıştır.

$$\% \text{Gözeneklilik} = \frac{q_{\text{teorik}} - q_{\text{deneysel}}}{q_{\text{teorik}}} \times 100 \quad (5.1)$$

Burada; q_{teorik} : Teorik yoğunluk (gr/cm^3)

q_{deneysel} : Deneysel yoğunluk (gr/cm^3) şeklindedir.

Numunelerin teorik yoğunlukları ise, aşağıda belirtilen karışım kuralı esasına göre hesaplanmıştır;

[Fe - % 0,45 C için]; Karışımın teorik yoğunluğu= [C'nin yoğunluğu x 0,45] + [Fe'in yoğunluğu x 99,55]

[Fe - % 0,45 C - %0,075 Nb - %0,075 V için]; Karışımın teorik yoğunluğu= [C'nin yoğunluğu x 0,45] + [Fe'in yoğunluğu x 99,4] + [Nb'un yoğunluğu x 0,075] + [V'un yoğunluğu x 0,075]

[Fe - % 0,45 C - %0,075 Nb - %0,075 V - %0,5 Cu için]; Karışımın teorik yoğunluğu= [C'nin yoğunluğu x 0,45] + [Fe'in yoğunluğu x 98,9] + [Nb'un yoğunluğu x 0,075] + [V'un yoğunluğu x 0,075] + [Cu'ın yoğunluğu x 0,5]

[Fe - % 0,45 C - %0,075 Nb - %0,075 V - %5 Cu için]; Karışımın teorik yoğunluğu= [C'nin yoğunluğu x 0,45] + [Fe'in yoğunluğu x 94,4] + [Nb'un yoğunluğu x 0,075] + [V'un yoğunluğu x 0,075] + [Cu'ın yoğunluğu x 5]

[Fe - % 0,45 C - %0,075 Nb - %0,075 V – %10 Cu için]; Karışımın teorik yoğunluğu=
[C'nin yoğunluğu x 0,45] + [Fe'in yoğunluğu x 89,4] + [Nb'un yoğunluğu x 0,075] +
[V'un yoğunluğu x 0,075] + [Cu'ın yoğunluğu x 10]

[Fe - % 0,45 C - %0,075 Nb - %0,075 V – %15 Cu için]; Karışımın teorik yoğunluğu=
[C'nin yoğunluğu x 0,45] + [Fe'in yoğunluğu x 84,4] + [Nb'un yoğunluğu x 0,075] +
[V'un yoğunluğu x 0,075] + [Cu'ın yoğunluğu x 15]

5.11. XRF İNCELEMELERİ

XRF incelemeleri Karabük Üniversitesi, Demir-Çelik Enstitüsü, MARGEM Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. XRF spektroskopisi farklı kimyasal bileşimlerde üretilen mikroalaşımli TM çeliklerin elementel kompozisyonunu belirlemek için kullanılmıştır. Bu yöntem ile amaçlanan ve elde edilen kimyasal bileşim değerleri karşılaştırılmıştır.

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

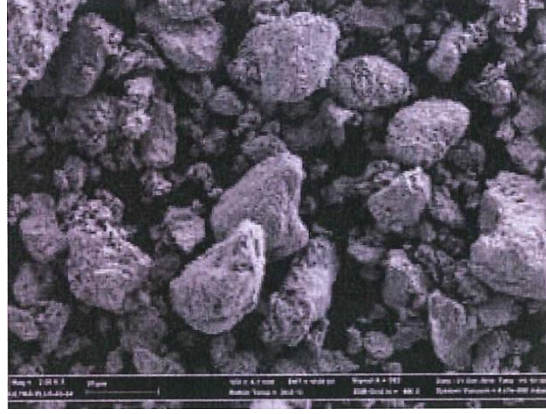
6.1. GİRİŞ

Bu bölüm farklı kompozisyonlarda üretilmiş, argon atmosferinde sinterlenmiş olan alaşımsız ve mikroalaşımlı numunelerin deneysel sonuçlarını ve bu sonuçların değerlendirilmesini içermektedir. Bölüm 6.2’de deneysel çalışmalarda kullanılan tozların karakterizasyonu analiz edilirken Bölüm 6.3’de TM numunelerin mikroyapı görüntüleri, ferrit ve perlit oranı, gözeneklilik oranı, yoğunluk sonuçları ayrıca mikroyapılara ait SEM ve EDS analizleri verilerek değerlendirilmiştir. Bölüm 6.4’te 1400 °C’de sinterlenmiş olan alaşımsız çelik ve ağırlıkça %0-0,5-5-10 ve %15 bakır içeren mikroalaşımlı çelik numunelerin mekanik test sonuçları değerlendirilmiştir. İlk alt başlığında sertlik ve çekme sonuçları verilerek tartışılmış ayrıca çekme testi sonucu numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelenmiştir. Diğer alt başlıkta ise aşınma testi sonuçları tartışılmış ve yine SEM ve EDS analizleri incelenmiştir. Üretilen çeliklere ait XRF sonuçları Bölüm 6.5’te açıklanmaktadır.

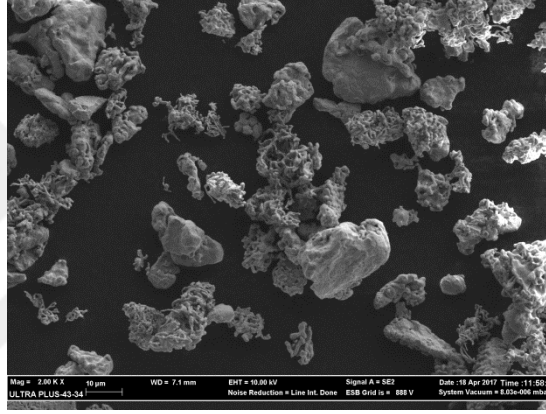
6.2. TOZ KARAKTERİZASYONU

1400 °C’de sinterlenmiş olan çelik numunelerin üretiminde kullanılan tozların X2000 büyütme oranlarında tozların genelini yansıtan alansal bir kesiti göstermektedir.

Matris olarak kullanılan demir tozlar Şekil 6.1’de görüldüğü gibi çoğunlukla düzensiz şekillidir. Takviye elemanı olarak kullanılan karbon, niyobyum, vanadyum ve bakır tozları birbirine benzer şekilde Şekil 6.2-6.5’de görüldüğü gibi genel olarak keskin köşeli ve düzensiz bir geometriye sahiptir. Ayrıca, toz boyutları ve saflık yüzdeleri Çizelge 6.1’de verilmektedir.



Şekil 6.4. Vanadyum tozunun X2000 büyütülmüş SEM görüntüsü.



Şekil 6.5. Bakır tozunun X2000 büyütülmüş SEM görüntüsü.

Çizelge 6.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan tozların boyut ve % saflık değerleri.

Tozlar	C	Fe	V	Nb	Cu
Toz Boyutu (µm)	10-20	<150	44	<45	<75
Saflık Değeri (%)	96,5	99,9	99,5	99,8	99

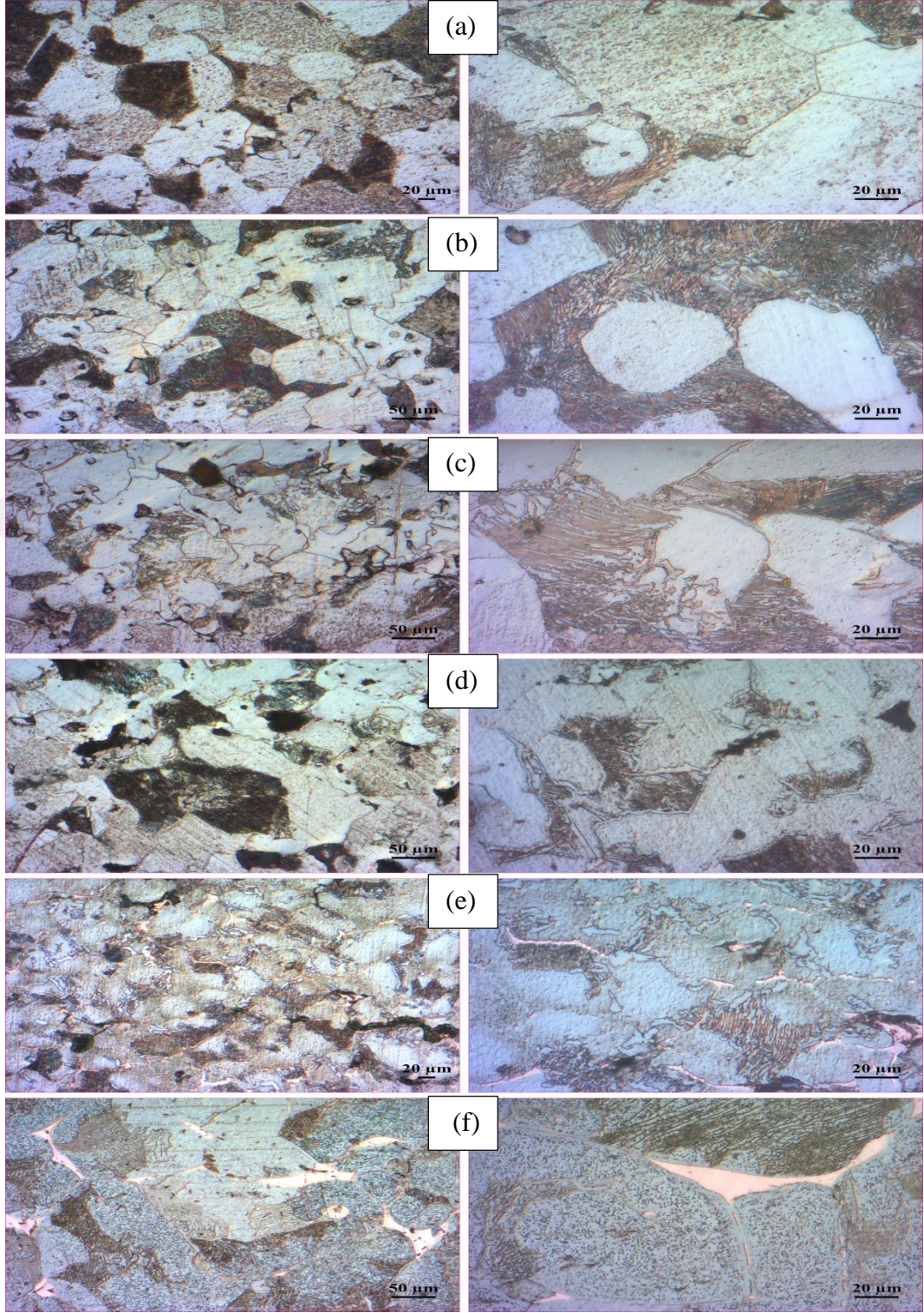
Deneysel çalışmada kullanılan tozlar öğütme veya atomize edilmek suretiyle küçük parçacık boyutlarına getirilerek elde edilmiştir. Demir tozu su atomize yöntemiyle üretilmiştir. Hidrojenle indirgeme ve öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 6.1.'de demir tozunun X2000 büyütülmüş SEM görüntüsü incelendiğinde topaklanma ve uydulaşma görülmektedir. Şekil 6.2'de ise deneysel çalışmalarda kullanılan karbon tozlarının puslu şekilde olduğu görülmüştür.

Şekil 6.3, 6.4 ve Şekil 6.5’de SEM görüntüsü verilen niyobyum, vanadyum ve bakır tozları hidrürleme, öğütme ve vakum altında hidrojeni giderme işlemi sonucu köşeli parçacık şeklini almıştır. Vanadyum ve niyobyum hidrojene maruz kaldığında gevrekleşir ve öğütme sonrası, hidrojen malzemedan uzaklaştırılabilir.

6.3. MİKROYAPI SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

1400 °C’de argon ortamında sinterlenmiş TM alaşımsız ve mikroalaşımli çelik numunelerin mikroyapı resimleri Şekil 6.6’da gösterilmiştir.





Şekil 6.6. TM yöntemiyle üretilen alaşımsız ve mikroalaşımlı çeliklerin optik mikroskop görüntüleri (a- Alaşım 1, b- Alaşım 2, c- Alaşım 3, d- Alaşım 4, e- Alaşım 5, f- Alaşım 6).

Çizelge 6.2. 1400 °C’de sinterlenen TM çelik numunelerin %yoğunluk, %gözeneklilik, %perlit ve ortalama tane boyutu değerleri.

