



**B₄C TAKVİYELİ CUALNi KOMPOZİTİNİN
KARAKTERİZASYON VE AŞINMA
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Berhan ŞAHİN

**2022
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mustafa YAŞAR**

**B₄C TAKVİYELİ CUALNİ KOMPOZİTİNİN KARAKTERİZASYON VE
AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Berhan ŞAHİN

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mustafa YAŞAR**

**KARABÜK
Şubat 2022**

Berhan ŞAHİN tarafından hazırlanan “B₄C TAKVİYELİ CUALNi KOMPOZİTİNİN KARAKTERİZASYON VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa YAŞAR

Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Muhammet Emre TURAN (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Mustafa YAŞAR (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Tayfun ÇETİN (HÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

Lisansüstü Eğitim 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.”

Berhan ŞAHİN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

B₄C TAKVİYELİ CUALNi KOMPOZİTİNİN KARAKTERİZASYON VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Berhan ŞAHİN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Mustafa YAŞAR

Şubat 2022, 49 sayfa

Toz metalurjisi (TM), sıkıştırılmış metal tozlarını erime noktalarının hemen altına ısıtarak metal parçalar oluşturma işlemidir. Başka bir deyişle, TM, toz metalden net parçalar oluşturan bir metal şekillendirme işlemidir. Toz metalurjisi, ince toz halindeki malzemelerin karıştırılması, istenen bir şekle veya forma preslenmesi (sıkıştırma) ve ardından sıkıştırılmış malzemenin kontrollü bir atmosferde ısıtılarak malzemeye bağlanması (sinterleme) işlemidir. Sıkıştırma genellikle oda sıcaklığında gerçekleştirilir ve yüksek sıcaklıktaki sinterleme işlemi genellikle atmosfer basıncında gerçekleştirilir. İsteğe bağlı ikincil işleme, genellikle özel özellikler veya gelişmiş hassasiyet elde etmek için takip eder. TM'nin yüksek hassasiyetli şekillendirme kapasitesi, net şekle, karmaşık özelliklere ve iyi boyutsal hassas parçalara sahip bileşenler üretir. TM sürecinin benzersiz esnekliği, ürünlerin, kullanıcıların özel ihtiyaçlarına göre uyarlanmış malzemelerden yapılmasını sağlar. Bu yetenek, özel olarak seçilmiş malzemeleri kullanarak, parçanın mekanik özelliklerinde iyileştirmeler yapılmasını sağlar. TM süreci, diğer üretim süreçleriyle karşılaştırıldığında, en yüksek

hammadde kullanımına (%95'in üzerinde) ve bitmiş parçanın kilogramı başına en düşük enerji gereksinimine sahiptir. Çok az malzeme israfı ile yüksek hacimli üretim için uygundur. İkincil işleme neredeyse ortadan kalkar. CuAlNi alaşımı yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilmiştir. CuAlNi' nin en önemli kullanım alanı aktüatörlerdir. Bu alaşımlar en çok ince film olarak aktüatörler içerisinde kullanım alanı bulmaktadır. Yüksek sıcaklık uygulamalarında CuAlNi alaşımlarının aşınma dayanımları azalmaktadır.

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle CuAlNi karışımına farklı kütle oranlarında (%2,5, 5, 7,5 ve 10) B₄C partikülleri eklenerek kompozit numuneler oluşturulmuştur. Hazırlanan tozlar türbula cihazı ile 1 saat karıştırıldı. Karışımı gerçekleştirilen tozlar sıcak pres cihazı ile preslenmiş ve sinterlenmiştir. Sinterleme işlemi 850 °C'de 1 saat vakum ve argon gaz atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numunelerin mikro yapılarındaki değişimleri belirlemek için optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Üretilen kompozitlerin elemental ve kimyasal kompozisyonunu belirlemek için EDS ve XRF analizleri yapılmıştır. Örneklerde oluşan fazları ve belirlemek için X-ışını kırınımı (XRD) kullanılmıştır. B₄C partiküllerinin sertlik üzerindeki etkisini belirlemek için mikrosertlik (HV5) ölçümleri yapıldı. Mikroyapı sonuçları incelendiğinde, B₄C partiküllerinin mikroyapı içerisinde homojen olarak bir dağılım gerçekleştirdiği tespit edilmiştir. Hazırlanan numunelerin sertlik değerleri artan B₄C miktarı ile artmıştır. Ayrıca deneyler sonucunda en yüksek sertlik değeri olan 303.3 HV5 %10 B₄C ilave edilen numune için ölçülmüştür. Katkısız CuAlNi kompozitleri, %5 B₄C eklenen kompozitler ve %10 B₄C eklenen kompozitler aşınma testlerine tabi tutulmuştur. En iyi aşınma direnci %10 B₄C ilaveli kompozitte tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : B₄C, CuAlNi, Aşınma dayanımı.

Bilim Kodu : 91512

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF CHARACTERIZATION AND WEAR PROPERTIES OF B₄C REINFORCED CuAlNi COMPOSITE.

Berhan ŞAHİN

Karabuk University

Institute of Graduate Programs

Department of Metallurgy and Materials Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Mustafa YAŞAR

February 2022, 49 pages

Powder metallurgy (TM) is the process of forming metal parts by heating compressed metal powders just below their melting point. In other words, TM is a metal forming process that creates net pieces from powdered metal. Powder metallurgy is the process of mixing fine powder materials, pressing them into a desired shape or form (compression), and then bonding (sintering) the compressed material to the material by heating it in a controlled atmosphere. Compression is usually carried out at room temperature, and high temperature sintering is usually carried out at atmospheric pressure. Optional secondary processing often follows to achieve special features or enhanced precision. TM's high precision forming capability produces components with clear shape, complex features and good dimensional precision parts. The unique flexibility of the TM process allows products to be made from materials tailored to the specific needs of users. This capability enables improvements in the mechanical properties of the part, using specially selected materials. Compared to other

manufacturing processes, the TM process has the highest raw material usage (over 95%) and the lowest energy requirement per kilogram of finished part. It is suitable for high volume production with very little material wastage. Secondary processing is virtually eliminated. CuAlNi alloy was developed for high temperature applications. The most important usage area of CuAlNi is actuators. These alloys are mostly used in actuators as thin films. In high temperature applications, the wear resistance of CuAlNi alloys decreases.

In this study, composite samples were formed by adding B₄C particles in different mass ratios (2.5%, 5, 7.5 and 10) to the CuAlNi mixture by powder metallurgy method. The prepared powders were mixed with a turbula device for 1 hour. The mixed powders were pressed and sintered with a hot press device. The sintering process was carried out at 850 °C for 1 hour in vacuum and argon gas atmosphere. Optical microscope and scanning electron microscope (SEM) were used to determine the changes in the microstructure of the prepared samples. EDS and XRF analyzes were performed to determine the elemental and chemical composition of the produced composites. X-ray diffraction (XRD) was used to determine the phases formed in the samples. Microhardness (HV5) measurements were made to determine the effect of B₄C particles on hardness. When the microstructure results were examined, it was determined that the B₄C particles performed a homogeneous distribution in the microstructure. The hardness values of the prepared samples increased with increasing B₄C content. In addition, as a result of the experiments, the highest hardness value of 303.3 HV5 was measured for the sample to which 10% B₄C was added. Non-additive CuAlNi composites, 5% B₄C added composites and 10% B₄C added composites were subjected to abrasion tests. The best wear resistance was found in 10% B₄C added composite.

Key Word : B₄C, CuAlNi, Wear resistance.

Science Code : 91512

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Mustafa YAŞAR' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez çalışmamın her aşamasında fikir alışverişi yaptığım, karşılaştığım sorunlara farklı bir bakış açısı ile bakmamı sağlayan değerli hocam Hakkâri Üniversitesi Yüksekova Meslek Yüksekokulu Öğretim Üyesi Dr. Öğr. Üyesi Tayfun ÇETİN' e ve Karabük Üniversitesi Eskipazar Meslek Yüksekokulu Öğretim Üyesi Doç. Dr. Muhammet Emre TURAN hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak bana gösterdiği sabır, fedakârlık ve desteklerinden dolayı eşim Gizem ŞAHİN' e ve sevgili aileme maddi ve manevi hiçbir yardımı esirgemediğim yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| KABUL..... | ii |
| ÖZET..... | iv |
| ABSTRACT..... | vi |
| TEŞEKKÜR..... | viii |
| İÇİNDEKİLER | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | xii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xiii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | xiv |
| | |
| BÖLÜM 1 | 1 |
| GİRİŞ | 1 |
| | |
| BÖLÜM 2 | 4 |
| TOZ METALURJİSİ | 4 |
| 2.1. TOZ METALURJİSİ ÜRETİM TEKNİKLERİ | 5 |
| 2.1.1. Mekanik Yöntemler | 5 |
| 2.1.2. Elektroliz ile Toz Üretim Yöntemi | 8 |
| 2.1.3. Kimyasal Yöntemler ile Toz Üretim Yöntemi | 8 |
| 2.1.4. Atomizasyon Yöntemleri..... | 10 |
| 2.2. TOZ METALURJİSİ ÜRETİM İŞLEMLERİ | 12 |
| 2.2.1. Karıştırma veya Harmanlama | 12 |
| 2.2.2. Presleme..... | 13 |
| 2.2.2.1. Sıcak İzostatik Presleme | 13 |
| 2.2.3. Sinterleme | 14 |
| 2.2.4. İkincil İşlemler..... | 15 |
| | |
| BÖLÜM 3 | 16 |
| KOMPOZİT MALZEMELER..... | 16 |

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| 3.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI..... | 17 |
| 3.1.1. Matris Bileşenlerine Göre Kompozit Çeşitleri | 17 |
| 3.1.1.1. Polimer Matrisli Kompozit | 17 |
| 3.1.1.2. Metal Matrisli Kompozit..... | 18 |
| 3.1.1.3. Seramik Matrisli Kompozit..... | 18 |
| 3.1.2. Matris Bileşen Formlarına Göre Kompozit Çeşitleri..... | 18 |
| 3.1.2.1. Partikül Takviyeli Kompozitler..... | 18 |
| 3.1.2.2. Elyaf Takviyeli Kompozitler (Fibröz Kompozitler) | 19 |
| 3.1.2.3. Tabakalı Kompozitler..... | 19 |
| 3.2. BOR KARBÜR (B ₄ C)..... | 19 |
| 3.2.1. Bor Karbürün Özellikleri | 20 |
| 3.2.2. Bor Karbürün Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri | 22 |
| 3.2.2.1. Kimyasal Özellikler | 22 |
| 3.2.2.2. Fiziksel Özellikler | 23 |
| 3.2.3. Bor Karbürün Yapısal Özellikleri..... | 23 |
| 3.2.3.1. Sertlik | 23 |
| 3.2.3.2. Aşınma Direnci | 24 |
| 3.2.3.3. Yoğunluk..... | 24 |
| 3.2.3.4. Elektriksel Direnç..... | 24 |
| 3.2.3.5. Mekanik Özellikler..... | 25 |
| 3.2.4. B ₄ C‘ün Üretim Yöntemleri..... | 25 |
| 3.2.4.1. Karbotermik Yöntemle B ₄ C Üretimi | 25 |
| 3.2.4.2. Endüstriyel Karbotermik B ₄ C Üretimi..... | 26 |
| BÖLÜM 4 | 27 |
| DENEYSEL ÇALIŞMALAR | 27 |
| 4.1. DENEYSEL YÖNTEM | 27 |
| 4.1.1. Numunelerin Hazırlanması | 28 |
| 4.1.2. Numunelerin Mikroyapı İncelemesi | 30 |
| 4.1.3. Numunelerin Mikrosertlik Ölçümü..... | 31 |
| 4.1.4. Numunelerin Aşınma Ölçümü | 32 |

| | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| BÖLÜM 5 | 34 |
| DENEYSEL SONUÇLAR | 34 |
| 5.1. NUMUNELERİN OPTİK MİKROSKOP VE SEM GÖRÜNTÜ SONUÇLARI | 34 |
| 5.2. NUMUNELERİN EDS ANALİZ SONUÇLARI | 36 |
| 5.3. NUMUNELERİN XRF VE XRD ANALİZ SONUÇLARI | 39 |
| 5.4. NUMUNELERİN MİKROSERTLİK ANALİZ SONUÇLARI | 40 |
| 5.5. NUMUNELERİN AŞINMA ANALİZ SONUÇLARI | 41 |
| | |
| BÖLÜM 6 | 43 |
| GENEL SONUÇLAR | 43 |
| | |
| KAYNAKLAR | 45 |
| | |
| ÖZGEÇMİŞ | 49 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1. Öğütme yönteminin şematik gösterimi | 6 |
| Şekil 2.2. Darbeli yöntem ile toz üretiminin şematik gösterimi..... | 7 |
| Şekil 2.3. Mekanik alaşımla elemanları ve öğütme süresi ile değişen tozların şematik gösterimi | 7 |
| Şekil 2.4. Elektroliz bölümünün şematik gösterimi | 8 |
| Şekil 2.5. Düşey gaz atomizasyon sisteminin şematik gösterimi..... | 11 |
| Şekil 2.6. Toz metalurjisi üretim işlem basamakları. | 12 |
| Şekil 2.7. Sıcak izostatik pres yönteminin şematize edilmiş gösterimi..... | 13 |
| Şekil 3.1. Kompozit malzeme | 17 |
| Şekil 3.2. Rhombohedral B ₄ C birim hücre yapısı | 21 |
| Şekil 3.3. Bor/karbon oranının sertlik üzerinde etkisi..... | 22 |
| Şekil 4.1. Turbula karıştırma makinesi..... | 28 |
| Şekil 4.2. PLC kontrollü sıcak pres makinesi..... | 29 |
| Şekil 4.3. Numunelerin presleme sonrası makro görüntüsü..... | 29 |
| Şekil 4.6. CARL ZEISS ULTRA PLUS GEMINI FESEM analiz cihazı..... | 31 |
| Şekil 4.7. Rıgaku XRD(a) ve XRF(b) analiz cihazları | 31 |
| Şekil 4.9. UTS Tribometer T 10/20 marka Aşınma Cihazı..... | 33 |
| Şekil 5.1. CuAlNi matris yapıllı saf numunenin optik ve SEM mikroyapı görüntüleri | 34 |
| Şekil 5.6. CuAlNi kimyasal bileşime sahip numunenin EDS analiz sonucu | 37 |
| Şekil 5.7. %2,5 B ₄ C ilaveli CuAlNi numunenin SEM-EDS analiz sonucu | 37 |
| Şekil 5.8. %5 B ₄ C ilaveli CuAlNi numunenin SEM-EDS analiz sonucu | 38 |
| Şekil 5.9. %7,5 B ₄ C ilaveli CuAlNi numunenin SEM-EDS analiz sonucu | 38 |
| Şekil 5.10. %10 B ₄ C ilaveli CuAlNi numunenin SEM-EDS analiz sonucu..... | 39 |
| Şekil 5.11. XRD deney sonucu | 40 |
| Şekil 5.11. CuAlNi ve B ₄ C takviyeli CuAlNi numunelerin mikrosertlik sonuçları.. | 41 |
| Şekil 5.12. CuAlNi, %5 ve %10 B ₄ C takviyeli CuAlNi numunelerin aşınma sonuçları | 42 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| Çizelge 3.1. Bor karbürün genel özellikleri | 20 |
| Çizelge 4.1. CuAlNi kompozit karışımının kimyasal bileşimi | 27 |
| Çizelge 4.2. Kompozit malzemelerin üretim parametreleri | 27 |
| Çizelge 4.2. Aşınma test parametreleri | 33 |
| Çizelge 5.1. XRF deney sonucu | 39 |
| Çizelge 5.3. Aşınma analiz sonuçları | 42 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

| | |
|----------------------|------------------|
| Fe | : Demir |
| Mn | : Mangan |
| Cu | : Bakır |
| Ag | : Gümüş |
| C | : Karbon |
| O | : Oksijen |
| μm | : mikrometre |
| $^{\circ}\text{C}$ | : santigrat |
| Al | : Alüminyum |
| Ni | : Nikel |
| Zr | : Zirkonyum |
| Si | : Silisyum |
| N | : Azot |
| W | : Tungsten |
| Co | : Kobalt |
| Ti | : Titanyum |
| g | : Gram |
| mol | : Molarite |
| cm^3 | : santimetre küp |
| B | : Bor |
| B_4C | : Bor karbür |

KISALTMALAR

| | |
|-----|--|
| HIP | : Hot Izostatic Pres (Sıcak İzostatik Pres) |
| TM | : Toz Metalurjisi |

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Bazı alaşımların sıcaklık değişimleri ve gerilmelerin etkisi altında şekillerini değiştirdikleri ve deformasyon yoluyla orijinal şeklini geri kazandıkları (şekil hafıza etkisi) bir olgu olan şekil hafıza etkisi, günümüz endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil hafıza etkisi, çok farklı özelliklere sahip numuneler üretme olasılığını arttırması ile bu alaşımların çok çeşitli uygulamalarını kapsar [1, 2]. Şekil hatırlama ilk olarak 1938'de gözlemlenmiştir. Bu olay 1951'de Au-Cd alaşımında ve 1953'te In-Ti alaşımında gözlenmiştir. Şekil hatırlama olayının pratik uygulaması 1963'te Ni-Ti alaşımında gerçekleştirilmiştir [3].

Toz metalurjisi, ince toz halindeki malzemelerin karıştırılması, istenen bir şekle veya forma preslenmesi (sıkıştırma) ve ardından sıkıştırılmış malzemenin kontrollü bir atmosferde ısıtılarak malzemeye bağlanması (sinterleme) işlemidir. Sıkıştırma genellikle oda sıcaklığında gerçekleştirilir ve yüksek sıcaklıktaki sinterleme işlemi genellikle atmosfer basıncında gerçekleştirilir. İsteğe bağlı ikincil işleme, genellikle özel özellikler veya gelişmiş hassasiyet elde etmek için takip eder. TM'nin yüksek hassasiyetli şekillendirme kapasitesi, net şekle, karmaşık özelliklere ve iyi boyutsal hassas parçalara sahip bileşenler üretir. Günümüz sanayisinde kullanılan üretim yöntemleri arasında toz metalurjisi (TM) ile hazırlanan Cu-Al-Ni alaşımları dikkat çekicidir. Alaşımın kimyasal bileşiminin kontrolü TM yöntemi ile sağlanabilir. Bu nedenle, TM sürecinin benzersiz esnekliği, ürünlerin, kullanıcıların özel ihtiyaçlarına göre uyarlanmış malzemelerden yapılmasını sağlar. Bu yetenek, özel olarak seçilmiş malzemeleri kullanarak, parçanın mekanik özelliklerinde iyileştirmeler yapılmasını sağlar. TM süreci, diğer üretim süreçleriyle karşılaştırıldığında, en yüksek hammadde kullanımına (%95'in üzerinde) ve bitmiş parçanın kilogramı başına en düşük enerji gereksinimine sahiptir. Çok az malzeme israfı ile yüksek hacimli üretim için uygundur. Hafiflik ve mukavemet açısından başarılı olan Cu-Al-Ni alaşımları ile mekanik özellikleri çok iyi olan kompozitler üretilmektedir. Bu çalışmanın amacı, toz

metalurjisi prosesi ile üretilecek Cu-Al-Ni alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerine B₄C partikül ilavesinin etkisini araştırmaktır. Bu çalışmada, sabit pres basıncında preslenen ve sabit sıcaklıkta sinterlenen B₄C takviyeli Cu-Al-Ni kompozitlerin mikroyapı ve mekanik özelliklerindeki değişimler karşılaştırılmıştır.

Cu-Al-Ni ve alaşımları, mükemmel ısı direnci, korozyon direnci, tokluğu ve mukavemeti nedeniyle havacılık, otomotiv ve biyomedikal gibi alanlarda yüksek mühendislik ürünü alaşımlar olarak tercih edilmektedir [4-9]. Ayrıca bu malzemeler makine teçhizatı ve inşaat malzemeleri, tıbbi cihaz ve araçlar gibi endüstriyel ve tıbbi uygulamalarda olduğu gibi elektronik cihazlar, uzay aracı gibi gelişmiş uygulamalarda ve süperelastik gözlük çerçeveleri ve telefon antenleri gibi günlük hayatı kolaylaştıran birçok üründe kullanılmaktadır [10,11]. Son yıllarda robotik uygulamalarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak Cu-Al-Ni ve alaşımlarının endüstriyel kullanımında mekanik özellikler ve aşınma davranışı açısından sorunlar ortaya çıkmaktadır [12]. Cu-Al-Ni alaşımının mekanik özellikleri ve aşınma özellikleri düşük olduğundan bu sorunları çözmek için toz metalurjisi kullanılarak B₄C partikülleri ile güçlendirilecektir. İmalatı yapılacak numunelerin aşınma direnci ve mekanik özellikleri iyileştirildikçe sektörde ihtiyaç duyulan bir boşlukta doldurulmuş olacaktır.

Bu çalışmada Cu-Al-Ni alaşımına farklı oranlarda (%2,5, %5, %7,5 ve %10) B₄C parçacıkları ilave edilerek toz metalurjisi yöntemiyle üretimi amaçlanmıştır. Bu amaçla, öncelikle Cu, Al ve Ni toz karışımı hazırlanıp ardından belirlenen oranda B₄C parçacıkları eklenmiştir. Hazırlanan tozlara üç boyutlu turbula ile 1 saat karıştırma işlemi yapılmıştır. Karıştırma işlemi sonrasında tozlara sıcak izostatik presleme işlemi yapılmıştır. Sinterleme sonrasında numunelere metalografik işlemler sırasıyla zımparalama, parlatma ve dağlama 3 aşamada uygulanmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yüzey mikro yapısal görüntü resimleri alındıktan sonra Enerji Dispersiv Spektrum (EDS) analizi ile numunelerin yüzeylerinde tespit edilen bazı noktalardan EDS analizleri yapılmıştır. Deney numunelerine XRD ve XRF analizleri de yapılarak sinterleme sonrası kimyasal bileşimi hakkında sonuç elde edilmiştir. Ayrıca üretilen numunelerin bileşimlerine eklenen B₄C tozuna bağlı olarak ortaya çıkan sertlik değerlerinin nasıl etkilendiği mekanik bir özellik olarak araştırılmıştır. Numunelerin sertlik ölçümlerinde mikrosertlik ölçüm metodu kullanılmıştır. Elde

edilen sonuçlar ile literatürde bulunan benzer malzemeler üzerinden karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

BÖLÜM 2

TOZ METALURJİSİ

Günümüzdeki toz metalurjisinin başlangıç tarihi, 1829 yılında Wollaston isimli bilim adamı tarafından çözeltilerde platin-amonyak klorür çökmesi ile platin sünger tozundan bitmiş ürün olarak sıkıştırılmış platin üretilmesi olarak kabul edilmektedir. 1980'li yıllara gelindiğinde hızlı katılaştırma, mekanik alaşımlama ve enjeksiyon aşamaları gibi önemli toz işlemlerinin geliştirilmesi ile güncel toz metalürjisi farklı ürün yelpazesi ile geleneksel imalat yöntemlerinin yerini tutmaya başlamıştır [13].

Malzeme üzerine çalışan bilim insanları geleneksel imalat yöntemleriyle üretilen malzemelerden aranan özelliklerin tamamının bir arada bulunmaması ve üretimin ekonomik duruma uygun olmaması gibi nedenlerden ötürü, daha iyi özelliklerde ve aynı zamanda ekonomik duruma uygun malzeme arayışı içerisine girmişlerdir. Malzemelerde aranan fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler, malzemenin komponentlerinin özellikleri ile belirlenmektedir. Bu yüzden, daha iyi özellikli malzemelere olan ihtiyaç artmıştır. Bu özelliklerdeki malzemelerin ihtiyacından dolayı metal temelli tozlar daha da önem kazanmıştır [14]. Genellikle temelinde demir bulunan malzemelerin üretiminde kullanılan toz metalurjisi, otomotiv sektöründe çokça kullanılan bir yöntem olmuştur. Toz metalurjisi otomotiv sektörü haricinde de birçok sektör içerisinde kullanılmaktadır. Örneğin uzay ve havacılık sektöründe yakıt elemanlarında, jet motorların parçalarında, uçakların fren balatalarında, roketlerin yakıtlarında, yüksek sıcaklıkta kullanılan filtrelerde kullanılır. Savunma sanayinde ise patlayıcıların içeriğinde, silahların parçalarında ve zırh delici özel mermilerin üretiminde kullanılmaktadır [15,16].

Toz metalurjisi, çok küçük boyutlarda seramik veya metal tozlarının birbirine bağlanmasıyla oluşturulan ürünün bitmiş haline yakın malzeme üretim yöntemidir. Üretimde kullanılan tozların boyutsal büyüklükleri, imalatı ve elde edilen malzemenin

kullanıma uygunluğu gibi parametreler, toz metalürjisi yöntemini kapsamaktadır. Toz metalürjisindeki amaçlanan hedef, metal malzemeleri toz haline getirmek ve elde edilen bu tozları belirli basınç altında sıcaklık kullanılarak veya kullanılmaksızın presleyerek istenilen özellikleri kazandırmak için uygulanan sinterleme prosesi ile bitmiş ürün üretimidir [17].

2.1. TOZ METALURJİSİ ÜRETİM TEKNİKLERİ

Dünyada bulunan elementlerin büyük bir çoğunluğu toz haline belirli işlemler sonucunda getirilebilmektedir. Toz metalürjisinde parça üretiminde adından da anlaşıldığı üzere element tozları kullanılmaktadır. Bu parçacıkların şekli boyutları ve kimyasal bileşimi çok önem arz etmektedir. Üretilen tozlar çeşitli boyutlarda ve geometrilere olabilmektedir. Tozların boyutları, maliyeti, mikroyapıları ve geometrik şekilleri gibi bazı özellikleri üretildiği yönteme göre farklılık gösterebilmektedir. Toz üretiminde yaygın bir biçimde atomizasyon, mekanik alaşımlama, öğütme, elektroliz ve oksit indirgeme gibi mekanik ve kimyasal yöntemler kullanılmaktadır [18]. Toz üretim yöntemleri şu şekilde sıralanır.

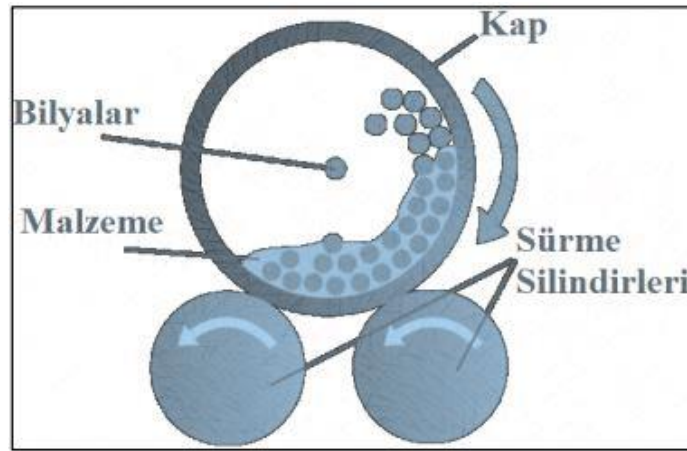
- Mekanik Yöntemler
- Elektroliz ile Toz Üretim
- Kimyasal Yöntemler ile Toz Üretimi
- Atomizasyon Yöntemleri

2.1.1. Mekanik Yöntemler

Malzeme üzerine kesme, basma, darbe, aşındırma ve sıkıştırma olarak uygulanan temelde dört mekanik yöntem bulunmaktadır. Öğütme ile bir aşındırmanın ve bir aşınmanın birlikte olduğu bir sistemde, birbirlerine uyguladıkları sürtünme kuvvetinin etkisi ile toz parçacıklarının boyutları küçülmektedir. Talaşlı imalat yöntemlerinden olan kesme metodu ile malzeme parçalara ayrılabilir. Malzemenin üzerine uygulanan anlık bir darbe veya darbeler ile iri tanelerin boyutlarında bir azalma sağlanmaktadır. Son olarak basma kuvvetinin uygulandığı bir malzeme kırılma noktasını aşarak toz haline gelmektedir [19].