Bileşen	Teorik Yoğunluk (gr/cm ³)	Sinter Sonrası Yoğunluk (gr/cm ³)	Yoğunluk (%)	Gözeneklilik (%)	Perlit (%)	Tane Boyutu (µm)
Alaşım 1	7,8348	7,2701	93,7	6,3	22,9	34,5
Alaşım 2	7,8339	7,2732	93,4	6,6	24,7	30,2
Alaşım 3	7,8394	7,2084	91,95	8,05	26,7	24,1
Alaşım 4	7,8889	7,0799	89,75	10,25	38,8	22,5
Alaşım 5	7,9411	6,9114	87,02	12,98	42,2	21,1
Alaşım 6	7,9989	6,8137	85,21	14,79	28,3	26,9

TM yöntemiyle üretimi yapılan alaşımsız çelik ve ağırlıkça farklı % oranlarda bakır ilave edilmiş mikroalaşımli çeliklerin mikroyapı resimleri (Şekil 6.6) incelendiğinde yapıların ferrit ve perlit fazlarından oluştuğu görülmektedir. Bakır miktarının artması ile sıvı faz oranı artmış ve taneler arası metalurjik bağ sağlamlaşarak üretilen malzemelerin mukavemeti artış göstermiştir. Ayrıca bakır ilavesinin artışıyla perlit miktarında da artış görülmüştür. Kılınç yaptığı çalışmasında (2009), bakır ilavesiyle malzemenin yapısının tamamen perlitte dönüştüğünü gözlemlemiştir. Nitekim Çizelge 6.2’de de görüldüğü üzere ağırlıkça %10 Cu ilavesi içeren Alaşım 5’e kadar perlit miktarında artış gözlenirken ağırlıkça %15 Cu ilave edilen Alaşım 6’da ise perlit miktarında bir düşüş gözlenmiştir. Bunun nedeni olarakta Şekil 6.6(f)’de de görüldüğü üzere ağırlıkça %15 Cu ilavesi sonucu bakır elementi tane sınırlarında aşırı bir şekilde yığılarak perlit miktarında düşüşe sebebiyet vermiştir. Ayrıca tane inceltici özelliğe sahip olan bakır tane sınırlarında aşırı şekilde yığılması sonucu tane inceltici etkisi azalarak ağırlık olarak %15 Cu ilavesiyle Alaşım 6’da tane büyümesi gözlenmiştir.

Çizelge 6.2’de alaşımsız çelik ile Nb-V içeren mikroalaşımli çeliğin tane boyutu miktarları karşılaştırıldığında ise mikroalaşım elementleri bulunan Alaşım 2’nin daha ince taneli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bunun sebebi sinterleme sırasında NbC, NbN, NbCN, VC, VN ve VCN gibi mikroalaşım elementlerinin çökelti oluşturarak

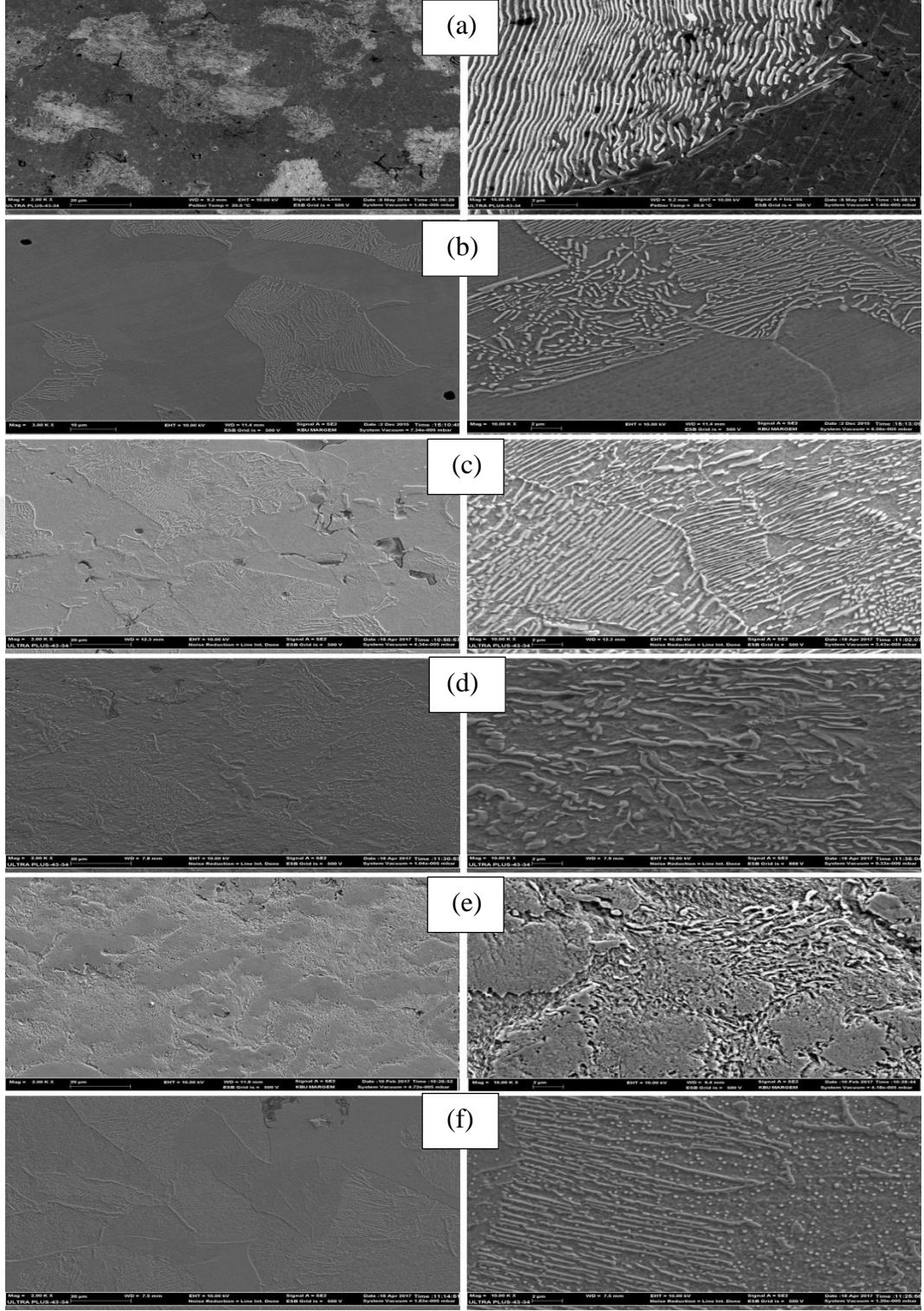
östenit tanelerinin büyümesini engellemesidir. Nitekim Özdemir vd. (2016) ve Gündüz vd. (2016) yaptıkları çalışmalarda Nb, V ve Ti gibi mikroalaşım elementi ilave ederek TM çelik üretimi gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar incelendiğinde mikroalaşım elementi ilavesi ile üretilen malzemelerin akma, çekme ve sertlik dayanımlarında artış, tane boyutunda düşüş gözlenmiştir. Bunun sebebinin sinterleme sırasında ve sonrasında oluşan NbCN, VCN ve AlN gibi mikroalaşım elementlerinin oluşturduğu çökeltilerin östenit tanelerinin büyümesini engellemesi olarak ifade etmektedirler. Ayrıca oluşan bu çökeltilerin çökelti sertleşmesi, dispersiyon sertleşmesi ve tane boyutu küçültme mekanizmaları ile dayanım artışına neden olduğu ifade edilmiştir. Bakır ilavesi yapılan Alaşım 3-4-5'de ise ağırlıkça % Cu miktarı arttıkça tane sınırlarına ve tane içerisine çökerek yerleştiği görülmüş ve Nb-V mikroalaşım çeliğine göre tane büyümesini daha da engellemiştir. Böylelikle de tane boyutu küçültme mekanizmasıyla dayanım artışına katkı sağlamıştır. Ağırlıkça %15 Cu ilavesi yapılan Alaşım 6'da ise bakırın yoğun olarak tane sınırlarına ve gözeneklere yayıldığı gözlemlenmiş ve bunun sonucu olarak tane boyutunu artırarak dayanım düşüşüne sebep olduğu düşünülmektedir. Nitekim Özdemirler vd. yaptıkları çalışmada NbC oranının ağırlık olarak %0,2'den %2'ye çıkması ile ortalama tane boyutunun bir miktar arttığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarakta büyük NbC çökeltilerinin tane sınırlarında oluşması olarak ifade edilmiştir (Özdemirler vd., 2016).

Özgün yaptığı çalışmada (2007), bakırın, sıvı faz sinterlemesini sağlayan bir element olup, toz içerisine ilave edildiğinde malzemenin sinterleme ve mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediğini gözlemlenmiştir. Bakır oluşturduğu sıvı faz ile gözenekleri doldurmakta ve taneler arası bağı kuvvetlendirerek alaşımli TM çelik malzemelerin sertlik ve çekme dayanımlarının artmasını sağlamaktadır. Özgün yine aynı çalışmasında (2007), bakırın sağladığı bu olumlu etkiye rağmen malzemenin içerisine belli bir değer üzerinde ilave edildiğinde, sinterleme esnasında genleştiğinden dolayı, yoğunluk değerinin düşük olmasına neden olduğunu da eklemiştir. Çizelge 6.2'ye bakıldığında ağırlık olarak % Cu miktarının artması ile üretilen TM çelik numunelerin yoğunluklarının düştüğü gözlenmiştir. Sonuçlar Özgün (2007)'ün çalışması ile uyumluluk göstermektedir.

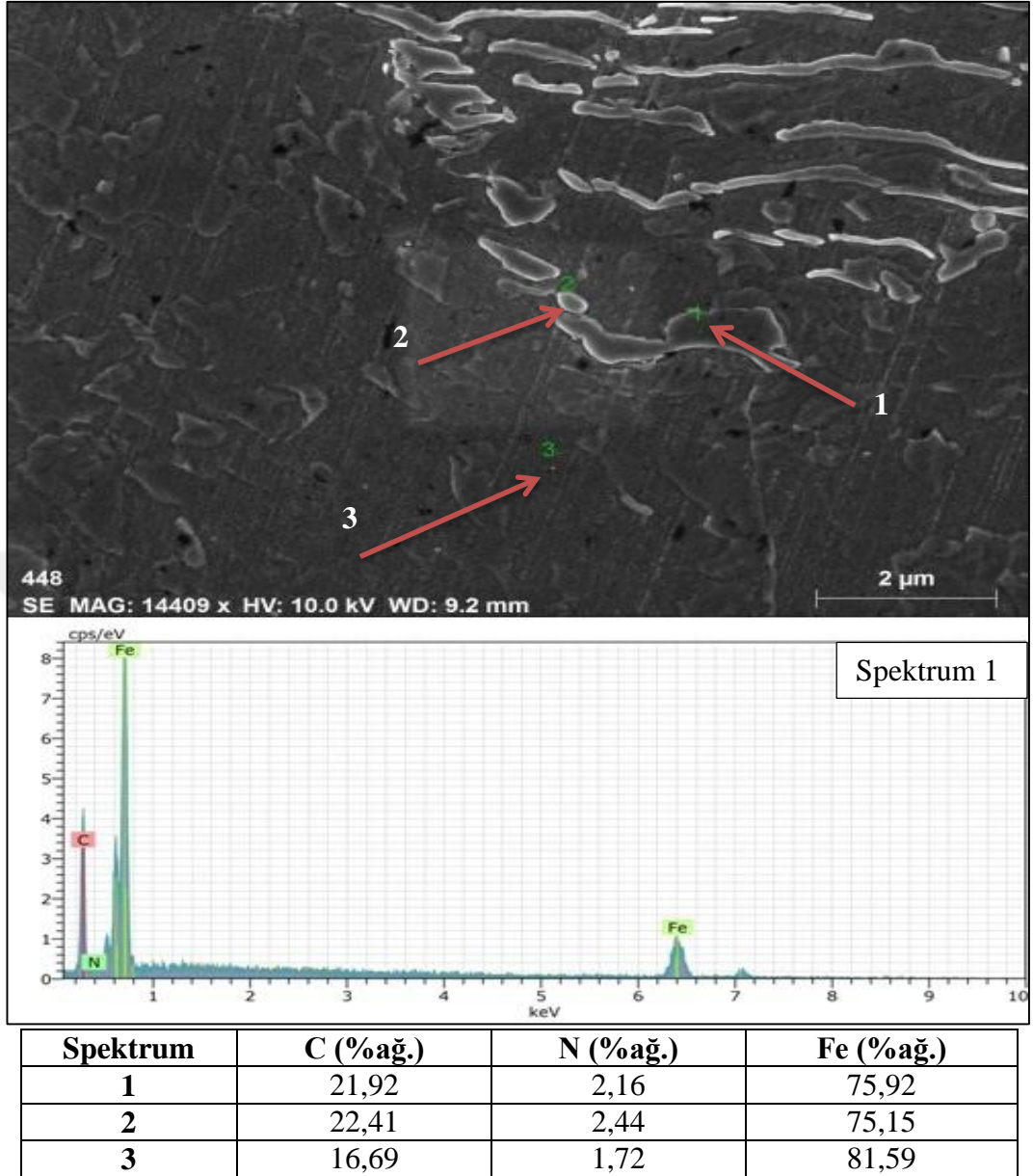
TM yöntemiyle üretilen 1400 °C'de sinterlenmiş alaşımsız ve bakır ilaveli mikroalaşımli çelik numunelerin SEM mikroyapı resimleri ve EDS analiz sonuçları

Şekil 6.7-10'da görülmektedir. Şekil 6.8'te verilen alaşımsız çelik numunenin SEM görüntüsünden farklı boyutlara sahip çökeltilerin meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca nokta EDS analiz sonuçları bu çökeltilerin demir ve karbon içermesinden dolayı da Fe_3C çökeltilerinin meydana geldiğini göstermektedir. Nb-V ve farklı % ağırlık miktarlarında Cu içeren mikroalaşımli çelikler incelendiğinde ise niyobyumun ve vanadyumun çelik içerisinde bulunması ile NbC, NbN, NbCN, VC, VN ve VCN çökeltilerinin oluştuğu yine SEM ve EDS incelemeleri ile tespit edilmiştir. Oluşan bu çökeltilerin bir önceki bölümde detaylı olarak tartışıldığı gibi östenit tane büyümesini sınırlandırdığı ve ayrıca çökelti sertleşmesi ile malzemenin dayanımını artırdığı belirtilmiştir (Kostychev vd., 2014).