Talaş kaldırma yöntemlerinden taşlama, frezeleme ve tornalama tekniklerini kullanarak büyük boyutlarda ve karmaşık şekillerde ki tozlar üretilebilmektedir. Talaşlı imalat işlemlerinden sonra arta kalan malzeme artığı ve talaş sayesinde kaba tozların üretimi ve metal tozlarının geri dönüşümü gerçekleştirilmektedir. Elde edilen malzeme artığı ve talaşlar çeşitli kimyasallar yardımıyla temizlenir ve ardından kaba taneler öğütme işleminden geçirilerek ince taneli hale getirilmektedir. Özellikle yüksek karbon oranlı çeliklerin imalatı bu yöntemle gerçekleştirilmektedir [15].

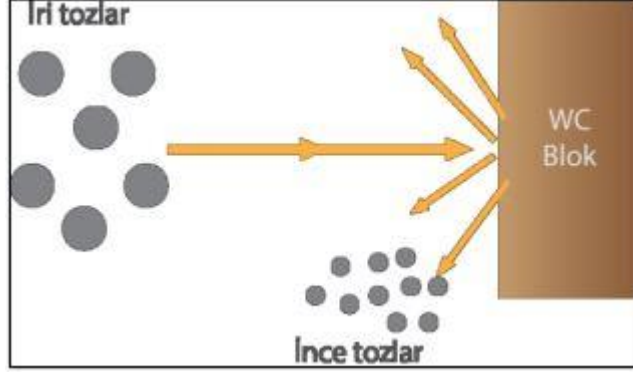
Öğütme yönteminde çekiçler, çubuklar ve bilyeler yardımı ile mekanik darbe işlemine tabi tutularak, metal malzemelerden ince tane yapılı tozlar üretilmektedir. Talaşlı imalattan veya diğer darbeli yöntemler sonucunda elde edilen kaba tane yapılı toz tanelerinin ebatlarının küçültülmesinde öğütme yöntemi kullanılmaktadır. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi, öğütme işleminde ilk aşama olarak bir öğütme hücresi veya kabında aşınmaya karşı dayanıklı bilyelerle birlikte kabın içerisine kaba taneli tozlar yerleştirilir [20].



Şekil 2.1. Öğütme yönteminin şematik gösterimi [21].

Darbe yönteminde hedeflenen olay, diğer toz üretim yöntemleri ile elde edilen istenilen ebattan büyük tozların tane boyutlarını istenilen ebata yaklaştırmak veya ulaştırmaktır. Bu yöntemde istenilenden büyük taneli tozlar, yüksek basınç altındaki yeterince sert WC bloklara çarptırılarak işlem gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.2’de gösterildiği üzere bloğa çarpan istenilenden büyük taneli tozların küçülmesi sağlanmaktadır. Fakat bu çarpma olayının etkisi ile ortamda bir ısı meydana

gelmektedir. Bu yüzden, bu yöntem koruyucu gaz bulunan ortamda kontrollü olarak yapılmaktadır [22].



Şekil 2.2. Darbeli yöntem ile toz üretiminin şematik gösterimi [22].

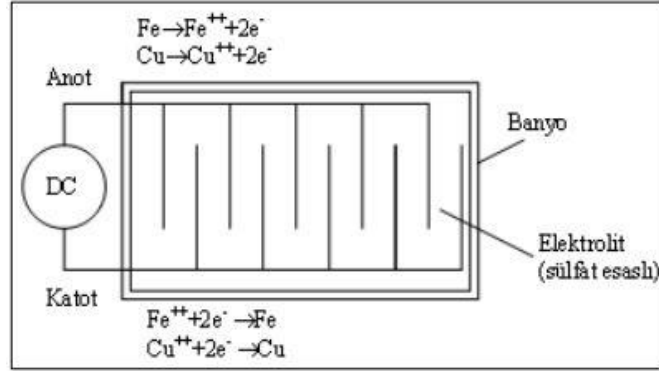
Mekanik alaşımlama yöntemi sisteminde, öğütme bilyeleri ve bu bilyelerin yerleştirildiği bir kap ve öğütülecek tozların karıştırılmasını için hareketi sağlayan bir şaft bulunmaktadır. Mekanik alaşımla işleminde, büyük ebatlardaki tozların bilyeler arasına girerek ebatlarının küçültülmesi hedeflenmektedir. Mekanik alaşımlamanın elemanları ve öğütme işleminin süresine bağlı olarak fazların matris içerisinde homojen olarak dağılım şekli Şekil 2.3'te gösterilmektedir [15].



Şekil 2.3. Mekanik alaşımla elemanları ve öğütme süresi ile değişen tozların şematik gösterimi [15].

2.1.2. Elektroliz ile Toz Üretim Yöntemi

Elektroliz yöntemi ile sinterleme, presleme ve yüksek iletkenlik yeteneğine sahip metal tozlarının imalatı yapılmaktadır. Bu yöntem, özellikle saflık derecesi yüksek Fe, Mn, Cu ve Ag tozlarının imalatında kullanılmaktadır.



Şekil 2.4. Elektroliz bölümünün şematik gösterimi [23].

Gerekli çalışma şartları oluştuğunda, elektroliz bölümündeki katot üzerinde saf tozlar biriktirilebilmektedir. Şekil 2.4'te, Fe ve Cu için elektroliz bölümünün şematize edilmiş gösterimi verilmektedir. Üretilmek istenen tozların yapısında bulunan malzeme elektroliz banyosunun içerisine uygun bir biçimde yerleştirilmektedir. Ardından bu banyoya elektrik akımı uygulaması yapılmaktadır. Uygulanan elektrik akımı sayesinde anottaki malzemenin çözünmesini sağlamak hedeflenmektedir. Anotta çözünen metal, katot üzerinde tortu biçiminde birikerek toplanmaktadır. Elde edilen bu metal parçalarının yapısı dendritiktir. Katot üzerinde birikmiş olan metal toplanır, kurutulur sonrasında toz haline getirilmek için öğütme işlemine tabi tutulur. Öğütülen tozlar üzerinde oluşan gerilmeleri ve uçucu materyalleri gidermek için tavlama işleminden geçirilir. Tavlama işleminin asal gaz ortamında yapılmasının başlıca nedeni oksidasyonun gerçekleşmesini önlenmektir [24].

2.1.3. Kimyasal Yöntemler ile Toz Üretim Yöntemi

Bu yöntemde üretilmek istenen metal tozları katı, sıvı ve gaz ile uygulanan tepkimeler ile üretilmektedir. Birçok metal tozunun üretimi bu yöntem sayesinde yapılabilmektedir. Tepkimelerin değişkenlerinde yapılan değişiklikler ile tozların

boyut ve şekil gibi başlıca özellikleri kolaylıkla belirlenebilmektedir. Birçok toz kimyasal yöntem ile üretilmektedir. En yaygın ve genel olarak kullanılan yöntemler oksit indirgeme, sıvı fazdan çöktürme ve ısı bozunma yöntemleridir [15].

Oksit indirgeme yöntemi ile metal oksitlerden oksit bağı kesilerek uzaklaştırıp metal tozları üretilmektedir. Öğütülmüş ve manyetik olarak ayrıştırılmış oksit, kireç taşı ve grafit gibi indirgeyici özellikte malzemeler ile birlikte karıştırılmaktadır. Bu karıştırma işleminden sonrasında, ısıtma işlemine tabi tutulmaktadır. Genellikle bu olayda CO (karbon monoksit) gibi gazlar ortaya çıkmakta ve bu ortaya çıkan gazlar ile birlikte oksit indirgenmektedir. Ayrıca öğütülmüş oksidin, ısıtılmış hidrojenle yaptığı temas ile de oksit indirgenmektedir.

Oksit indirgeme yöntemi kapsamında alaşım tozlarının imalatı yapılamamaktadır. Ayrıca oksit ne kadar saf derecede ise metal tozları da o derece saflıkta olmaktadır. Bu yöntem sayesinde boyut kontrolü ve parçacıklı toz imalatı yapılabilmektedir [25].

Sıvı fazdan çöktürme yöntemi sayesinde yüksek saflık derecesinde tozlar üretilmektedir. Bu kimyasal yöntem başlamadan önce, yapıda aranan özellikte ki malzemeleri içeren bir çözelti hazırlanmaktadır. Çözeltiye çöktürme işlemi uygulanarak veya çözücünün buharlaştırılması yöntemiyle toz elde edilmektedir. Çökelmenin işleminin sağlanabilmesi için birçok yöntem vardır. Çözeltideki çöktürücü oranı artırılarak, basınç veya sıcaklık artırılması ile çökelme işlemi gerçekleştirilebilmektedir [21].

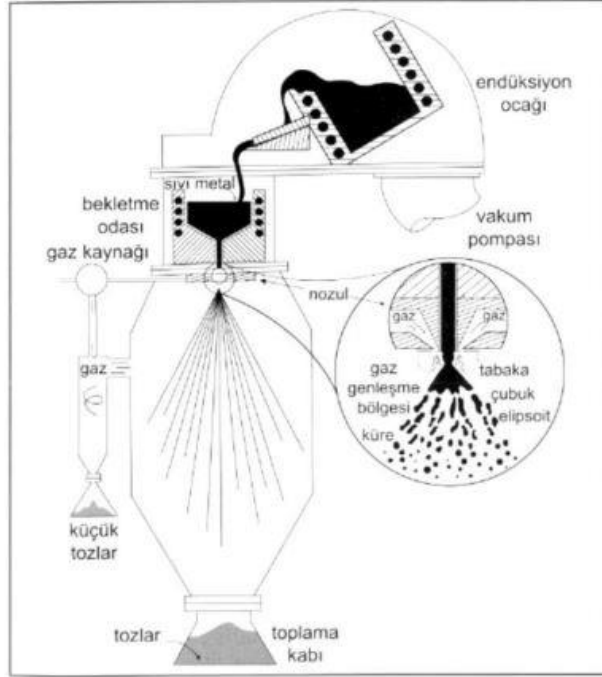
Kimyasal yöntemlerden birisi olan ısı bozunma yönteminde tozlar, buhar yoğunlaştırılması ve buhar bozunması ile üretilmektedir. Bozunma işlemi sonucunda metalik malzemelerin tozları üretilmektedir. İşlem sırasında ilk önce malzeme CO (karbon monoksit) ile tepkimeye girmektedir. Bu tepkimenin gerçekleşebilmesi için sıcaklık artırılırken, basınç azaltılmaktadır. Bu şekilde ayrışma işlemi başlatılmaktadır. Ardından soğutma işlemine tabi tutulur ve damıtma işlemi ile malzemenin saflaştırılması sağlanmaktadır. Aranan özelliklerdeki tozun elde edilebilmesi için ise sıvı bir katalizör kullanılmaktadır. Bu katalizör vasıtasıyla son ısıtma işlemi yapılarak, buhar bozunması ile ürün elde edilmektedir [25,26].

2.1.4. Atomizasyon Yöntemleri

Günümüzde metal tozlarının imalatının büyük çoğunluğu, atomizasyon yöntemleri kullanılarak yapılmaktadır. Atomizasyon yöntemi, ergimiş metalin potadan akıtılarak basınçlı gaz veya sıvı püskürtülüp sıvı damlacıkları haline getirilmesi olayına dayanmaktadır. Bu yöntem ile 150µm' den küçük, farklı boyutlarda ve şekillerde toz üretilmektedir. Bu yöntem element tozlarının yanı sıra alaşımlarında üretilmesine imkân tanımaktadır. Atomizasyon yönteminde tozun kimyasal yapısının, şeklinin ve boyutunun kontrol altında yapılabilmesi ve bu yöntemin diğer yöntemlere göre daha hızlı olması sebebiyle en çok tercih edilen yöntemdir. Atomizasyon yönteminde gaz atomizasyonu, su atomizasyonu ve santrifüj atomizasyonu olmak üzere farklı tip atomizasyon yöntemleri bulunmaktadır [26,27].

Gaz atomizasyonu metodunda ergitilen metal argon, nitrojen ve oksijen gibi yüksek hızlı gazlar vasıtası ile toz haline getirilmektedir. Sistemde gazın yüksek hız ve basınçla çıkışı, sıvı metal ile teması, gazın çok hızlı genleşmesi sebebiyle enerji sıvı metale aktarılmaktadır. Bu şekilde sıvı metalin damla damla çok küçük olarak parçalanması ve katılaşması sağlanmaktadır [21]. Düşük sıcaklığın kullanıldığı toz üretilen atomizasyon sistemleri yatay sistemler olarak adlandırılmaktadır. Nozul adı verilen gaz üflecinden çıkan gaz, yüksek hız ve basıncın etkisi ile metali genleşme bölgesine çekmektedir. Gazın hızı ve basıncı arttıkça oluşan damlacıkların boyutu da küçülmektedir [23].

Yüksek sıcaklık kullanılarak toz üretilen atomizasyon sistemleri ise, dikey sistemler olarak adlandırılmaktadır. Bu sistemde üretilen tozlarda oksidasyon olayının önüne geçmek için asal gazlarla dolu, kapalı bir alan kullanılmaktadır. Bu yöntemde sıvı metal, ergime sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa ısıtılmakta ve ardından soğuk nozula aktarılmaktadır. Sıvı metalin aktığı yöne dik şekilde bulunan nozuldaki gaz üflenmesi sonucunda toz elde edilmektedir. Düşey gaz atomizasyon sisteminin şematize edilmiş gösterimi, Şekil 2.5'te verilmiştir.



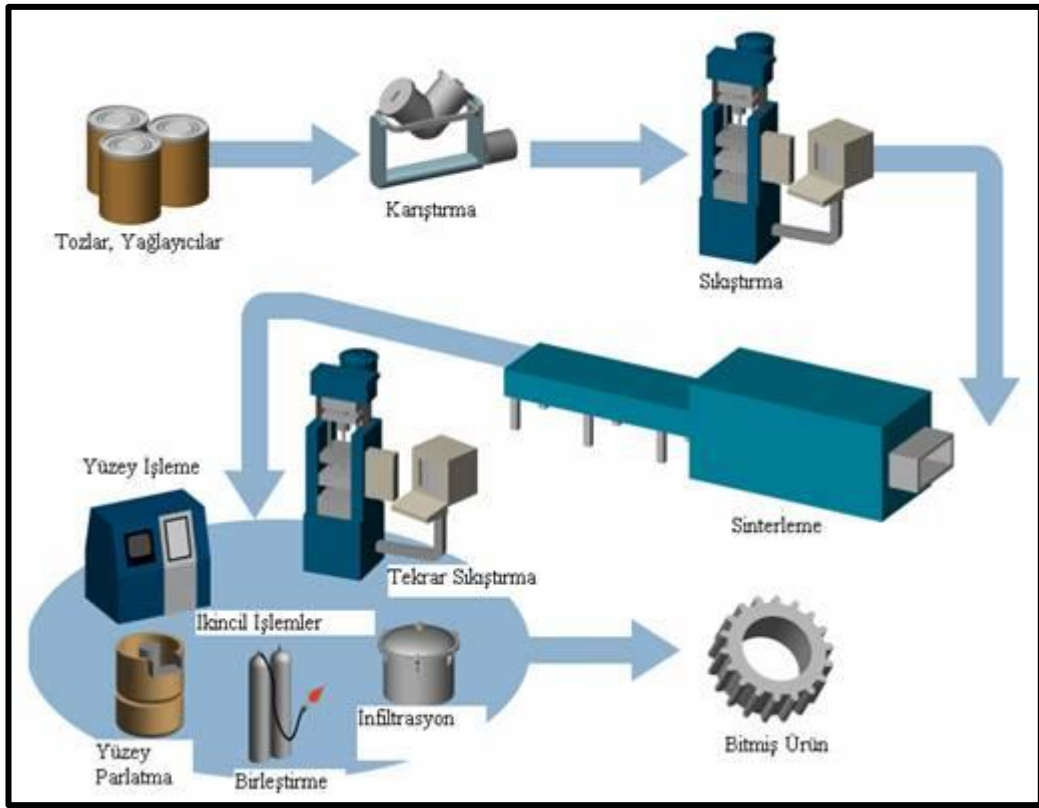
Şekil 2.5. Düşey gaz atomizasyon sisteminin şematik gösterimi [23]

Su atomizasyon yönteminde ise ergitilen metal, su veya yağ jeti yardımıyla toz haline getirilmektedir. Atomizasyonda ergime sıcaklığı 1600 °C veya altı ve reaktifliği düşük malzemeler için tercihen su kullanılmaktadır. Gaz atomizasyon işleminde olduğu gibi sıvı metalin tankın dip tarafına doğru hareketi sırasında, gaz yerine su jetleri kullanılarak parçalanması sağlanmaktadır. Oluşan damlacıklar gaz atomizasyon yöntemine göre daha hızlı soğudukları için, kullanılan tank boyutları daha kısa olarak tasarlanıp imal edilmektedir. Su atomizasyonunda tozların yüzeylerinde oluşan oksitleri gidermek için ve boyut dağılımı gibi aranan özellikleri elde etmek için, ek işlemlere tabi tutulmaktadır.

Santrifüj atomizasyon yönteminde döner elektrotun uç tarafında ergitilen metal, merkez kaç kuvvetinin de yardımı ile toz haline getirilmektedir. Bu yöntem yardımı ile reaktif malzemeler ve ergime sıcaklık derecesi çok yüksek olan tozların üretimi yapılmaktadır [18]. Bu yöntemde üretilmesi amaçlanan toz ile aynı malzemedan yapılmış elektrot ve tungsten elektrot kullanılmaktadır. Ergime ile birlikte dönen mil sayesinde, sıvı metal parçalanarak tanka toplanmaktadır. Oksidasyon oluşumunun önüne geçmek için asal gaz veya vakum ortamında atomizasyon yapılmaktadır [28].

2.2. TOZ METALURJİSİ ÜRETİM İŞLEMLERİ

Toz metalurjisi, hammadde seçimi ile başlayan ve nihai ürün haline gelene kadar devam eden bir süreci içerir. Toz Metalurjisi işlemi çok karmaşık ürünlerin üretilmesini sağlar. İlk aşama toz seçimi ile başlar. Seçilen toz, üretilecek parçanın gereksinimlerine göre seçilir. Tozun özellikleri, üretilecek parçanın özellikleri için önemlidir. Toz metalurjisi ile üretim de belirli aşamalardan geçen bir akış şemasına sahiptir.



Şekil 2.6. Toz metalurjisi üretim işlem basamakları.

2.2.1. Karıştırma veya Harmanlama

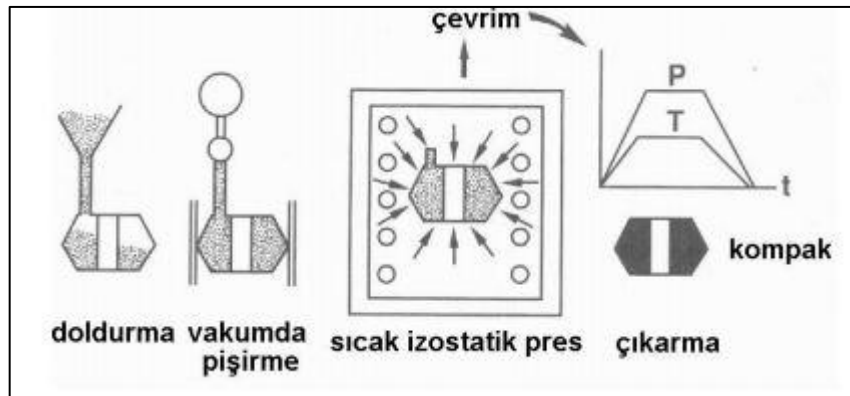
Ham toz, bazı alaşım elementleri ve yağlayıcı veya bazı özel katkı maddeleri eklenerek karıştırılır. Homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırma yapılır. Bu kompozisyon malzemenin özelliklerinin belirlenmesinde büyük önem taşımaktadır. [29,30]

2.2.2. Presleme

Bu aşamanın amacı, elde edilen toz karışımın kalıplara konularak istenilen şekil ve boyuta getirilmesidir. Şekillendirme, yeterli yoğunluk ve kuvvette mekanik veya hidrolik basınçlarla gerçekleştirilir. [31,32]

2.2.2.1. Sıcak İzostatik Presleme

Sıcak izostatik presin kullanıldığı işlemler, maksimum ömürlü olması istenen kalıplar, takımların uç malzemelerinden tutun havacılık ve uzay sanayisi bileşenlerine kadar piyasadaki birçok malzeme için elzem bir durumdaki imalat tekniğidir. Sıcak izostatik pres yönteminde basınç, gaz aracılığıyla üç eksenenden eş eksenel biçimde üretilmek istenen malzemeye uygulanır ve işlem gerçekleşir (Şekil 2.7.).



Şekil 2.7. Sıcak izostatik pres yönteminin şematize edilmiş gösterimi.

Kullanılacak olan basınç miktarı, kalıp içine gönderilen gaz miktarı ile belirlenmektedir. Bu işlemin ana değişkenleri sıcaklık, zaman ve basınçtır. Sinterlenmesi istenen malzeme iki farklı şekilde sisteme koyulabilir; toz halinde veya önden sinterleme işlemine tabi tutularak. Kapalı gözenek yapısına önden sinterlenmiş olan malzemelerin daha sonrasında sıcak izostatik presleme işlemi (Hot Isostatic Pressing) sinter-hip şeklinde de adlandırılabilir. Buradaki hedef, numunenin kendisini taşıyacak mukavemet noktasına ulaştıktan sonra sıcak izostatik preslenmesidir. Direkt olarak metal tozlarının beslendiği diğer yöntemde metal ya da cam kalıplar kullanılabilir. Kalıbın imal edileceği malzemenin belirlenmesinde en önemli değişken

etkin sinterleme sıcaklığı altında kalıbın basıncı aktaracak deformasyonu gösterebilmesi yeteneğidir. Titanyum, camlar, çelikler, paslanmaz çelikler veya tantalyum en yaygın olarak kullanılan kalıp malzemeleri olarak bilinmektedir. Yapılacak olan bu işlem esnasında kalıp, sinterleme işlemine tabi tutulacak malzeme ile doldurulur. Vakum altına alınan bu sistem degazing işleminden geçirilerek buharlaşmış olan ürünler sistemden uzaklaştırılır. Sistemdeki vakumlama ve gaz boşaltma prosesinden sonraki aşama sistemin vakumlama olayı ile sızdırmazlık özelliği kazandırılmasıdır.

Ortamda hiç gaz kalmaması için çaba sarf edilmelidir zira bu çok önemlidir. Çünkü ortamda kalabilecek istenmeyen gaz, sinterlenecek olan bu malzemede gözenek oluşturma ihtimalinin olduğu anlamına gelir. Tozların içerisinde olacağı bu sistem içten ısıtılmalı olan bir tertibat içerisinde olacaktır. Yoğunlaşmanın gerçekleşebilmesi için ihtiyaç duyulan ısının ve basıncın aktarımı, yüksek şiddette basıncı olan bir gaz türü kullanılır. Amaçlanan bu hedef doğrultusunda genellikle argon veya azot gazının kullanılması uygundur. Bu sistem için genellikle tercih edilip kullanılan maksimum sıcaklığı 2200°C'dir. Bu işlemde basınç oldukça fazla değişkenlik göstermektedir.

Bu metot; Al_2O_3 , ZrO_2 , Si_2N_3 gibi seramik malzemelerin; WC-Co, TiC-Fe, Al_2O_3 - ZrO_2 gibi kesici özellikteki takımların uçlarının; nikel ve titanyum alaşımlarının kullanıldığı havacılık ve uzay sanayisi malzemelerinin, kompozitlerin, alaşım çeliklerinin, elektrik ve elektronik sanayinde kullanılan seramiklerin imalatında kullanılmaktadır. Bu örneklerden de anlaşılacağı üzere üretim hedeflerinde ki olayın ne arz ettiği yüksek derecede önemli bir noktadır. Maksimum ömür ve yüksek performans amacı taşıyan malzemeler açısından oldukça kullanışlıdır. Bilhassa sıcak izostatik presleme sistemlerinde imalat hattında geçen süre çok uzundur. Zahmet derecesi ve maliyet giderleri yüksek olan bir sistem çeşididir [34,35].

2.2.3. Sinterleme

Bu proses adımı, parçaların erime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta koruyucu bir atmosferde ısıtılmasını içerir. İşlem sonucunda parçadaki gözenekli yapı ortadan

kalkar ve stabil bir şekilde mukavemet ve rijitlik kazanır. Ayrıca toz parçacıklarının yapısında bağ oluşumu, kristalleşme ve büyüme görülür. [29,30]

2.2.4. İkincil İşlemler

Sinterleme sonrası ortaya çıkan parçalar son duruma yaklaşır. Çoğunluğu sinterleme sonrası oluşan bu parçalar ikincil işleme gerek kalmadan bitim işlemine hazır hale gelir. Ancak bazı durumlarda bu parçalar için ikincil işlemler gerekebilir. Bu ikincil işlemler, ekonomik açıdan avantajlı olmasalar bile gerektiğinde gerçekleştirilir. Bu ikincil işlemlerin yapılmasının nedeni, parçalarda bazı iyileştirmeler ve iyileştirmeler yapılmasıdır. Sinterlemeden çıkan parçalar, eskisinden farklı bir kalıp kullanılarak yüzey hassasiyeti, ölçüm hassasiyeti, yoğunluk gibi özelliklerine göre kalibre edilebilir. [31,32] Bu parçadaki gözenekler ayarlanabilir. İhtiyaca göre metal veya alaşım, oroil ile doldurulabilir. Yağ emdirme olarak üretilen sinter burçlar örnek olarak verilebilir. [33]

Parça yüzeyindeki gözenekler kapatıldıktan sonra kaplama işlemi yapılır. Parçaların yüzeyleri 600 derecede kuru basınçlı buhar ile manyetik demir oksit ile kaplanabilir. Bu işlem, parçanın aşınma, basma mukavemeti, sertlik ve korozyon direnci gibi özelliklerinin iyileştirilmesini sağlar. [31,32]

Bahsedilen bu ikincil işlemlerin tümü zorunlu değildir, toz metalurjisi üretiminde bitmiş üründen önce uygulanabilen isteğe bağlı uygulamalardır.

BÖLÜM 3

KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit, iki veya daha fazla bileşen malzemedan üretilen bir malzemedir. Bu bileşen malzemeler, belirgin şekilde farklı kimyasal veya fiziksel özelliklere sahiptir ve tek başına kullanılan elementlerin aksine, belirli özelliklere sahip bir malzeme oluşturmak için birleştirilir. [36]

Basitçe söylemek gerekirse, kompozitler bileşenlerin bir kombinasyonudur. Sektörde kompozitler, bireysel olmaktan ziyade toplu olarak daha güçlü olan iki veya daha fazla doğal veya yapay elementin (farklı fiziksel veya kimyasal özelliklere sahip) birleştirilmesiyle elde edilen malzemelerdir.