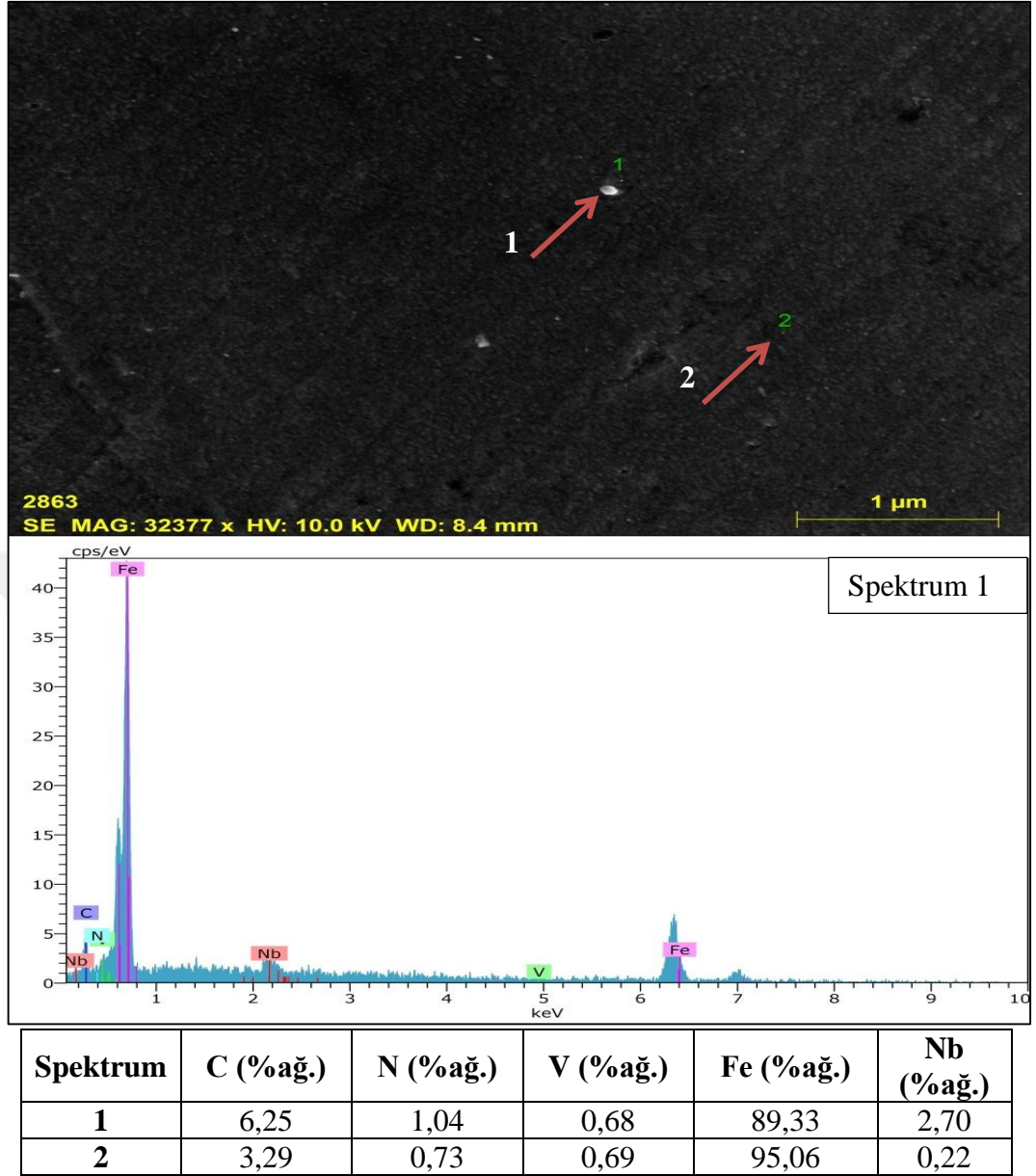


Şekil 6.7. TM yöntemiyle üretilen çeliklerin SEM mikroyapı görüntüleri (a- Alaşım 1, b- Alaşım 2, c- Alaşım 3, d- Alaşım 4, e- Alaşım 5, f- Alaşım 6).



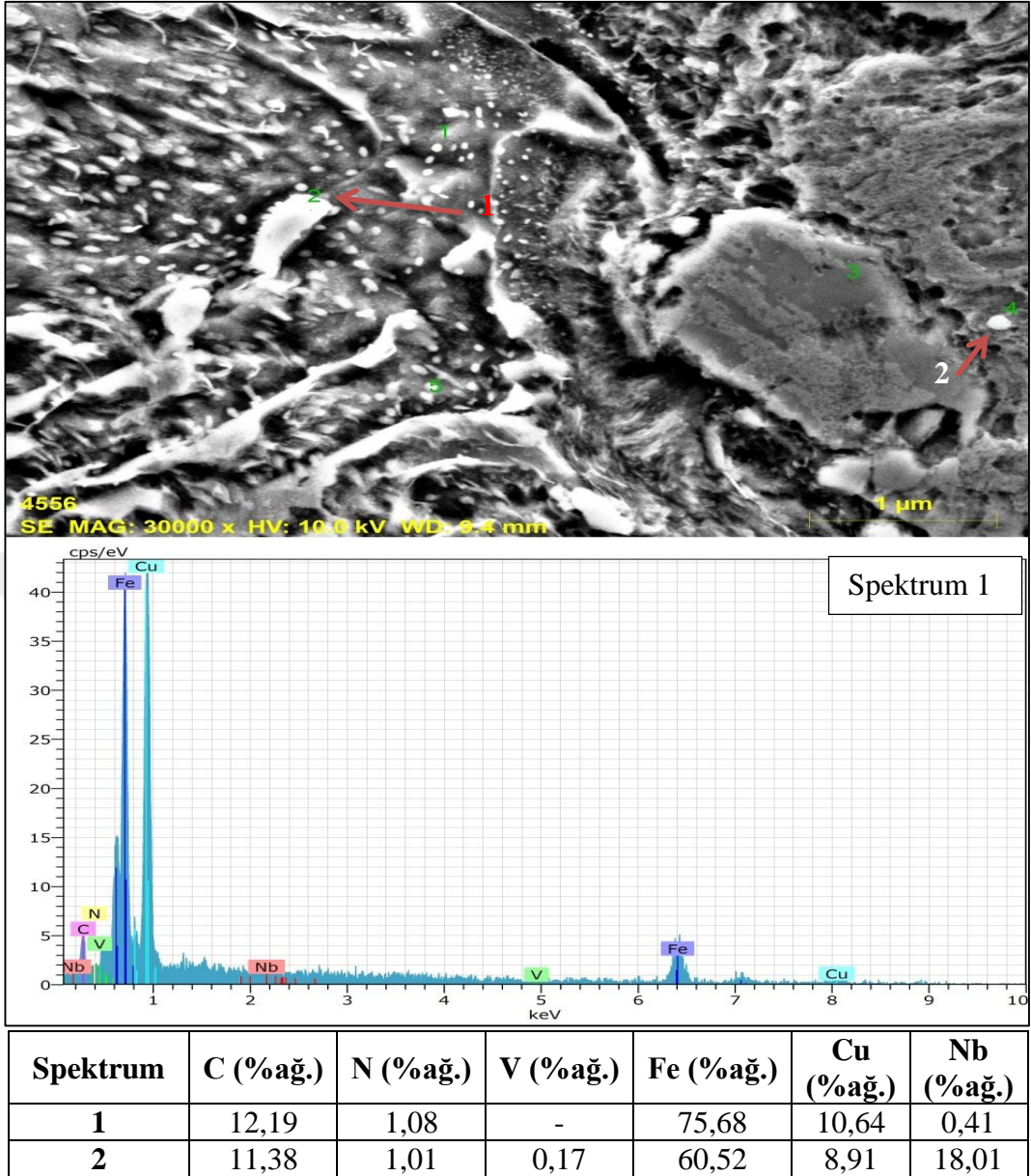
Şekil 6.8. Alaşım 1 nokta EDS incelemeleri.

Alaşım 1 SEM mikroyapı görüntüleri üzerinden alınan EDS analizleri incelendiğinde 1 ve 2 numaralı spektrumların $\text{Fe}_3\text{C}(\text{N})$ bileşiklerinin yapıda oluştuğunu göstermektedir. 3 Numaralı spektrum ise matris yapısını göstermektedir.



Şekil 6.9. Alaşım 2 nokta EDS incelemeleri.

Alaşım 2'nin SEM mikroyapısı görüntüleri üzerinde EDS incelemeleri yapıldığında 1 numaralı spektrumdan NbC(N) gibi çökeltilerin varlığı gözlenmiştir. Mikroalaşım elementlerinin en önemli özelliği kuvvetli karbür ve nitrür yapıcı olmalarından dolayı bu beklenen bir sonuçtur. 2 numaralı spektrum ise matris yapısını göstermektedir.



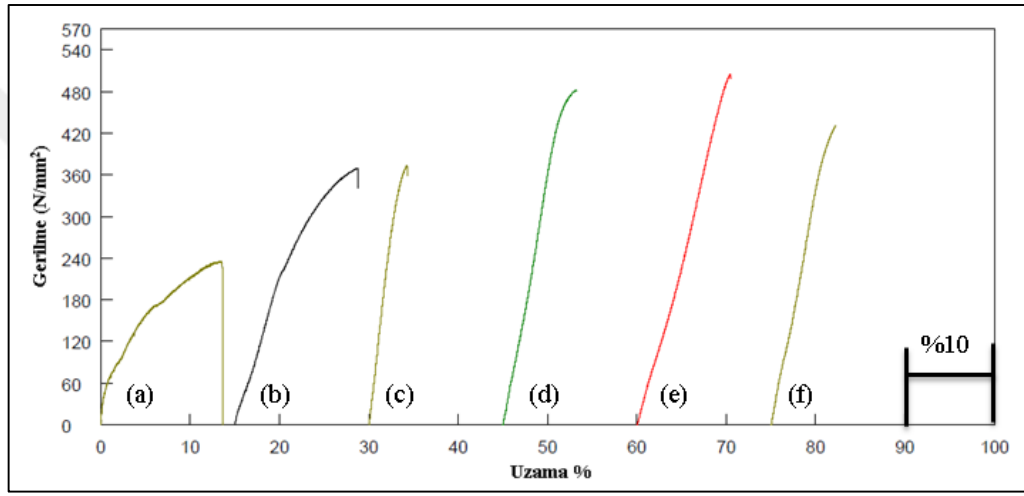
Şekil 6.10. Alaşım 5 nokta EDS incelemeleri.