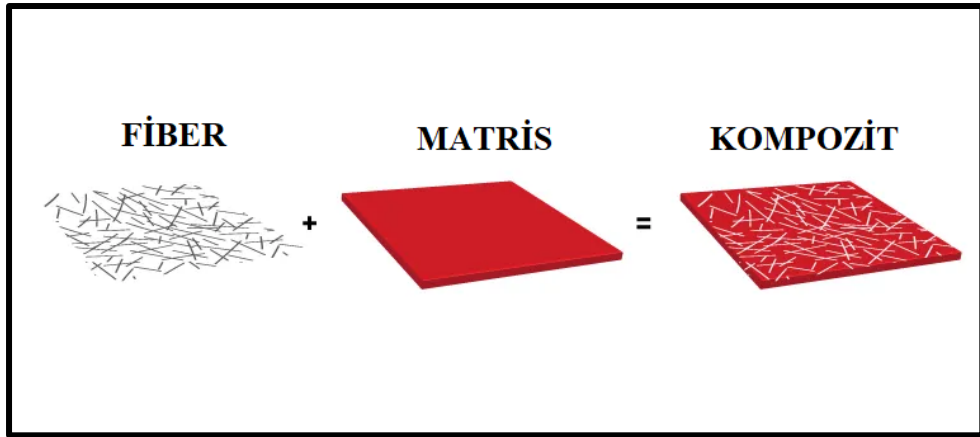
Bileşen malzemeler tamamen karışmaz veya bireysel kimliklerini kaybetmez; sonucu veya nihai ürünü iyileştirmek için en yararlı özelliklerini birleştirir ve katkıda bulunurlar. Kompozitler tipik olarak ek güç, verimlilik veya dayanıklılık gibi belirli bir kullanım düşünülerek tasarlanıır.

Avantajları:

- Kimyasal direnci yüksektir.
- Konsolide parçalar ve işlev
- Korozyon direnci yüksektir.
- Tasarım esnekliği vardır.
- Dayanıklılık yüksektir.
- Zorlu yükleri taşımak için yüksek eğilme modülüne sahiptir.
- Yüksek darbe dayanımına sahiptir.
- Yüksek sıcaklıklarda yüksek performans gösterir.

Dezavantajları:

- Özel üretim süreci gereklidir.
- Yüksek kaliteli kalıp gereklidir.
- Pahalı malzemedir.
- Sadece siyah renk olarak mevcuttur.
- Son derece uzmanlaşmış üretim süreçleri gereklidir. [37]



Şekil 3.1. Kompozit malzeme.

3.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI

Kompozitler iki farklı seviyede sınıflandırılır; matris bileşenleri ve matris bileşen formları.

3.1.1. Matris Bileşenlerine Göre Kompozit Çeşitleri

Matris bileşenlerine dayalı üç ana kompozit türü vardır. Bu sistemlerin her birinde, matris tipik olarak bileşen boyunca sürekli bir fazdır.

3.1.1.1. Polimer Matrisli Kompozit

Organik bir polimer matrisi ile birbirine bağlanan çeşitli kısa veya sürekli liflerden oluşur. Polimer matrisli kompozitin ana işlevi, matris aracılığıyla lifler arasındaki

yükleri aktarmaktır. Hafif, yüksek sertlik, takviye yönleri boyunca yüksek mukavemet, aşınma direnci ve korozyon direnci, polimer matrisli kompozitin bazı özellikleridir.

3.1.1.2. Metal Matrisli Kompozit

Metal matrisli kompozitler, demirden daha az yoğun olduğu için yeterli mukavemeti sağlamak için genellikle alüminyumdan yapılır ve bu nedenle havacılık endüstrisinde tercih edilir. Sürekli karbon, silisyum karbür veya seramik liflerin metalik bir matris malzemesine gömüldüğü bir malzemedir.

En yaygın metal matrisli kompozitler, alüminyum matrisli kompozitlerdir. Alüminyum matrisli kompozitlerin başlıca avantajları, geliştirilmiş aşınma direnci, daha düşük yoğunluk ve iyi korozyon direncine ek olarak artan özgül mukavemet, özgül sertlik ve yüksek sıcaklık mukavemetidir.

3.1.1.3. Seramik Matrisli Kompozit

Bunlar, silisyum karbür gibi bir seramik matris ile çevrelenmiş bir seramik veya karbon fiberden oluşan malzemelerdir.

3.1.2. Matris Bileşen Formlarına Göre Kompozit Çeşitleri

3.1.2.1. Partikül Takviyeli Kompozitler

Parçacık takviyeli kompozitler, daha yumuşak bir matriste rastgele bir şekilde dağılmış sert parçacık bileşenlerinden oluşur. Metalik, polimerik veya seramik matrislerde dağılmış metalik partikül, partiküllü kompozitin bir örneğidir. Yaygın olarak kullanılan bir partikül kompozit, çimento hamuruna çakılın gömülü olduğu betondur.

3.1.2.2. Elyaf Takviyeli Kompozitler (Fibröz Kompozitler)

Bir matris tarafından bir arada tutulan güçlü ve sert liflerden oluşur. Lifler, güçlü özelliklerinden dolayı birincil yük taşıyıcı bileşen görevi görür. Matris, lifler aşırı yükler altında bozulmaya başladığında, yükleri kırılmış bir liften malzemedeki bitişik liflere yeniden dağıtmak için bir koruyucu görevi görür.

Matris bileşeninin bu özelliği, lifli kompozitlerin en önemli özelliklerinden birine, yani tek tek bileşenlere kıyasla geliştirilmiş mukavemete katkıda bulunur. Takviye kompozitleri genellikle cam elyafları, karbon elyafları ve aramid elyaflarıdır. Lifler genellikle yüksek mukavemetli, düşük yoğunluklu, ısıya ve korozyona karşı iyi bir dirence sahip olan ve kullanımı kolay malzemelerdir.

3.1.2.3. Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozitler, tamamen bağlı ince temel katmanlardan yapılıdır. Bu katmanların kendileri kompozit olabilir; örneğin, lifli kompozit katman. Bu tip kompozit, yüksek performanslı yapılarda kullanılan en sık karşılaşılan lamine kompozit malzemedir [38].

3.2. BOR KARBÜR (B₄C)

Bor karbür, metalik olmayan malzemelerin (alümina, silisyum karbür, silisyum nitrür, elmas ve kübik bor nitrür) en önemli grubuna aittir ve elmas ve kübik bor nitrürden sonra en sert 3. malzemedir. Yüksek sıcaklıklara karşı direnci, diğer bor bileşiklerinin sentezi için ara hammadde görevi görme özelliğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. İlk olarak 1858'de keşfedilen bor karbür bileşiği, 1883'te Joly ve 1894'te Moissan tarafından hazırlanmış ve sırasıyla B₃C ve B₆C olarak adlandırılmıştır. Bugün kullanılan B₄C formülü 1934'ten beri kullanılmaktadır [39].

Yaklaşık %80'lik yüksek bor içeriği nedeniyle bileşik yüksek bir erime noktasına sahiptir ve yüksek kimyasal ve fiziksel kararlılığı nedeniyle nötron absorpsiyonu için etkin ve ekonomik olarak kullanılır. Bor içeriğinin yüksek olması nedeniyle diğer bor

bileşiklerinin üretimi için de önemli bir kaynaktır. En ilginç ürünler arasında bor metalleri ve bor halojenleri yer almaktadır [40]. Bor karbürün genel özellikleri Çizelge 3.1' de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Bor karbürün genel özellikleri.

| Özellik | Değer |
|---|-------------|
| Yoğunluk (g/cm ³) | 2.52 |
| Ergime sıcaklığı (°C) | 2445 |
| Kristal yapı | Rombohedral |
| Sertlik (Knoop 100g) (kg.mm ⁻²) | 2900 – 3580 |
| Vickers mikrosertliği (GPa) | 31.5 |
| Kırılma tokluğu (MPa.m ^{-1/2}) | 2.9 - 3.2 |
| Elastisite modülü (GPa) | 400 – 450 |
| Kayma modülü (GPa) | 186.5 |
| Eğme mukavemeti (MPa) (25°C'de) | 345 |
| Çekme mukavemeti (MPa) | 155 |
| Elektriksel iletkenlik (25°C'de) (S) | 140 |

3.2.1. Bor Karbürün Özellikleri

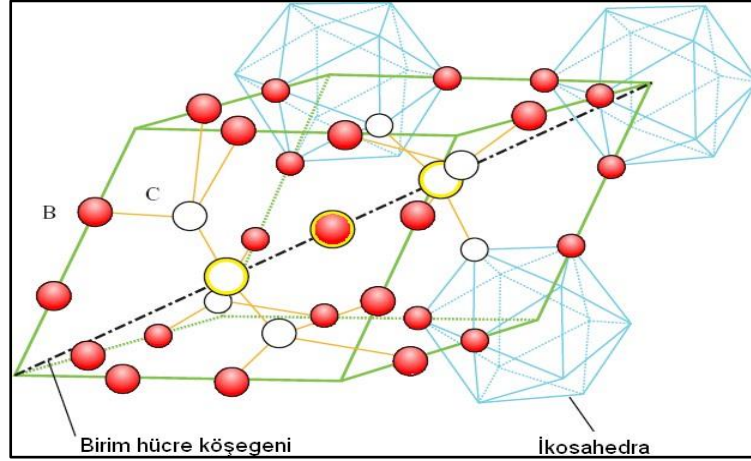
Bor elementi, 20 kenara sahip, 12 noktalı simetrik kafes yapısını oluşturmak üzere bir araya getirilen 12 atomdan oluşan ayrılmış bir ikosahedrondur. Bor kristalleri oluştuğunda, bu ikosahedral yapılar, eş açılı, eş boyutlu bir yapı oluşturmak için rombohedral bir konfigürasyonda bir araya gelir. Bor karbür (B₄C) yapısında, bu ikosahedral yapılarının merkezleri, eşkenar dörtgen yapının her bir köşesine denk gelecek şekilde düzenlenmiştir.

Bor karbür çok tartışılan bir konudur ve henüz tam olarak aydınlatılamamış karmaşık bir yapıya sahiptir. Hafif çarpık bir kafes yapısına sahip olan bor karbür, ikosahedral kristallerin üçlü atom zincirleri kullanılarak doğrudan ve çapraz bağlı olarak

bağlanmasıyla oluşan eşkenar dörtgen bir yapıdır. İkosahedral yapının 12 atomu ile bu üçlü atom zinciri, H atomu şeklinde birim hücreler oluşturur.

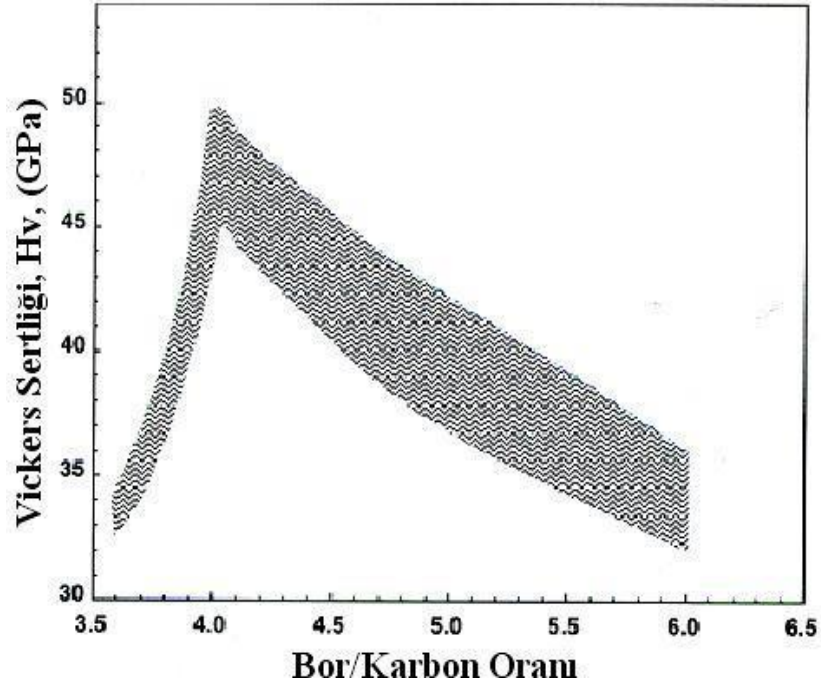
Bor karbürün bileşiminin birçok yolu vardır. Bunlar;

- Bir karbon atomunun ikosahedral bir yapıya sahip olduğu ($B_{11}C$) CBC bileşimi (B_4C 'ye eşdeğer).
- İkosahedral kafes yapısında hiçbir karbon atomunun yer almadığı (B_{12}) CBC bileşimi ($B_{13}C_2$ 'ye eşdeğerdir).
- Zincir yapısında veya boşlukta bor atomlarının yer değiştirmesinden kaynaklanan yüksek bor içeriğine sahip bileşimler.



Şekil 3.2. Rhombohedral B_4C birim hücre yapısı.

Bor karbür bileşiklerinde yüksek verimliliği sağlanabilmek için B/C oranının kontrol edilmesi gerekir. Şekil 3.2’de görüldüğü üzere B/C oranının 4 olduğu durumda sertlik değeri en yükseğe ulaşmıştır. Ayrıca bor elementinin artışı sertlikte düşüş meydana geldiğini göstermiştir. Buna rağmen elektromotor kuvvetinin önemli olduğu durumlarda bor içeriği zengin yapılar tercih edilmelidir [41].



Şekil 3.3. Bor/karbon oranının sertlik üzerinde etkisi.

Bor/karbon oranının yanı sıra, hammaddeden gelmiş olan safsızlıklar da bor karbür bileşiğinin birim kafes yapısının durumuna etki etmektedir. Abramshe, yaptığı çalışmada hammadde bileşiminde 100 ppm ve daha fazla ihtiva eden safsızlıkların bor karbür yapısına olan etkilerini incelemiştir. Kullanmış olduğu hammadde harmanında bulunan ve istenmeyen elementler olarak ifade edilen kalsiyum, mangan, sodyum ve silisyum kristal kafes yapısını genişlemesine sebep olarak daha zayıf hale gelmesine neden olmuş, diğer safsızlıkların da bor karbürün sertliğine ve kırılma tokluğuna olumlu bir yönde etki etmediği anlaşılmıştır. Safsızlıklar tane büyümesi sırasında bor karbür bünyesine katılarak kristal yapının genişlemesine neden olmuş ve nihai toz ürününü yapıdaki boşluklara ve porozitelere karşı daha hassas hale getirerek istenilen yoğunluğa sahip zırh üretiminin gerçekleşmesine engel olmuştur [42].

3.2.2. Bor Karbürün Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

3.2.2.1. Kimyasal Özellikler

Bilinen en kararlı bileşiklerden biri olan bor karbür, soğuk kimyasal reaktiflerle reaksiyona girmez. Sadece HNO₃, H₂SO₄ ve HClO₄ gibi sıcak oksitleyici asitler ve

HF - H₂SO₄ veya HF - HNO₃ karışımları ile reaksiyona girmesine rağmen, yüksek sıcaklıklarda metal oksitlerle etkileşimi karbon monoksit ve metal borürleri açığa çıkarır. Bor, karbür halojenürler tarafından aktive edilebilir ve çeliği ve diğer bazı alaşımları boronlamak için kullanılabilir [6]. 3A ve 6A grubu bazı metaller, lantanitler ve aktinitler bor karbür ile güçlü bor karbür fazları oluştururken, 4A ve 5A diboritler bor karbür ile reaksiyona girmez [43].

3.2.2.2. Fiziksel Özellikler

Bor karbürün yoğunluğu, fazların homojenliği içinde artan karbon içeriği ile doğrusal olarak artar. Elektriksel iletkenlik sıcaklıkla artarken, iletim mekanizması küçük ölçekte tekil veya iki kutuplu elektron sıçramalarıyla açıklanabilir. Artan karbon içeriği ile aktivasyon enerjisi (E_h) de artar.

Bor karbür, elmas ve kübik bor nitrürden sonra sertlikte üçüncü sırada yer alan, bilinen en sert malzemelerden biridir. Artan karbon içeriği ile Knoop mikrosertlik değerinin arttığı bilinmektedir. Bununla birlikte, statik girinti ölçümleri, artan sıcaklıkla birlikte sertliğin tutarlı bir şekilde azaldığını göstermektedir. Yüksek mukavemet ve sertlik değerleri nedeniyle bor karbür, aşınma direnci açısından sadece elmastan sonra ikinci sıradadır. Bor karbürün mukavemet değerleri homojen karbür fazında bulunan karbon miktarına bağlıdır. Aynı zamanda sıcaklığa ve karbür stokiyometrisine de bağlı olan mukavemet değeri, az miktarda bor ilavesi ile serbest grafit uzaklaştırılarak da artırılabilir. Bor karbürün elastisite modülü genellikle stokiyometriye bağlıdır ve artan bor miktarı ile azalır [39].

3.2.3. Bor Karbürün Yapısal Özellikleri

3.2.3.1. Sertlik

Literatürde verilen bor karbür bileşikleri için değer aralığı 20 GPa'dan 78 GPa'a kadar değişiklik göstermektedir, fakat bor karbür bileşiği için genel kabul görmüş Vickers sertliği 32 GPa'dır [44]. Elmas ve kübik bor nitrürden sonra gelen bor karbür en sert malzemedir. Karbon miktarının sertliğe olan etkileri ile ilgili birçok tez

bulunmaktadır. Yüksek sıcaklık sertlik ölçümlerinde 1300 °C 'ye kadar olan sıcaklıklar için sertlikte herhangi bir azalma tespit edilememiştir. Basıncsız şartlar altında sinterlenmiş numunelerde sertlik ölçümleri 200 g yük ile yapıldığında ölçümler 25,5 GPa sertliğindeyken sıcak pres ile yapılan ölçümlerde sertliğin 29 GPa olduğu gözlenmiştir [45].

3.2.3.2. Aşınma Direnci

B₄C yüksek sertliğinden dolayı yüksek aşınma direncine sahiptir. Relatif skalanın en üstünde yer alan elmasla mukayese edildiğinde elmasın aşınma direncinin 0,613, B₄C 'ün ise aşınma direncinin 0.422 olduğu ve SiC 0,314 ile aynı skalada olduğu gözlenmektedir [44].

3.2.3.3. Yoğunluk

B₄C 'ün yoğunluğu 2,52 g/cm³ tür. Yapıdaki bor miktarının artması ile yoğunlukta bir azalma gözlenmesi elementel bor atom ağırlığının karbon atom ağırlığına göre daha küçük olması sebebiyle beklenen bir durumdur. Bilinen bir stokiometrik yapı için ölçülen yoğunlukların teorik değerlerden fazla olması yapıda empürite olarak demir, alüminyum gibi daha ağır metallerin bulunduğunu göstermektedir [44].

3.2.3.4. Elektriksel Direnç

Oda sıcaklığında gözlenen elektrik direnci 0,1-10 ohmxcm 'dir. Oda sıcaklığında 10 ohmxcm elektriksel direnç gösteren saf bor karbürün direnci 1600 °C civarında 0,2 ohmxcm değerine kadar bir düşüş gözlenir. Yoğunluk ve diğer özelliklere benzer şekilde elektriksel iletkenlikte bor/karbon oranına bağlı olarak değişiklik göstermektedir [44].

3.2.3.5. Mekanik Özellikler

Bor karbürün yüksek sertliğe ve ergime noktasına sahip olması yanı sıra mekanik özellikleri de oldukça önemli bir parametredir. Özellikle mukavemet/yoğunluk oranı incelendiğinde B₄C ideal bir alaşım malzeme olduğu görülmektedir. Kristal kafes yapısındaki atomların kuvvetli kovalent bağlarla birbirine bağlı olması yüksek mukavemetin bir göstergesidir. Karışıma yapılacak az bir miktar bor takviyesi mikroyapıdaki serbest karbonu elimine eder ve mukavemet artışına sebep olur. Sıcak preslenmiş olan deney numuneleri 300-500 MPa arasında bir eğme mukavemeti gösterirken, sinterleme sonrasında HIP işlemine maruz bırakılmış deney numunelerindeyse bu değer 150-350 MPa aralığına olduğu belirlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda sertliğin düşmesine paralel olarak mukavemette de azot gazı altında 1500 °C 'ye kadar herhangi bir azalma gözlenemez. Öte yandan 600-1000 °C 'ye kadar yapılan eğme deneyleri B₄C 'nin oksitlenmesine bağlı olarak mukavemetinin azalmasına yol açmaktadır. Yapıya Si ve Al katkıları yapılması oksitlenmenin önüne geçerek havadaki yüksek sıcaklık mukavemet değerinin iyileştirilmesine yardımcı olur [44].

3.2.4. B₄C 'ün Üretim Yöntemleri

B₄C 'ün literatürde yer alan çeşitli üretim yöntemleri vardır. Ticari B₄C üretimi karbotermik yöntemle, B₂O₃ ve karbon kullanılarak elektrik ark fırınında yapılmaktadır. Bunun dışında SHS yöntemini takiben asitte çözümlendirme, element halinde bor ve karbon tozunun reaksiyonu, bor halojenürlerin hidrojen ve hidrokarbonlarla reaksiyonu kullanılarak da B₄C üretiminin mümkün olduğu literatürde verilmiştir [46,47].

3.2.4.1. Karbotermik Yöntemle B₄C Üretimi

Karbotermal indirgeme; Karbür, borür veya nitrürden seramik tozlarının üretiminde kullanılan bir üretim yöntemidir. Karbürler, karbon ve metal oksit arasındaki reaksiyonla üretilir. Boridlerin sentezi için metal oksit ve karbonun yanı sıra bor kaynağı olarak elementel bor veya bor içeren bir karbon kaynağı kullanmak gerekir.

Nitrürler, azot gazı veya azot gazı içeren hammaddeler kullanılarak üretilir. Tüm karbotermik indirgeme reaksiyonları, yan ürün olarak CO gazı açığa çıkaran ve çok fazla enerji gerektiren endotermik oluşumlar olmasına rağmen, yüksek sıcaklıklarda termodinamik indirgeme mümkündür [46,47].

3.2.4.2. Endüstriyel Karbotermik B₄C Üretimi

Bor karbürün endüstriyel üretimi, bor oksit ve karbon karışımından oluşan yığının bir ark veya direnç fırınında B₄C'nin erime sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta karbotermik redüksiyonu ile gerçekleştirilir. Bu yöntemle elde edilen ürünler iri taneli ve homojen değildir. Ürünler daha sonra daha yüksek karbon içeriğine sahip B₄C tozları elde etmek için ezilir ve öğütülür. Ticari B₄C tozları, milimetreden mikrometreye kadar değişen büyük bir partikül boyutuna sahiptir [48].

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. DENEYSEL YÖNTEM

Yapılmış olan bu çalışmada CuAlNi alaşımına farklı karışım oranlarında (%2,5, 5, 7,5 ve 10) B₄C parçacıkları ilavesi yapılarak toz metalurjisi (TM) üretim yöntemiyle yapılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, öncelikle CuAlNi alaşımını oluşturacak tozlar Çizelge 4.1.'de verilen %'de kimyasal bileşimine göre hassas terazide tartılarak hazırlanmıştır.

Çizelge 4.1. CuAlNi kompozit karışımının kimyasal bileşimi.

| | Cu (%) | Al (%) | Ni (%) |
|--------------------------------|--------|--------|--------|
| CuAlNi alaşımının hazırlanması | 84 | 12 | 4 |

Hazırlanan CuAlNi alaşımına B₄C ilaveleri Çizelge 4.2'de verilen %'de kimyasal bileşimine göre hassas terazide tartılarak hazırlanmıştır.

Çizelge 4.2. Kompozit malzemelerin üretim parametreleri.

| Numune No | CuAlNi (%) | B ₄ C (%) | Sıcaklık (°C) | Presleme Basıncı (MPa) | Presleme Süresi (dk) |
|-----------|------------|----------------------|---------------|------------------------|----------------------|
| 1 | 100 | - | 850 | 35 | 5 |
| 2 | 97,5 | 2,5 | | | |
| 3 | 95 | 5 | | | |
| 4 | 92,5 | 7,5 | | | |
| 5 | 90 | 10 | | | |

4.1.1. Numunelerin Hazırlanması

CuAlNi toz karışımı içerisinde, %2,5, 5, 7,5 ve 10 oranında B₄C ilave edilmiştir. Hazırlanan karışım tozlar Şekil 4.1’de verilen turbula marka 3 eksenli karıştırıcı ile 1 saat süre ile karıştırılmıştır.



Şekil 4.1. Turbula karıştırma makinesi.

Hazırlanan tozlar karıştırma işlemi sonrasında Elâzığ’da bulunan Çelmak Makina Ltd. Şti.’de bulunan sıcak pres ile presleme işlemi yapılmıştır. Kompozitte kullanılan tozların toz boyutu 325 mesh tir. Sıcak presleme işleminde presleme sıcaklığı 850 °C, presleme basıncı 35 MPa ve presleme süresi 5 dk olacak şekilde uygulanmıştır. Presleme öncesinde presleme ortamı 10 dk vakum ortamına tabii tutulmuş ve sonrasında presleme işlemi argon koruyucu gaz ortamında yapılmıştır. Presleme işleminde kalıp olarak, 10 X 10 X 25 mm çapında dikdörtgen prizma şeklinde bir kalıp kullanılmıştır.



Şekil 4.2. PLC kontrollü sıcak pres makinesi.



Şekil 4.3. Numunelerin presleme sonrası makro görüntüsü.

4.1.2. Numunelerin Mikroyapı İncelemesi

Sinterleme işlemi sonrasında deney numunelerinden optik ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntü alabilmek amacıyla metalografik işlem adımları uygulanmıştır. Bu uygulanmış olan metalografik işlemler sırasıyla zımparalama, parlatma ve dağlama olarak uygulanmıştır. Deney numunelerinin yüzeylerine 200, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh zımparalar ile sırasıyla zımparalama işlemi uygulanmıştır. Daha sonra bu numunelerin yüzeyleri sırasıyla 3 μ ve 1 μ elmas süspansiyonlar ile parlatılma işlemine tabi tutulmuştur. Son olarakta, aşığıda reçetesi verilmiş olan reaktife yaklaşık olarak 10 sn. daldırma yöntemiyle dağlama işlemine tabi tutulmuşlardır.

Dağlama reaktifi : 5 ml Fe₃Cl

20 ml HCl

100 ml H₂O

Belirlenen reaktif ile dağlama işlemi yapılan deney numunelerinin görüntüleri, optik ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Karabük Üniversitesi (KBU) Merkezi Araştırma Laboratuvarlarında bulunan “Nikon Ters Metalurjik Optik Mikroskop” Ve “Carl Zeiss Ultra Plus Gemını Fesem Sem Mikroskop” marka cihazlardan alınmıştır (Şekil 4.5) (Şekil 4.6).

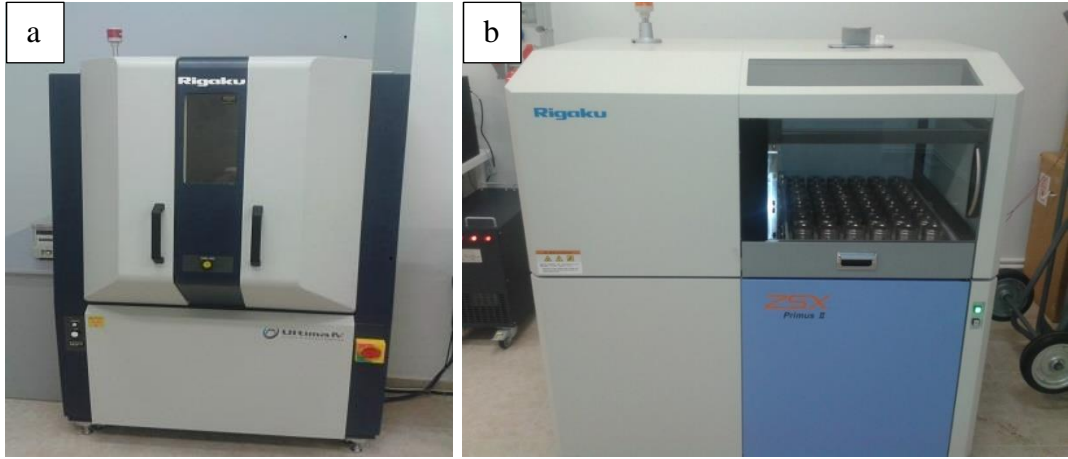


Şekil 4.5. NIKON optik mikroskop.



Şekil 4.6. CARL ZEISS ULTRA PLUS GEMINI FESEM analiz cihazı.