Alaşım 5'in SEM mikroyapı numunesinden alınan EDS sonuçlarında 1 numaralı spektrumda Fe_3C çökeltilerinden bahsetmek mümkündür. 2 numaralı spektrumda ise NbC çökeltisi gözlenmiştir. Ayrıca her iki spektrumdanda anlaşılacağı gibi bakır elementinin yapı içerisinde çökeldiği tespit edilmiştir.

6.4. MEKANİK TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

6.4.1. Nb-V-Cu Mikroalaşımli TM Çeliğinin Çekme Ve Sertlik Testi Sonuçları Ve Değerlendirilmesi

TM yöntemiyle üretilen alaşımsız çelik ve bakır ilaveli Nb-V mikroalaşım çeliği numunelerin çekme testi sonuçları Şekil 6.11 ve Çizelge 6.3'te verilmiştir. Sertlik sonuçları yine Çizelge 6.3'te yer almaktadır.



Şekil 6.11. Bileşenlerin gerilme-yüzde uzama grafiği (a- Alaşım 1, b- Alaşım 2, c- Alaşım 3, d- Alaşım 4, e- Alaşım 5, f- Alaşım 6).

Çizelge 6.3. 1400 °C'de sinterlenmiş TM çelik numunelerin akma dayanımı(YS), çekme dayanımı(UTS), % uzama ve sertlik değerleri.

Bileşen	Akma Dayanımı (MPa)	Max. Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (Hv ₁)
Alaşım 1	114,5	236	14	87,3
Alaşım 2	226,1	369	13	98,6
Alaşım 3	280	374	4	116
Alaşım 4	301,5	482	8	192
Alaşım 5	343,7	506	10	252
Alaşım 6	244	431	7	170

Alaşım 1 ve Alaşım 2 karşılaştırıldığında karbon miktarları aynı olmasına rağmen Alaşım 2'de bulunan mikroalaşım elementlerinin etkisi akma ve çekme dayanımının artışıyla net bir şekilde görülmektedir. Mikroalaşım elementlerinin çökelti oluşturması

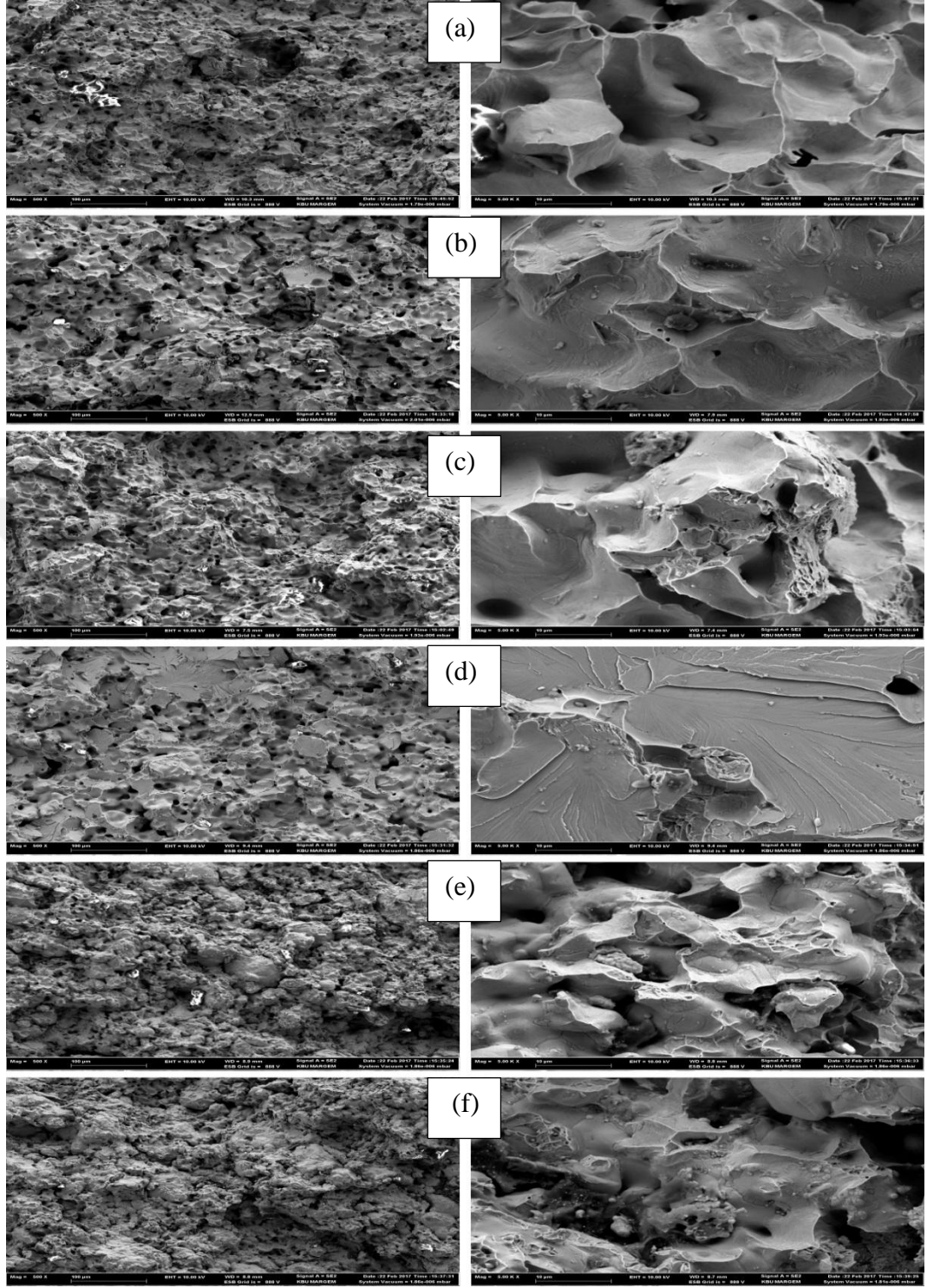
ve tane boyutunu inceltmesi mekanik özellikleri arttırmasının başlıca sebeplerindendir. Nitekim Erden vd. (2014; 2016) ve Erden, (2016a,b) yaptıkları çalışmalarda Nb, V ve Ti gibi mikroalaşım elementi ilave ederek TM çelik üretimi gerçekleştirmiştir. Elde ettikleri sonuçlar incelendiğinde mikroalaşım elementi ilavesi ile üretilen malzemelerin akma, çekme ve sertlik dayanımlarında artış, tane boyutunda düşüş gözlenmiştir. Bunun sebebini sinterleme sırasında ve sonrasında oluşan NbC, NbN, NbCN, VC, VN, VCN, TiC, TiN ve TiCN gibi mikroalaşım elementlerinin oluşturduğu çökeltilerin östenit tanelerinin boyutunun büyümesini engellemesi ve ayrıca oluşan bu çökeltilerin çökelti sertleşmesi, dispersiyon sertleşmesi ve tane boyutu küçültme mekanizmaları ile dayanım artışına neden olduğu ifade edilmiştir. Alaşım 2-3-4-5 ve 6'da ise aynı oranlarda mikroalaşım elementleri bulunmakta ve bakır ilavesinin etkisi karşılaştırılmaktadır. Bakır ağırlıkça %10 ilavesine kadar arttıkça tane boyutunun incelmeye katkısı bulunmuş ve dayanım artışı sağlamıştır. Ağırlıkça %10 Cu ilavesi içeren Alaşım 5'te en yüksek akma ve çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Benzer çalışmalar bu sonucu desteklemektedir. Uygur çalışmasında (2007), Mn oranlarını sabit tutarak bakır oranlarını ağırlık olarak %1'den %2'ye artırdığında numunelerin akma ve çekme dayanımlarında artış olduğunu gözlemlemiştir. Nitekim bu sonuçlar bu çalışmada elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Bu dayanım artışında yukarıda ifade edildiği gibi bakırın tane içinde ve tane sınırlarında çökerek tane boyutunu küçültmesinden ve perlit miktarını artırmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca Özgün'de çalışmasında (2007), malzeme içerisine bakır ilave edilmesiyle beraber perlitik tanelerin incelendiğini ve ağırlık olarak % Cu miktarının artması ile perlit miktarında bir artış gözlemlemiştir. Bu sonuçlar bu çalışmayı destekler niteliktedir.

1400 °C'de argon ortamında sinterlenmiş olan TM alaşımsız ve bakır ilaveli mikroalaşım çelik numunelerin çekme deneyi sonrası X500 ve X5000'de kırık yüzey görüntüleri alınmıştır. Alınan kırık yüzey görüntüleri Şekil 6.12'te EDS incelemeleri ise 6.13 ve 6.14'de gösterilmiştir.

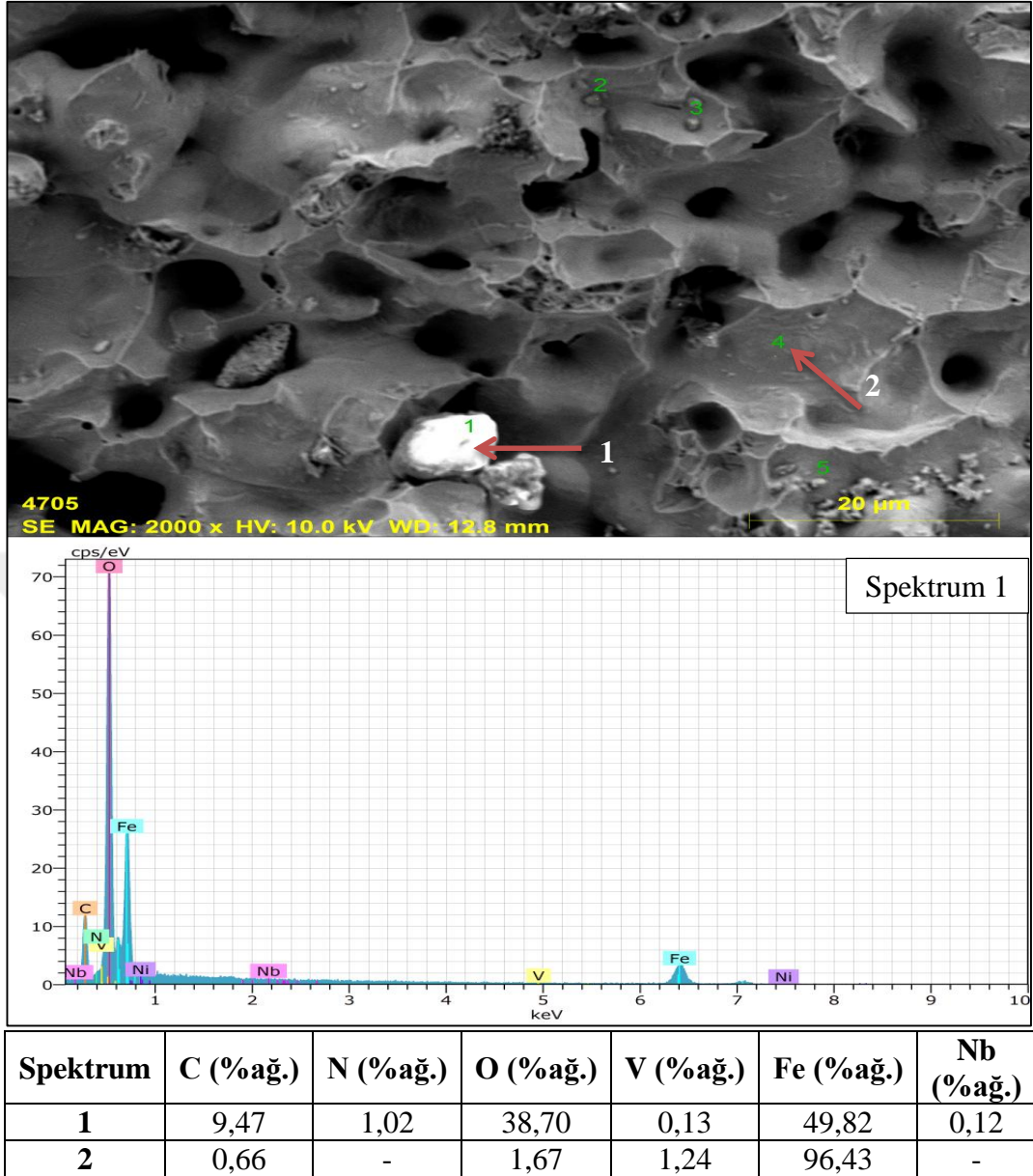
Farklı bakır miktarına sahip mikroalaşımli çelik numunelerin ve alaşımsız çelik numunenin SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 6.12) görüldüğü gibi kırık yüzeylerin hepsi kısmen sünek (peteksi yapı) ve kısmen gevrek (ayrılma düzlemleri)

davranış sergilemişlerdir. Kırık yüzeylerin hepsinde gözeneklerin olduğu belirgin bir şekilde görülmüştür. Bu durum kırılmanın mikroboşlukların birleşip ilerlemesiyle gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca Nb-V bileşimine sahip mikroalaşımli TM çelik numunelerde büyük boşluklar görülmüştür. Bu boşlukların bulunması VC, VN, VCN, NbC, NbN ve NbCN gibi çökeltilerin çekme testi sırasında yüzeyden koparak ayrıldığını göstermektedir. Shanmugasundaram and Chandramouli (2009) yapmış olduğu çalışmada Cr, Ni ve Mo içeren TM çeliğinin kırık yüzeylerinde bu tür büyük boşlukların oluştuğunu görmüş ve bunun nedenini çekme testi sırasında karbürlerin yüzeyden ayrılmasına bağlamıştır.