Üretilen numunelerin XRD ölçümleri Rıgaku Ultra Iv marka cihaz (Şekil 4.7a) ve XRF ölçümleri Rıgaku Zsx Primus 2 marka cihaz (Şekil 4.7b) ile yapılmıştır. Ölçümler, Karabük Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarlarında yapılmıştır.



Şekil 4.7. Rıgaku XRD(a) ve XRF(b) analiz cihazları.

4.1.3. Numunelerin Mikrosertlik Ölçümü

Sinterleme işlemi sonrasında, deney numunelerinin tamamına metalografik hazırlık işlemleri sırasıyla uygulanmıştır. Daha sonrasında, bu tez çalışmasında üretilen numuneler için partikül takviye edilen B₄C miktarına bağlı olarak

ortaya çıkan sertlik değerlerinin nasıl bir mekanik etki göstermiş olabileceği araştırılmıştır. Deney numunelerinin sertlik ölçümlerinde Vickers mikrosertlik ölçüm metodu kullanılmıştır. Bu ölçümler, Karabük Üniversitesi (KBU) Merkezi Araştırma Laboratuvarlarında bulunan ve HV₅ kg yük altında QNESS marka Q10 A+ model Mikro sertlik ölçüm cihazı (Şekil 4.5) kullanılarak yapılmıştır. Deney numunelerinden sertlik ölçümleri sağlıklı bir şekilde belirlenebilmesi için belirlenen bir hat üzerinden belirli sabit aralıklarla en az 5 noktadan ölçüm yapılmıştır.



Şekil 4.8. QNESS Q10 A+ Mikro sertlik ölçüm cihazı.

4.1.4. Numunelerin Aşınma Ölçümü

Aşınma, birbiriyle temasta olan iki bağlantı elemanının birbirine göre bağlı hareket yaptığında oluşan yüzey hasarı olarak tanımlanabilir. Numunelerin aşınma dayanımlarını ölçmek için 3 numuneye (CuAlNi, CuAlNi+%2.5B4C, CuAlNi+%7.5B4C) Karabük Üniversitesi MARGEM Laboratuvarlarında bulunan UTS Tribometer T 10/20 markalı aşınma cihazında deneyler yapılmıştır. Aşınma deneyleri oda sıcaklığında 20 N ve 40 N yük koşulları altında, 80 mm/s sabit kayma hızında ve toplamda 250 m yol kat edilerek yapılmıştır. Tüm yüzeylerde aynı yüzey kalitesinin sağlanması için aşınma deneylerine başlamadan önce yüzeyler 220 mesh SIC zımpara ile zımparalanmıştır. Çizelge 4.2' de aşınma test parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. Aşınma test parametreleri.

| | |
|------------------|-----------------|
| Kayma Hızı | 80 mm/s |
| Yük | 10N ve 20N |
| Strok | 10 mm |
| Kullanılan bilye | 6 mm-AISI 52100 |
| Kayma mesafesi | 250 m |
| Aşınma türü | İleri-geri |



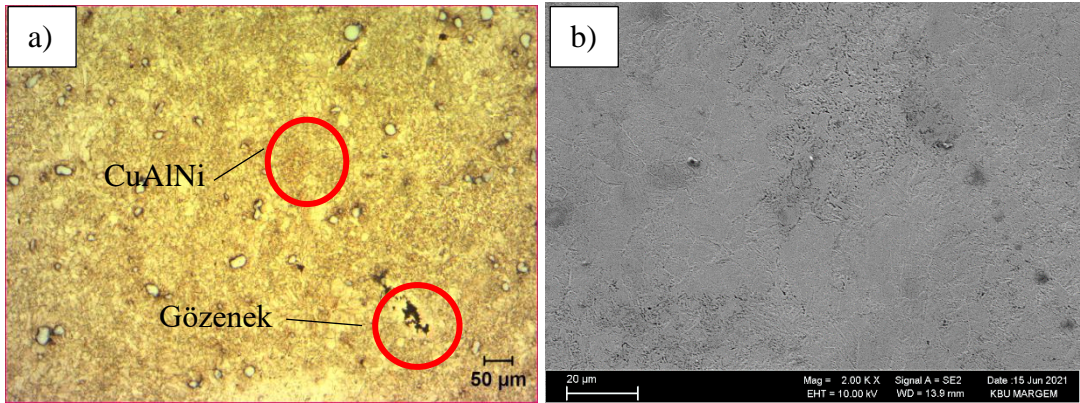
Şekil 4.9. UTS Tribometer T 10/20 marka aşınma cihazı.

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR

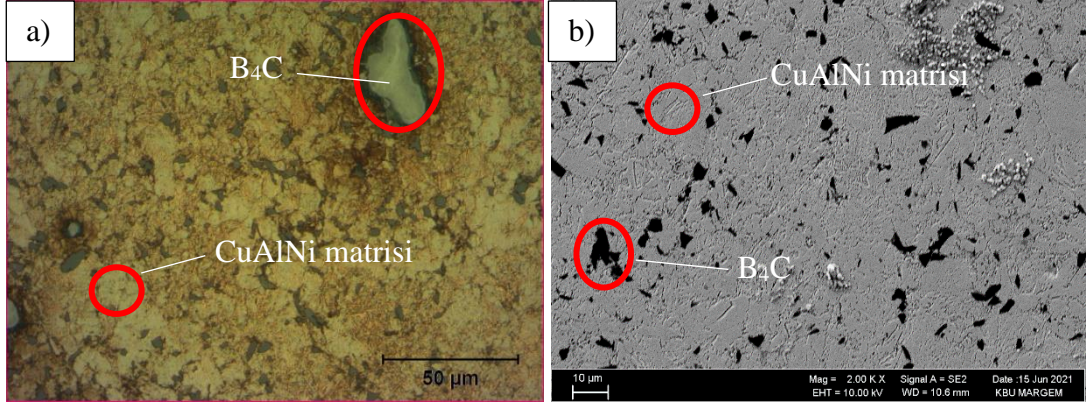
5.1. NUMUNELERİN OPTİK MİKROSKOP VE SEM GÖRÜNTÜ SONUÇLARI

Toz metalürjisi (TM) yöntemiyle üretilmiş olan kompozitlerin optik mikroskop ile görüntüleri alınmıştır. Elde edilen görüntü sonuçlarına göre değerlendirmeler yapılmıştır. Şekil 5.1'de verilen 1 numaralı numunenin optik mikroskop ve SEM görüntüleri incelendiğinde CuAlNi matris yapısı açıkça görülmektedir. Üretilen numunelerde toz metalürjisi ile üretim yönteminden kaynaklı tozlardaki kirlilikten ve oksitlenmeden dolayı kısmi gözenekler görülmektedir.

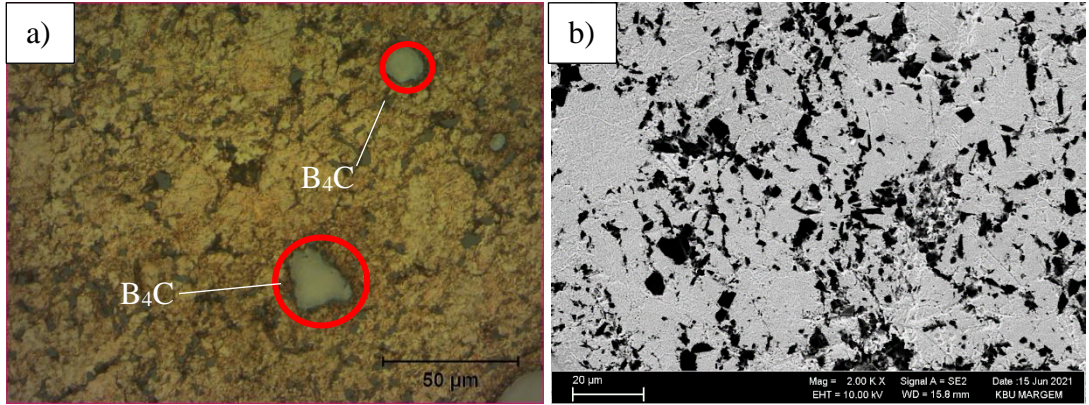


Şekil 5.1. CuAlNi matris yapılı saf numunenin optik ve SEM mikroyapı görüntüleri.

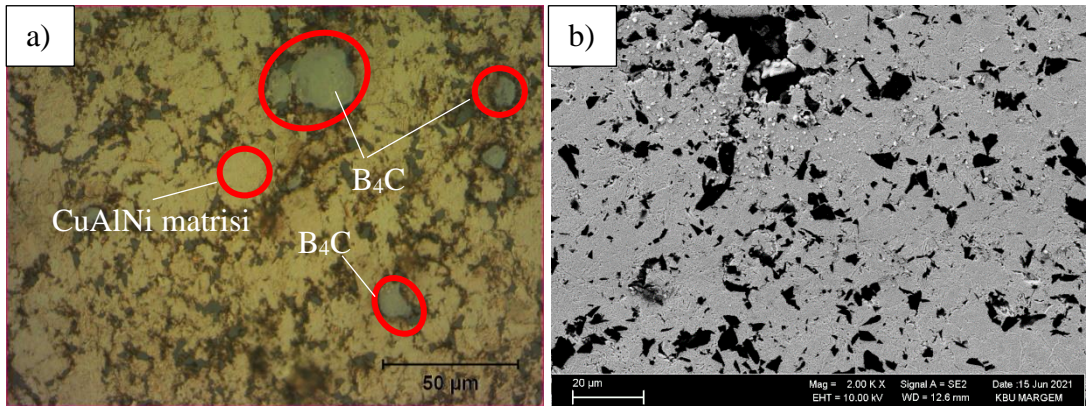
Ek olarak, %2,5, %5, %7,5, %10 B₄C takviyeli numunelerden alınan optik mikroskop ve SEM görüntüleri incelendiğinde B₄C parçacıklarının homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Şekil 5.2) (Şekil 5.3) (Şekil 5.4) (Şekil 5.5)



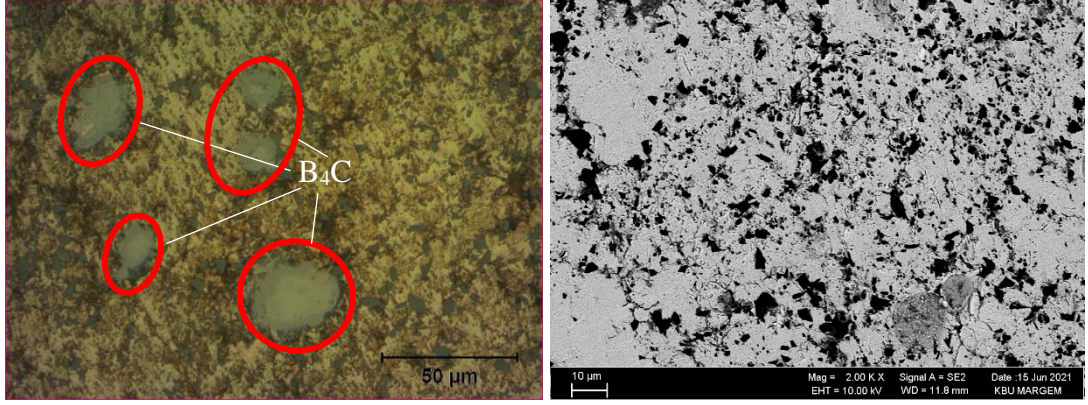
Şekil 5.2. %2,5 B₄C ihtiva eden numunenin optik ve SEM mikroyapı görüntüleri.



Şekil 5.3. %5 B₄C ihtiva eden numunenin optik ve SEM mikroyapı görüntüleri.



Şekil 5.4. %7,5 B₄C ihtiva eden numunenin optik ve SEM mikroyapı görüntüleri.

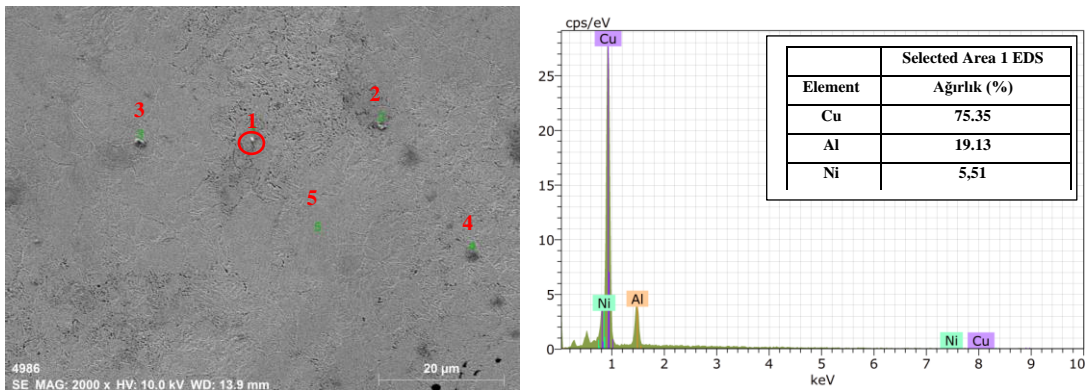


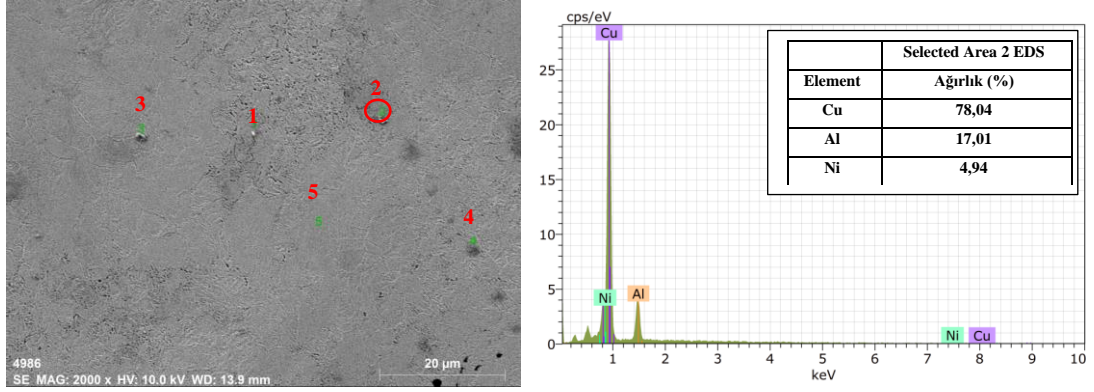
Şekil 5.5. % 10 B₄C ihtiva eden numunenin optik ve SEM mikroyapı görüntüleri.