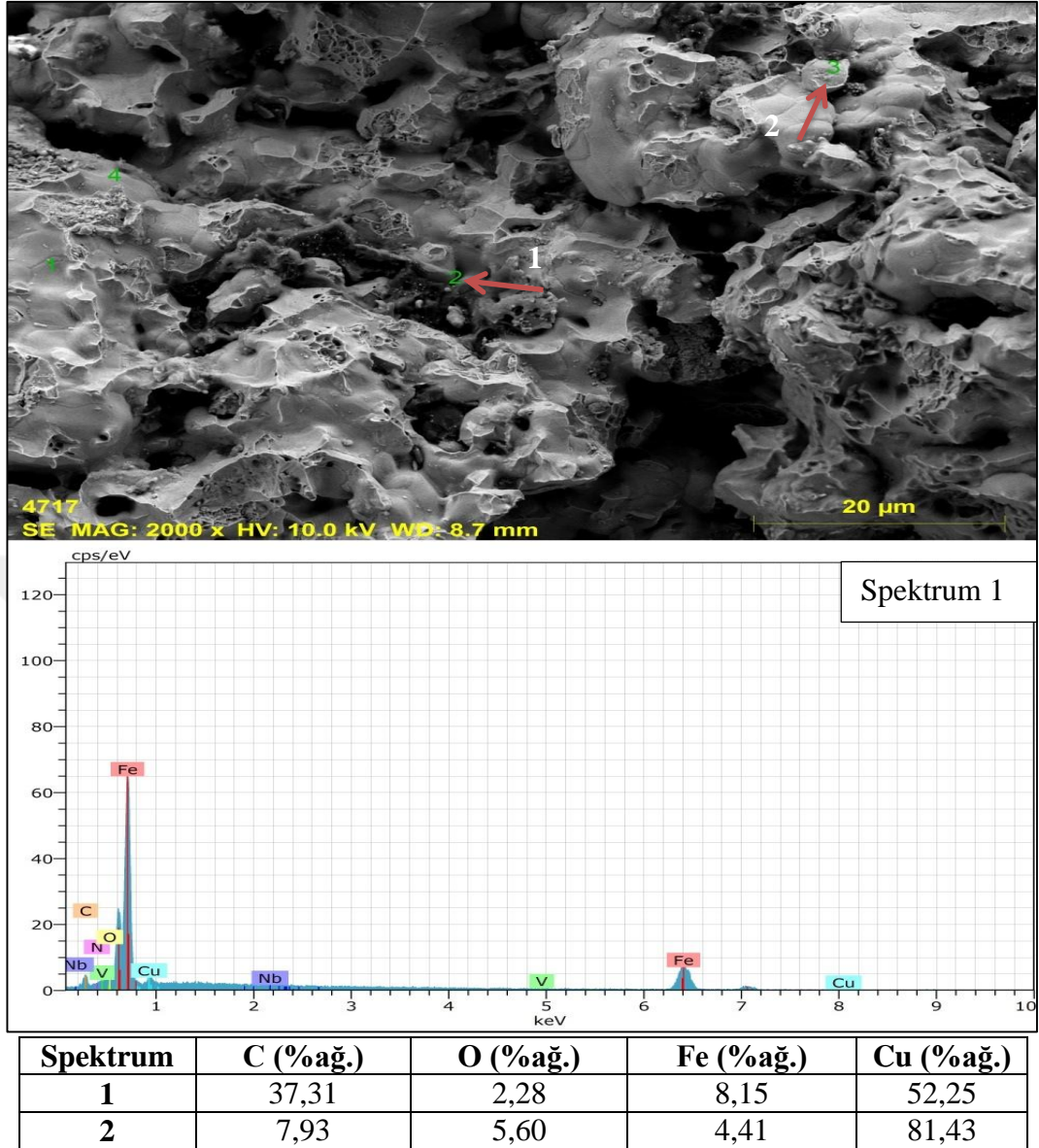


Şekil 6.12. TM yöntemiyle üretilen çeliklerin kırık yüzey görüntüleri (a- Alaşım 1, b- Alaşım 2, c- Alaşım 3, d- Alaşım 4, e- Alaşım 5, f- Alaşım 6).



Şekil 6.13. Alaşım 2 kırık yüzey EDS analiz görüntüleri.

Alaşım 2'nin kırık yüzeyinden alınan EDS incelemeleri sonrası 1 numaralı spektruma bakıldığında Fe_3C ve FeO gibi bileşikler tespit edilmiştir. 2 numaralı spektrum ise matris yapısını ifade etmektedir.



Şekil 6.14. Alaşım 6 kırık yüzey EDS analiz görüntüleri.

Alaşım 6'nın kırık yüzeyinden alınan EDS analizinde 1 ve 2 numaralı spektrumlarda bakır elementinin yoğun bir şekilde yapı içerisinde yayıldığı gözlenmiştir. Ağırlıkça % 15 Cu bakır ilave edilen alaşımın dayanımındaki düşüşün sebebi buradan da anlaşılmaktadır.

6.4.2. Aşınma Testi Sonuçları Ve Değerlendirilmesi

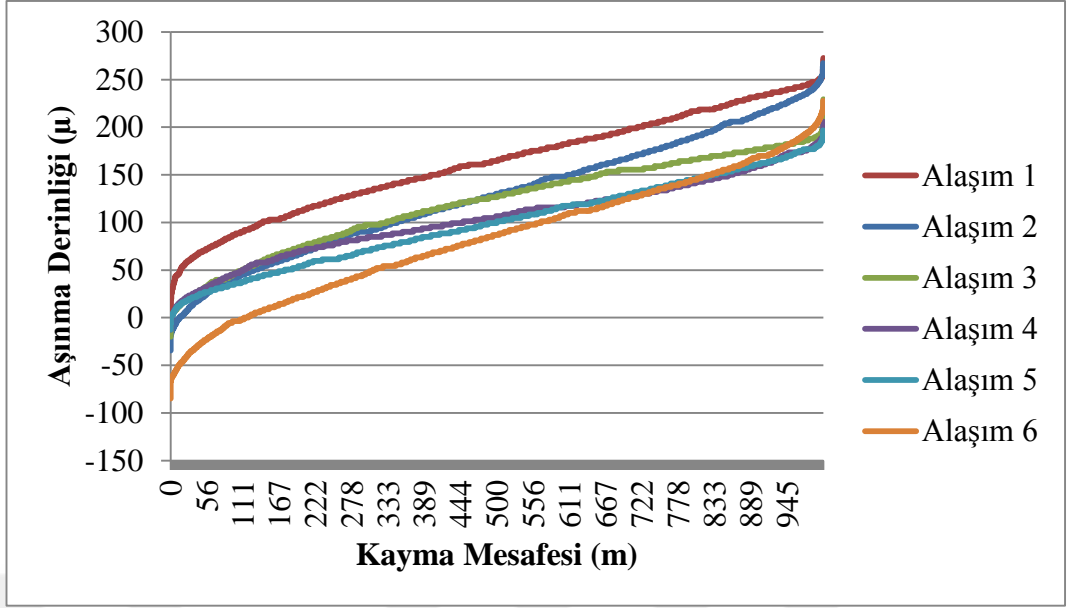
1400 °C'de sinterlenen TM çelik numunelerin aşınma testi sonuçları Çizelge 6.4'te verilmiştir. Bu çizelgede görüldüğü gibi TM çelik numunelere uygulanan aşınma

testleri sonucu elde edilen verilere göre yük ve kayma mesafesi arttıkça aşınma derinliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Nb-V ilavesi ile malzemenin akma-çekme dayanımı ve sertlik değerlerindeki artışa paralel olarak aşınma direncinde de artış gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak ilave edilen mikroalaşım elementlerinin oluşturmuş olduğu NbC, NbN, NbCN, VC, VN ve VCN gibi çökeltilerin çökelti sertleşmesi ve tane boyutu küçültme dayanım artırıcı mekanizmaları ile malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmesinden kaynaklanmaktadır (Erden, 2015).

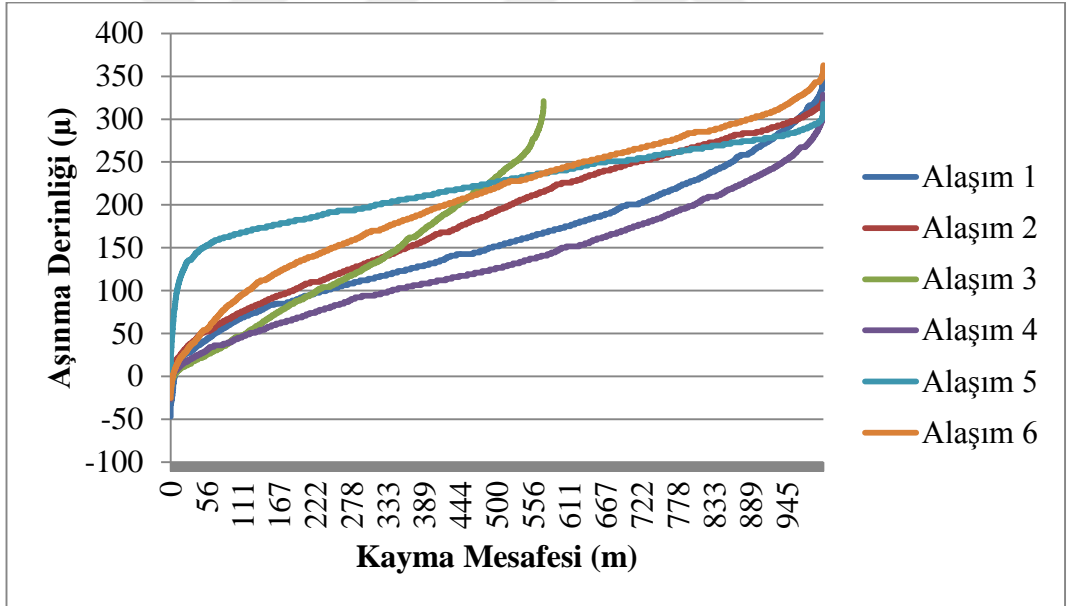
Çizelge 6.4. 1400 °C’de sinterlenen TM çeliklerinin aşınma deneyi sonuçları.

Bileşen	Yük	Aşınma Derinliği (µm)	Ağırlık Kaybı (mg)
Alaşım 1	15 N	301,65	0,199
	30N	406,42	0,326
Alaşım 2	15 N	272,75	0,138
	30N	355,84	0,307
Alaşım 3	15 N	249,27	0,116
	30N	348,04	0,269
Alaşım 4	15 N	218,56	0,115
	30N	334,17	0,144
Alaşım 5	15 N	209,53	0,009
	30N	321,52	0,058
Alaşım 6	15 N	312,49	0,199
	30N	388,36	0,289

Nb-V mikroalaşım çeliklerine ağırlıkça %10’a kadar bakır ilavesinin dayanım artışı sağlayıp aşınma direncini arttırdığı görülmektedir. Literatürde alaşımsız çeliklerin dayanımının bakır ilave edilen çeliğine göre daha düşük olduğunu gösteren çalışmalar bulunmaktadır. Nitekim Ekici yaptığı çalışmada (2010), bakır oranının fazla olması ve sinterleme sıcaklığının yüksek olmasından dolayı bakırın taneler içerisine daha rahat yayılmakta olduğunu ve böylece taneler arasındaki metalürjik bağı kuvvetlendirdiğini gözlemlenmiştir. Bunun sonucu olarak bu malzemelerin sertlik değerlerinin ve aşınma dirençlerinin yüksek olduğu sonucuna ulaşmıştır. Ekici’nin elde ettiği sonuçlar bu çalışmada elde edilen sonuçları desteklemektedir.



Şekil 6.15. TM çelik numunelerin 15 N yük altındaki aşınma derinliği grafiği.



Şekil 6.16. TM çelik numunelerin 30 N yük altındaki aşınma derinliği grafiği.

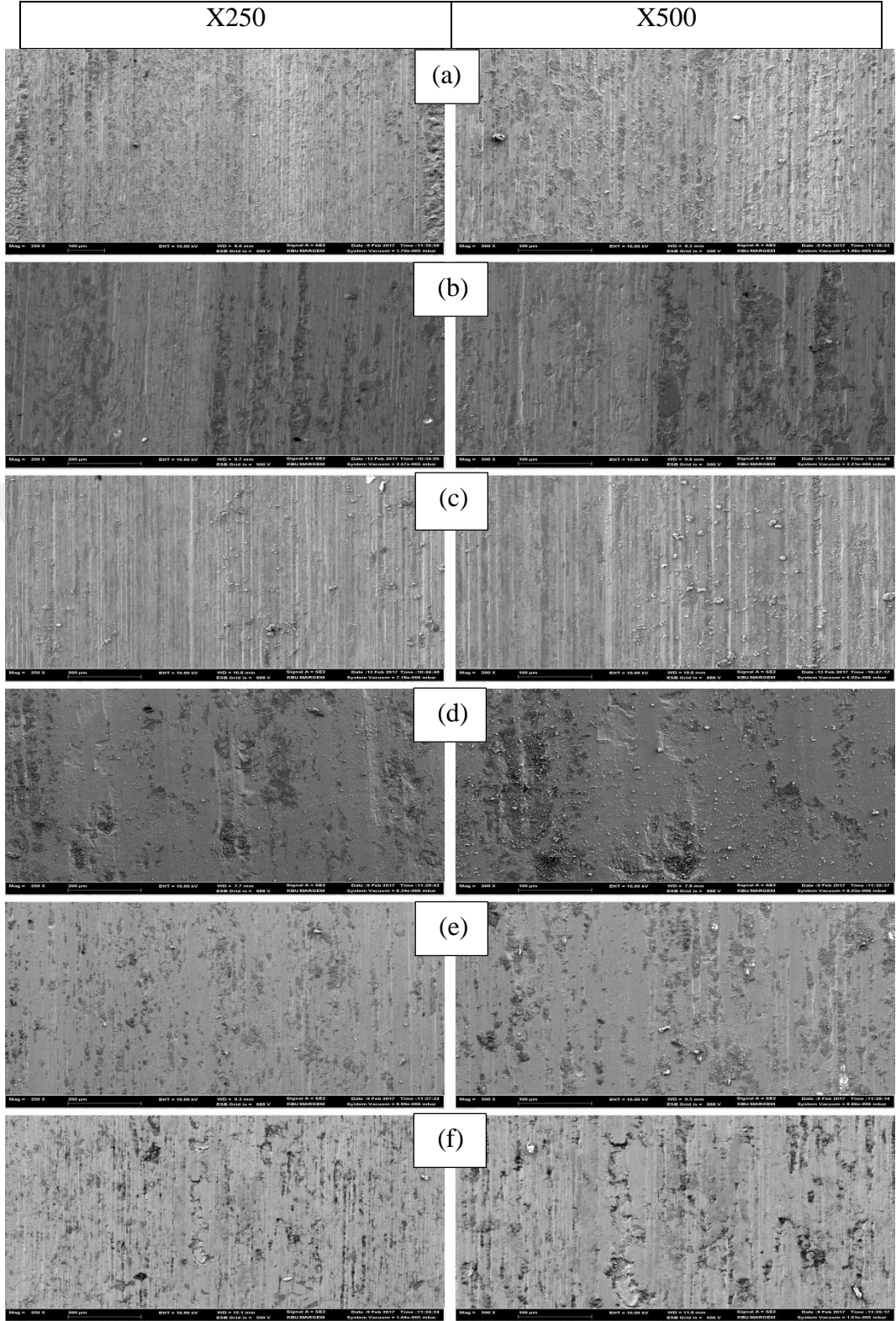
Çizelge 6.4 incelendiğinde mikroyapı görüntüleri ve çekme testi sonuçlarıyla doğru orantılı olarak en fazla aşınma direnci gösteren ve en az ağırlık kaybına maruz kalan numunenin ağırlıkça %10 Cu ilavesi içeren Alaşım 5'e ait olduğu görülmüştür.

1400 °C'de argon ortamında sinterlenmiş olan TM alaşımsız ve bakır ilaveli mikroalaşımli çelik numunelerin 15N ve 30N'luk kuvvetler altında uygulanan aşınma

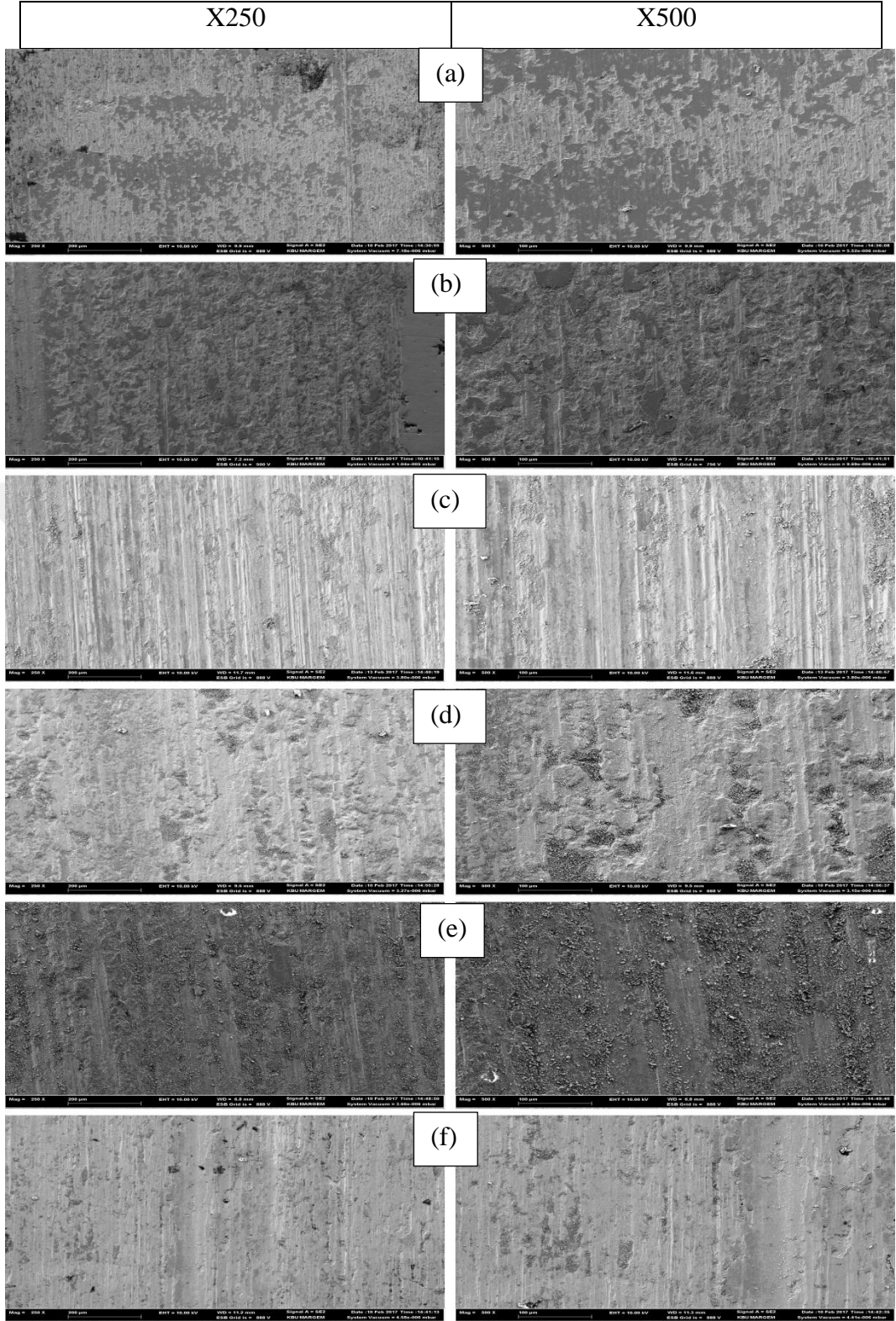
deneyi sonrası X250 ve X500’de aşınan yüzey görüntüleri ayrı ayrı alınmıştır. Alınan aşınma yüzeyi görüntüleri Şekil 6.19 ve 6.20’de EDS incelemeleri ise Şekil 6.21-6.22 ve 6.23’de gösterilmiştir.

Görüntüler incelendiğinde aşındırıcı bilyenin genel olarak kayma yönüne paralel çizgiler oluşturduğu görülmektedir. Bu çizgiler TM yöntemiyle üretilen çeliğin abrasiv aşınma mekanizmasına maruz kaldığını göstermektedir.

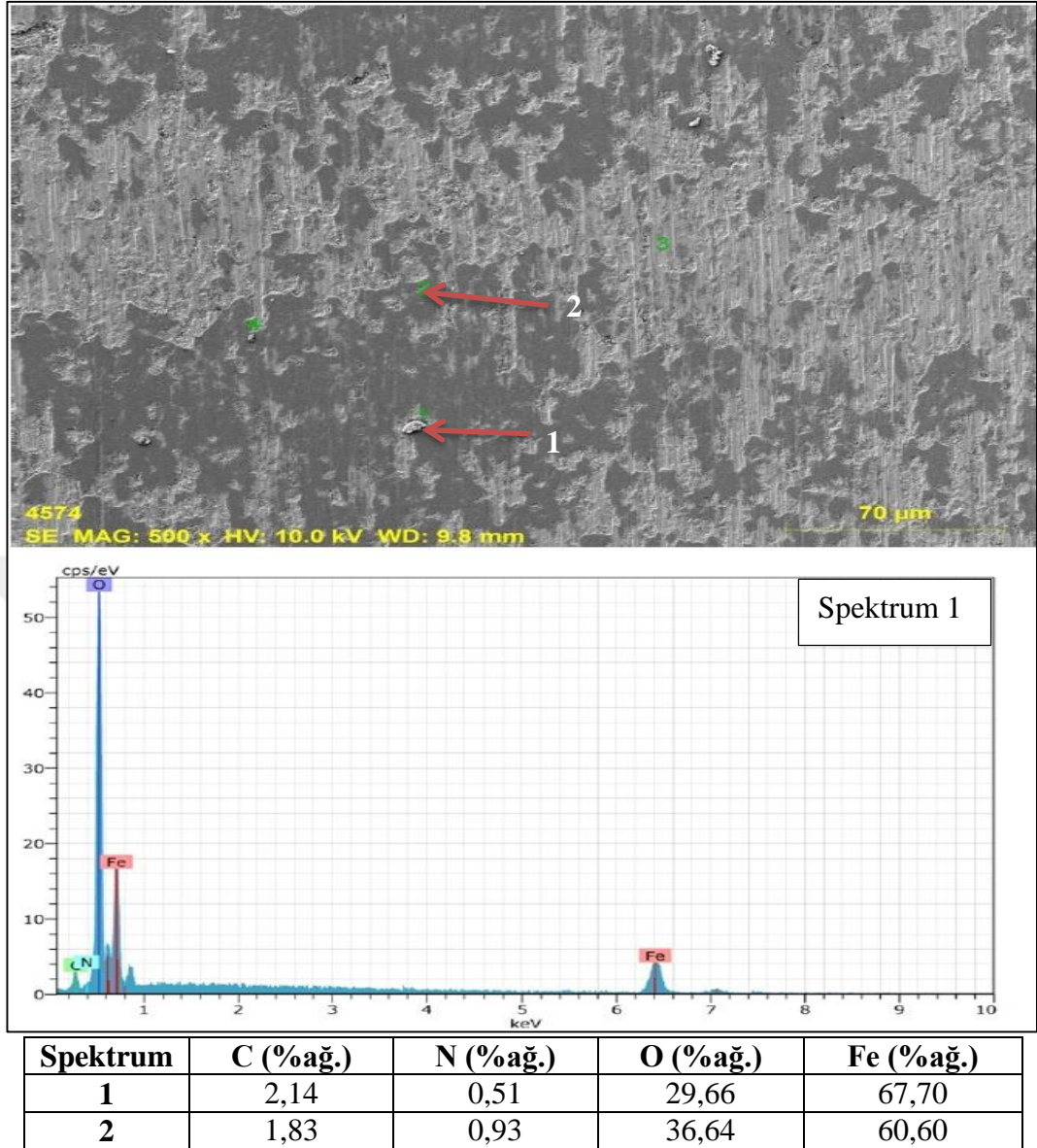
Aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntülerinde bütün malzemelerde aşınma kanallarının olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte kayma mesafesi ve uygulanan yük miktarının artmasına bağlı olarak aşınma çizgilerinin daha derin ve genişlediği görülmektedir. Ayrıca bakır miktarının ağırlıkça %10’a kadar ilavesiyle numunede oluşan çizikler daha yüzeysel ve ince formda gelişirken, %15 ilavesiyle ise aşınmış yüzeydeki çizikler daha derin ve kalın bir şekilde oluştuğu gözlenmiştir. Bu durum akma, çekme ve sertlik değerleri ile uyum göstermektedir. Şekil 6.21-23’te TM yöntemiyle üretilen alaşımsız çelik ve bakır içeren mikroalaşımli çelik numunelerin aşınma yüzey resimlerinden alınan SEM EDS analiz sonuçlarında Nb ve V elementinin aşınma yüzeyi üzerinde partikül şeklinde ve matris içerisinde bulunduğu tespit edilmiştir. Ayrıca nokta EDS analiz sonuçları bu çökeltilerin Nb, V, N ve C elementlerini içermesinden dolayı NbC, VC, NbN, VN, NbCN ve VCN çökeltilerinin oluştuğunu, Fe ve C içermesinden dolayı da Fe₃C çökeltilerinin meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 6.17. TM yöntemiyle üretilen çeliklerin 15 N yük uygulanmış aşınma yüzeyi görüntüleri (a- Alaşım 1, b- Alaşım 2, c- Alaşım 3, d- Alaşım 4, e- Alaşım 5, f- Alaşım 6).

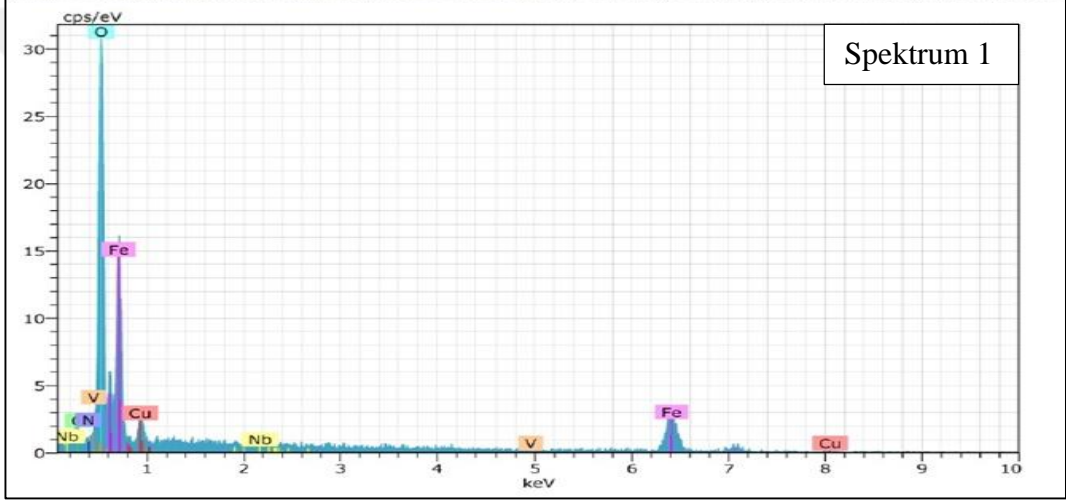


Şekil 6.18. TM yöntemiyle üretilen çeliklerin 30 N yük uygulanmış aşınma yüzeyi görüntüleri (a- Alaşım 1, b- Alaşım 2, c- Alaşım 3, d- Alaşım 4, e- Alaşım 5, f- Alaşım 6).



Şekil 6.19. Alaşım 1 aşınma yüzeyi nokta EDS incelemeleri.

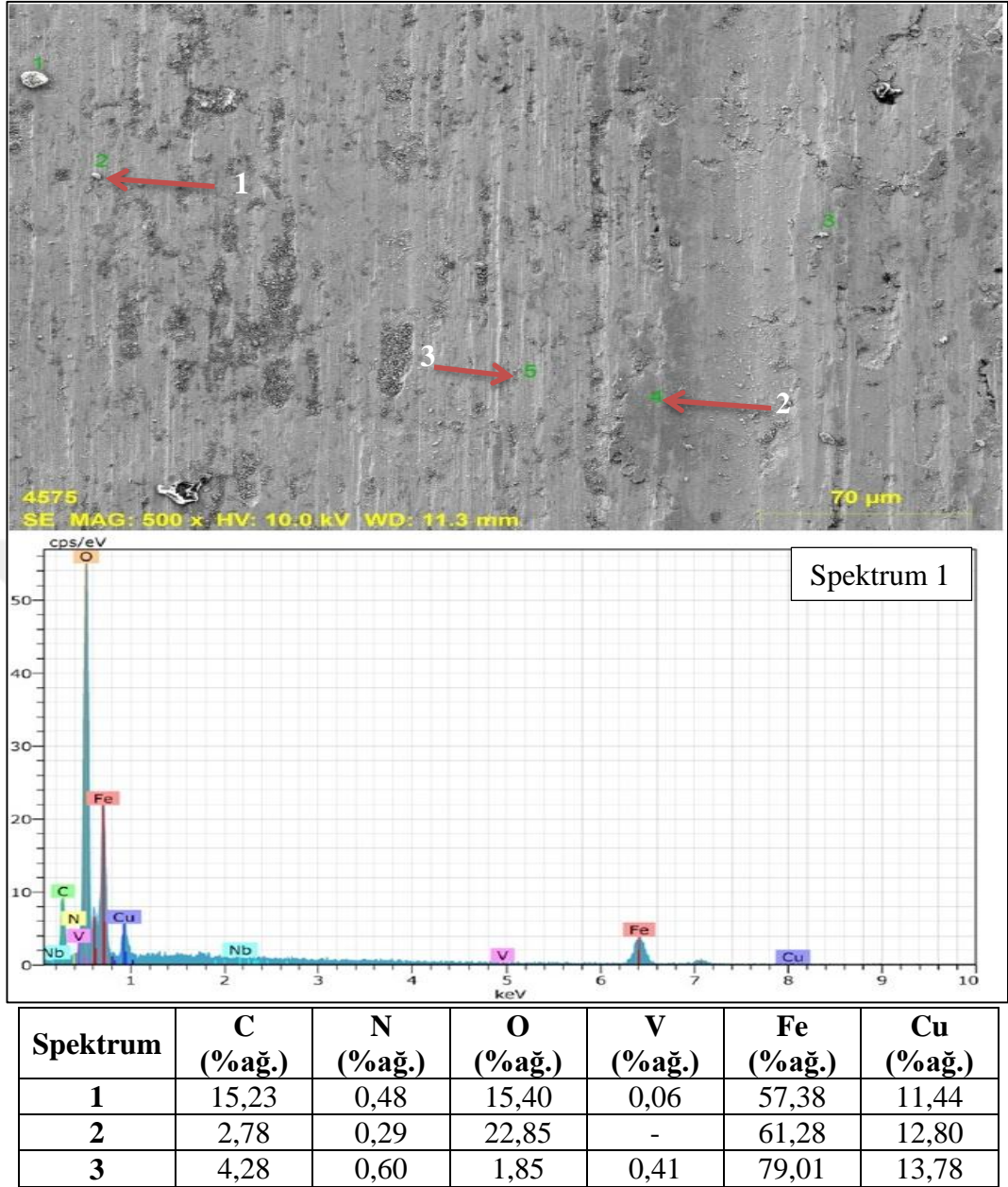
Alaşım 1'in aşınma yüzeyinden alınan EDS incelemesinde 1 ve 2 numaralı spektrumlarda görüldüğü üzere FeO bileşiği olduğu gözlenmiştir. Aşınma deneyleri atmosfer şartlarına açık bir ortamda yapıldığı için bu beklenen bir durumdur.



Spektrum	C (%ağ.)	N (%ağ.)	O (%ağ.)	Fe (%ağ.)	Cu (%ağ.)
1	2,61	0,48	24,97	66,11	5,82
2	3,70	0,25	15,82	73,07	6,85
3	5,48	0,73	24,38	63,86	5,17

Şekil 6.20. Alaşım 5 aşınma yüzeyi nokta EDS incelemeleri.

Alaşım 5'in aşınma yüzeyinden alınan EDS sonuçlarına bakıldığında 1 ve 3 numaralı spektrumlarda FeO bileşiğinin yanında bakırında çökerek yapı içerisinde bulunduğu gözlenmiştir. Bakırın sıvı faz sinterleme mekanizması ile tane sınırlarına ve gözeneklere yayılmasından dolayı bu beklenen bir durumdur. 2 numaralı spektrum ise 1 ve 3 numaradakilere göre daha az O barındırdığından matris yapısını temsil ettiğini söylemek mümkündür.



Şekil 6.21. Alaşım 6 aşınma yüzeyi nokta EDS incelemeleri.

Alaşım 6'nın aşınma yüzeyinde yapılan EDS incelemelerinde ise 1 numaralı spektrumda Fe_3C bileşiğinin var olduğu gözlenmiştir. 2 numaralı spektrumda FeO bileşiği oluşmuş, 3 numaralı spektrum ise matris yapısını temsil etmektedir. Mikroalaşım elementlerinin yanında ilave edilen bakır ise çökelerek farklı boyutlarda yapı içerisinde dağıldığı gözlenmiştir.

6.5. XRF İNCELEMELERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Elde edilen sonuçlar çizelge 6.5’de verilmiştir. XRF sonuçları üretim öncesi planlanan kimyasal bileşim ile üretim sonrası elde edilen kimyasal bileşim değerlerinin birbirini ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

Çizelge 6.5. 1400 °C’de sinterlenen TM çelik numunelerin XRF analiz sonuçları.

Alaşım 1			Alaşım 2			Alaşım 3		
Element	Sonuç	Birim	Element	Sonuç	Birim	Element	Sonuç	Birim
C	0,45	%Kütle	C	0,45	%Kütle	C	0,45	%Kütle
Si	0,005	%Kütle	S	0,0102	%Kütle	Si	0,0322	%Kütle
Mn	0,211	%Kütle	V	0,0889	%Kütle	Cr	0,0881	%Kütle
P	0,009	%Kütle	Cr	0,1097	%Kütle	Mn	0,1898	%Kütle
Si	0,016	%Kütle	Mn	0,2293	%Kütle	Ni	0,0507	%Kütle
Cr	0,082	%Kütle	Ni	0,0682	%Kütle	Cu	0,5034	%Kütle
Mo	0,016	%Kütle	Cu	0,0596	%Kütle	Fe	98,6858	%Kütle
Ni	0,046	%Kütle	Nb	0,0776	%Kütle			
Al	0,044	%Kütle	Mo	0,0214	%Kütle			
Cu	0,062	%Kütle	Fe	98,8851	%Kütle			
Ni	0,006	%Kütle						
Co	0,017	%Kütle						
Fe	99,036	%Kütle						
Alaşım 4			Alaşım 5			Alaşım 6		
Element	Sonuç	Birim	Element	Sonuç	Birim	Element	Sonuç	Birim
C	0,45	%Kütle	C	0,45	%Kütle	C	0,45	%Kütle
Si	0,0736	%Kütle	Si	0,0382	%Kütle	Cr	0,0803	%Kütle

V	0,144 4	%Kütl e	V	0,0767	%Kütl e	Mn	0,1762	%Kütl e
Cr	0,081	%Kütl e	Cr	0,0792	%Kütl e	Cu	14,496 8	%Kütl e
Mn	0,200 6	%Kütl e	Mn	0,1712	%Kütl e	Nb	0,0774	%Kütl e
Ni	0,052 3	%Kütl e	Ni	0,0494	%Kütl e	V	0,0572	%Kütl e
Cu	5,080 2	%Kütl e	Cu	9,5677	%Kütl e	Fe	84,662 1	%Kütl e
Nb	0,107	%Kütl e	Nb	0,1133	%Kütl e			
Fe	93,81 0	%Kütl e	Fe	89,454 3	%Kütl e			



6.6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.6.1. Genel Sonuçlar

Alaşım-sız çelik ve % ağırlıkça beş farklı bakır oranına sahip (%0 - %0,5 - %5 - %10 ve %15) olan (Nb-V) mikroalaşım-lı TM çelikleri soğuk presleme ve ardından 1400 °C’de argon atmosferinde sinterleme işle-mi uygulanarak üretilmiştir. Aşağıda sıralanan sonuçlar bu çalışmadan elde edilmiştir.

1. (Nb-V) mikroalaşım-lı çelikler, alaşım-sız çeliklere göre daha küçük taneli yapı sergilemişlerdir. Bu durum alaşım elementlerinin oluşturmuş olduğu karbür ve nitürlerin tane büyümesini engellemesinden kaynaklanmaktadır.
2. Cu oranının artmasıyla ortalama tane boyutunun küçüldüğü görülmüştür. Bu durumun sinterleme esnasında ve sonrasında tane sınırlarında ve tane içinde oluşan Cu çökeltilerinin östenit tanelerinin büyümesini engellemesiyle ortaya çıkmaktadır.
3. Ağırlıkça %10 Cu ilavesine kadar tane boyutunu küçültmenin yanı sıra perlit miktarını artırdığı gözlenmiştir. %15 Cu ilavesi ile belirgin bir şekilde bakırın gözenek ve tane sınırlarına yığıldığı gözlenmiştir. Böylece perlit miktarında azalma ve tane boyutunda büyüme gözlenmiştir. Bunun sonucu olarak malzemenin akma çekme ve % uzama değerlerinde düşme gözlenmektedir.
4. Alaşım-sız ve (Nb-V) mikroalaşım-lı TM çeliklerinin sinterleme sonrası yoğunluklarının genel olarak %88 civarında olduğu görülmektedir.
5. (Nb-V) mikroalaşım çelikleri toz metalürjisi yöntemiyle üretilebilmektedir. Sinterleme sırasında veya sinterleme sonrası soğutma sırasında oluşan katı ergiyik sertleşmesi ve çökelti sertleşmesi çeliğin mukavemetini arttırmaktadır.
6. (Nb-V) ile mikroalaşım-landırılmış TM çeliklerinin EDS analizleri V, Nb, C ve N elementlerini ve bu elementlerin oluşturmuş olduğu VC, VN, VCN, NbC, NbN ve NbCN gibi çökeltilerin demir matris içinde bulunduğunu ortaya çıkarmaktadır.

7. Cu ilave edilen (Nb-V) ile mikroalaşımlandırılmış TM eliklerinin XRF analizleri üretim öncesi planlanan kimyasal bileşim değerleri ile sonrası elde edilen kimyasal bileşim değerlerinin birbiri ile uyumlu olduğunu göstermektedir.
8. (Nb-V) ile mikroalaşımlandırılmış çeliklerin alaşımsız TM eliklerine göre aşınma dirençlerinin daha üstün olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi mikroalaşım elementlerinin kuvvetli karbür ve nitrür yapıcı özelliklerinin olmasıdır. Ayrıca bakır ilavesi ile numunelerin aşınma direncinin daha da arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi de bakırın tane sınırlarında ve gözeneklerde birikerek tane inceltme mekanizmasıyla dayanım artışı sağlamasıdır.

6.6.2. Öneriler

1. Üretilen (Nb-V) mikroalaşımlı çeliklerin darbeye karşı dayanımları incelenebilir.
2. Üretilen (Nb-V) mikroalaşımlı çeliklerin korozyon özellikleri incelenebilir.
3. Üretilen (Nb-V) mikroalaşımlı çeliklerin yorulma davranışları incelenebilir.
4. Üretilen mikroalaşımlı çelikler dışında farklı ikili ve üçlü bileşimlerde mikroalaşımlı elik üretimi gerçekleştirilerek alaşım elementlerinin mikroyapı–mekanik özellik ilişkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

Akdoğan, A., “Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri”, *Y.T.Ü Makine Fakültesi*, İstanbul, (2008).

Anık, S., Dikicioğlu, A., Vural, M., “İmal Usulleri”, *İ.T.Ü. Makina Fakültesi*, İstanbul, (1999).

Ataş, A., “Alaşımli demir tozu peletlerinin sinterleme sonrası mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2003)

Aydın, R., “T/M çelik parçalarda ısıl işlemlerin mekanik özelliklere etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi*, Isparta, (1997).

Barksdale, J., 'The Encyclopedia of the Chemical Elements', "Titanium", *Skokie Illinois: Reinhold Book Corporation*, (1968).

Boz, M., “Toz metalurjisi ile üretilmiş bronz esaslı fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (1999).

Boz, M., “Seramik takviyeli bronz esaslı toz metal fren balata üretimi ve sürtünme-aşınma özelliklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2003).

Çeviker, I., “Mikroalaşımli dövme çeliklerde mikroyapısal karakterizasyon ve mikroyapı-mekanik özellikler ilişkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 6-30 (1991).

Dahl, W., Hagen, M., ve Kai.K., “Vorgaenge im werkstoff bei der TMB von stahl”, *Stahl und Eisen*, 111 (4): 113-119, (1991).

Ekşi A., Sarıtaş S., “Effects of powder hardness and particle size on the densification of cold isostatically pressed powders”, *Turkish J. Eng. Sci.*, 377-384, (2002).

Erden, M. A., Gündüz, S., Türkmen, M., and Karabulut, H., “Microstructural characterization and mechanical properties of microalloyed powder metallurgy steels”, *Materials Science and Engineering: A*, 616: 201-206 (2014).

Erden, M. A., “Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen mikroalaşım çeliklerinin mikroyapı mekanik özellik ilişkisinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1-155 (2015).

Erden, M. A., and Gökçe, H., “The effect of sintering atmosphere on mechanical properties of Nb-V bsaed microalloy steels produced by powder metallurgy method”, *Sylwan*, 160 (8): 362-375 (2016).

Erden, M. A., Gündüz, S., Türkmen, M., and Karabulut, H., “The effect of V addition on the microstructure and mechanical properties of low carbon microalloyed powder metallurgy steels”, *Materials Testing*, 58 (5): 433-437, (2016).

Erden, M. A., “Karıştırma süresinin toz metalurjisi ile üretilen alaşımsız çeliklerin mekanik özelliklerine etkisi”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5 (9): 62-65, (2016).

Erden, M. A., “Effect of C content on microstructure and mechanical properties of Nb-V added microalloyed steel produced by powder metallurgy method”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5 (9): 44-47, (2016).

Erden, M. A., “Presleme basıncının toz metalurjisi ile üretilen alaşımsız çeliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi”, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (1), (2017).

German, R. M., “Powder metallurgy science”, 2nd edition, *Metal Powder Industries Federation*, USA, 1-61 (1994).

Gladman, T., “Physical metallurgy of microalloyed medium carbon engineering steels”, *Ironmaking and Steelmaking*, 16: 241 (1989) .

Gladman, T., “Grain refinement in multible microalloyed steels. In: HSLA Steels Properties and Applications The Minerals”, *Metals and Materials Society*, 1: 3-14 (1992).

Gladman, T., “The physical metallurgy of microalloyed steels”, *The Institue of Materials*, England, 1, 341 (1997).

Höganäs, A. B., “Production of iron and steel powders”, chapter 2, 3-21s, *Höganäs PM School*, (1996).

Karabulut, H., “Mikroalaşımli çeliklerde yaşlanma sertleştirmesinin mekanik özelliklere etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 3-60 (2004).

Karabulut, H., and Gündüz, S., “Effect of vanadium content on dynamic strain ageing in microalloyed medium carbon steel”, *Materials and Design*, 25: 521–527 (2004).

Koltuk, F., “Mikroalaşımli çeliklerin ikincil sıcak şekillendirilmesinde Özelliklerin Optimizasyonunun incelenmesi”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 3-66 (1996).

Kostrzyhev, A. G., Al Shahrani, A., Zhu, C., Cairney, J. M., Ringer, S. P., and Killmore, C. R., “Effect of niobium clustering and precipitation on strength of an NbTi

microalloyed ferritic steel”, *Materials Science and Engineering: A*, 607: 226–235, (2014).

Kurt. A., “Toz metal bronz yatak malzemelerin özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (1992).

Levent, M., “Dişli çarklarda aşınma”, Lisans Tezi, *S.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi*, Konya, (2005).

Lindsley, B., Schade C., and Murphy T, “Vanadium and silicon alloyed PM steels”, *Hoeganaes Corporation*, 1001 Taylors Lane Cinnaminson, NJ 08077 USA, 1-6 (2012).

Matik, U, “Akımsız nikel kaplamalarda ısıl işlemin sertlik ve aşınma özelliklerine etkisi”, Doktora Tezi, *G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-50 (2010).

Matthew, J., and Donachie, Jr., “TITANIUM: A Technical Guide”, *Metals Park, OH: ASM International*, p.11, (1988)

Matthew, J., and Donachie Jr., “TITANIUM: A Technical Guide”, *Metals Park, OH: ASM International*, Appendix J, Table J.2, (1988).

Matthew J., and Donachie, Jr., “TITANIUM: A Technical Guide”, *Metals Park OH: ASM International*, Chapter 4, (1988).

Öveçoğlu, M. L., “Toz metalurjisi tarihsel gelişim, üretim aşamaları ve yeni eğilimler”, *9. Uluslararası metalürji ve malzeme kongresi*, 449-475, İstanbul, (1997).

Özdemirler, D., Gündüz, S., Erden, M.A., Karabulut, H., Türkmen, H., “Sinterleme sıcaklığının NbC ilave edilmiş TM çeliklerinin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Özel Sayı 92-97, Afyon, (2016).

Özgün, Ö., “Toz metalurjisi ile üretilen alaşımlı çeliklerin mikroyapı ve mekanik özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, *Sakarya*, (2007).

Öztürk, Z., “Gaz atomizasyonu ile Al 2024 tozu üretimi ve karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 1-60 (2012).

Pawelski, O., Kaspar, R., ve Peichl, L., “TMB von stahl, in neue verfahren d. massivumformung”, Hrsg.: ReinerKopp, *Deutsche Gesellschaft für Metallkunde*, Düsseldorf, 251-271, (1981).

Repas, P. E., “Metallurgical fundamentals for HSLA Steels, microalloyed HSLA Steels proceeding of microalloying”, *ASM Int. Publ.*, 3-14 (1988).

Roll, K. H., “History of powder metallurgy”, *Metals Handbook, 9th edition*, Vol.7, ASM Metals park, Ohio, (1984).

Sarıtaş, S., Türker, M, ve Durlu, N, “Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri”, *Türk Toz Metalurjisi Yayınları: 05*, Ankara, 2-34, 206-237, 379-410 (2007).

Schade, C, Murphy, T, Lawley, A, and Doherty, R., “Microstructure and mechanical properties of microalloyed PM steels”, *Int J of Powder Metall.* 48: 51-59 (2012).

Söyler, M., “Toz metalurjisi ve uygulamaları”, Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gebze, (2007).

Taş, Z., “Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çeliklerde metalürjik mukavemet artırma mekanizmaları” *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(2):97-101, (2012).

Topateş, T., “Mikroalaşımlı çeliklerin TMI-sırasında değişen proses parametrelerinin mikroyapı – mekanik özellikler üzerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1995).

Uygur, İ., “Fe-Cu-C çeliklerine mangan ilavesinin mekanik özelliklere etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 22, No:3, 325-330, Ankara, (2007).

Yavuz, N., Güner, R., “Demir esaslı toz metal parçaların elektrik direnç kaynağından optimum kaynak şartlarının belirlenmesi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 7 (1): S. 221-228, (2002).

Yıldız, T., ve Gür, A. K., “Aşınma Sistemleri”, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, *Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü*, Elazığ, (2006).

Zarrabi, Ahrabi, A., Bilici, İ., ve Bilgesü, A. Y., “Pet atıkları kullanılarak kompozit malzeme üretiminin araştırılması”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 27.3, (2012).

Zini, E., and Scandola, M., “Green composites: an overview”, Volume 32, Issue 12, pp.1905–1915, Polymer composites, *Wiley Online Library*, (2011).

Wang, Y. S., Zhang, X. Y., Fengchun, L., and Guangting, Z., “Study on and Fe-TiC surface composite produced in situ”, *Mater. Des.*, 20: 233-236 (1999).

ÖZGEÇMİŞ

Çağrı ODABAŞI, 1992 yılında Ankara'da doğdu; ilköğrenimini Genç Osman İlkokulu'nda, lise öğrenimini Polatlı Teknik Lisesi'nde tamamladı. 2010 yılında Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünü kazandı ve 2015 yılında buradan mezun oldu. Lisansüstü eğitimini Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 2017 yılında tamamlamıştır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Zafer Mahallesi Başak Caddesi Tarla Sokak Odabaşı APT. No: 4/4
Polatlı/ANKARA.

Tel : (537) 945 73 08

E-posta : cagriodabasi06@gmail.com