Verilen optik mikroskop ve SEM görüntüleri incelendiğinde B₄C' nin yapıda homojen olarak dağıldığı gözlemlenmektedir. B₄C' ün CuAlNi iç yapısında homojen bir şekilde dağılması, tozların sinterlenmeden önce üç boyutlu turbula ile karıştırılması ve sıcak pres ile üretim işleminin bir sonucudur. Takviye elemanı olarak kullanılan B₄C tozları birbirine benzer şekilde ve genel olarak keskin köşeli ve düzensiz bir geometriye sahiptir. Homojen olarak dağılan B₄C toz parçacıklarının kompozitin mekanik özellikleri arttırdığı düşünülmektedir ve bu düşüncemizi mikrosertlik ve aşınma ölçüm sonuçları desteklemektedir.

5.2. NUMUNELERİN EDS ANALİZ SONUÇLARI

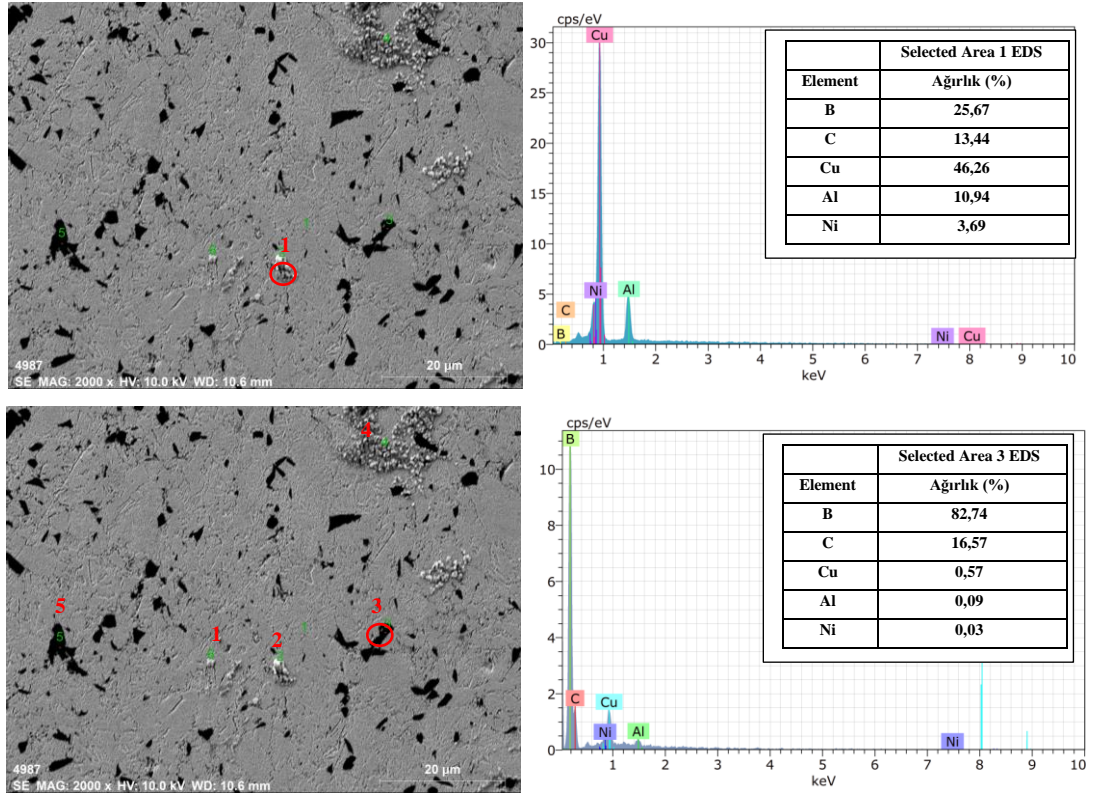
Üretilen CuAlNi bileşimli saf olarak nitelendirdiğimiz numunenin EDS analiz sonuçları Şekil 5.6'da verilmiştir. Şekil 5.6'da belirtilmiş EDS analiz sonucu, üretilen numunenin kimyasal bileşimini desteklemektedir. Üretilen numunenin iç yapısında farklı oranlarda Cu, Al, Ni, olduğu tespit edilmiştir.



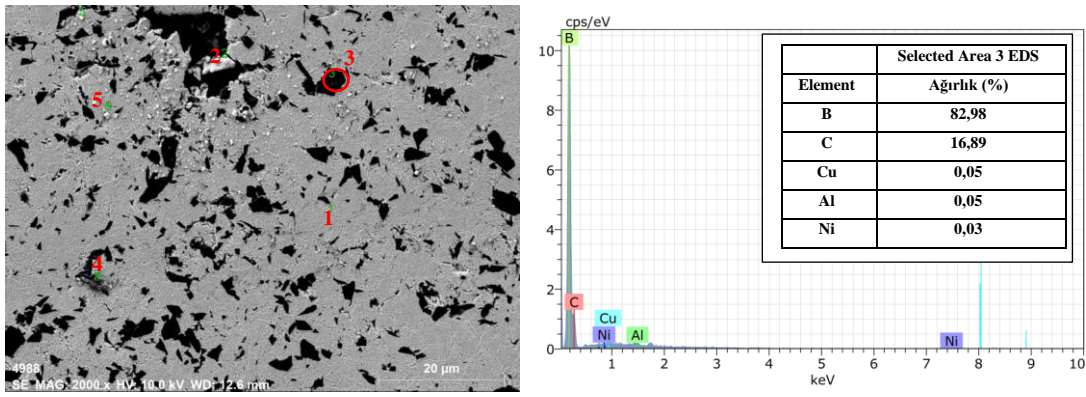
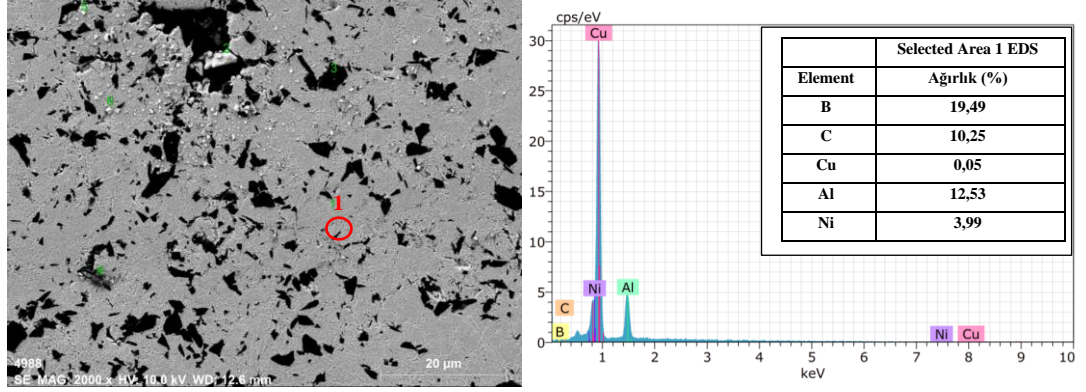


Şekil 5.6. CuAlNi kimyasal bileşime sahip numunenin EDS analiz sonucu

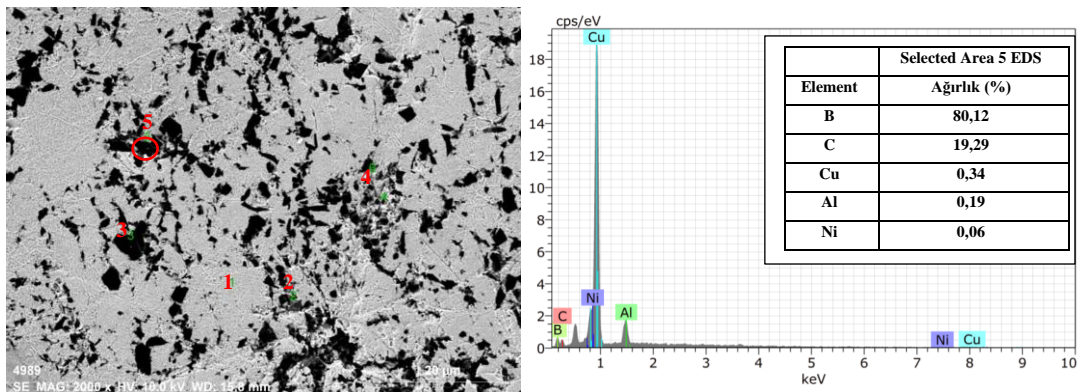
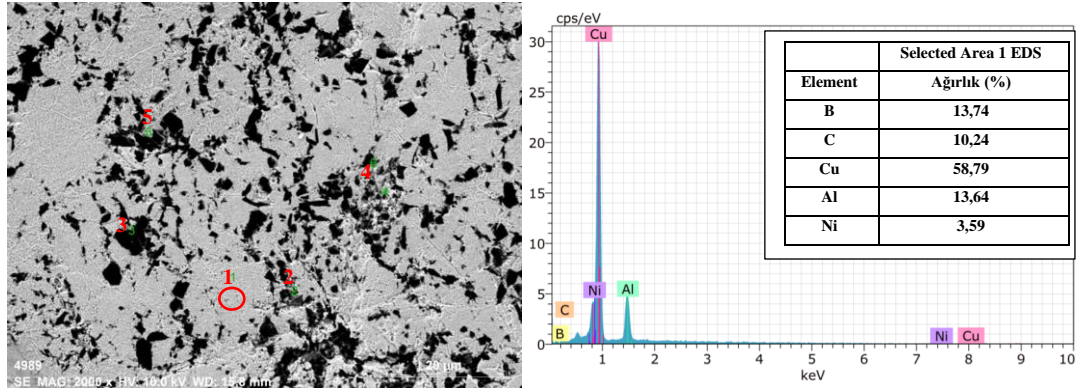
Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da sırasıyla %2,5, %5, %7,5, %10 B₄C ihtiva eden numunelerden elde edilmiş EDS analiz sonuçları, üretilen deney numunelerinin kimyasal bileşimlerini desteklemektedir. Üretilmiş olan numunelerin iç yapılarında farklı oranlarda Cu, Al, Ni, B ve C olduğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak, artan B₄C yüzdesi ile (%) çökeltilerin CuAlNi matris yapısı içerisinde homojen olarak arttığı da açıkça görülmektedir.



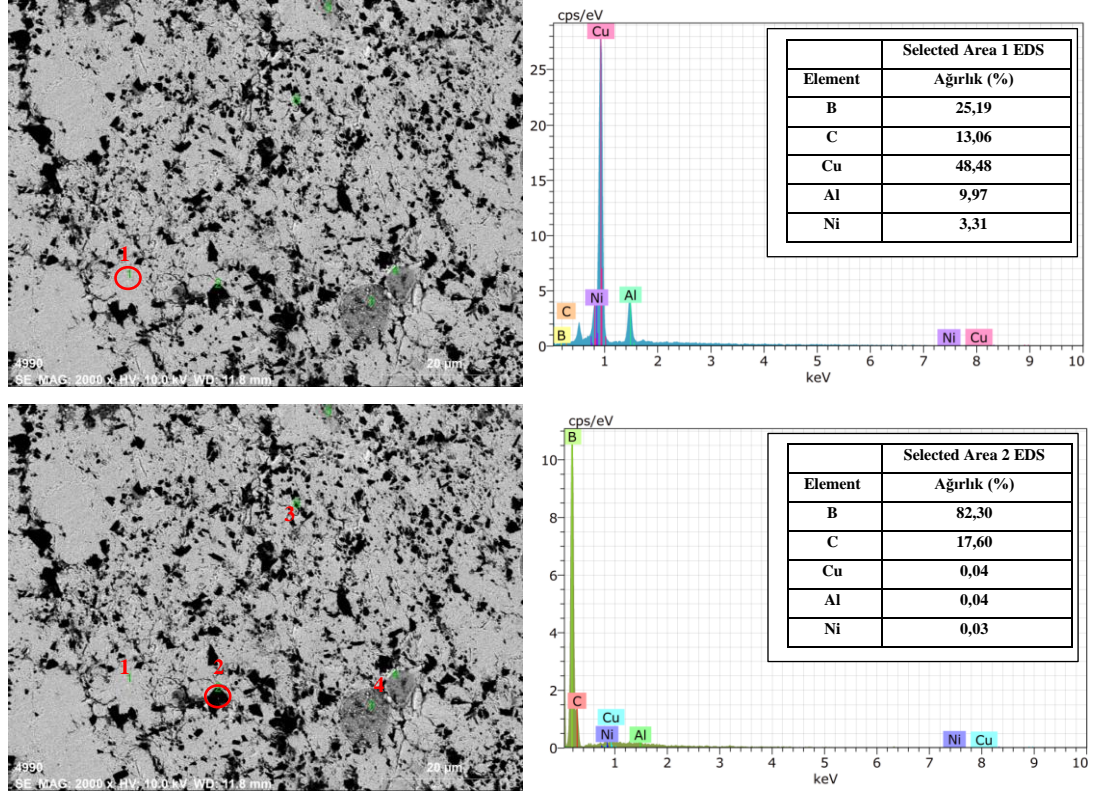
Şekil 5.7. %2,5 B₄C ilaveli CuAlNi numunenin SEM-EDS analiz sonucu



Şekil 5.8. %5 B₄C ilaveli CuAlNi numunenin SEM-EDS analiz sonucu.



Şekil 5.9. %7,5 B₄C ilaveli CuAlNi numunenin SEM-EDS analiz sonucu.



Şekil 5.10. %10 B₄C ilaveli CuAlNi numunenin SEM-EDS analiz sonucu.

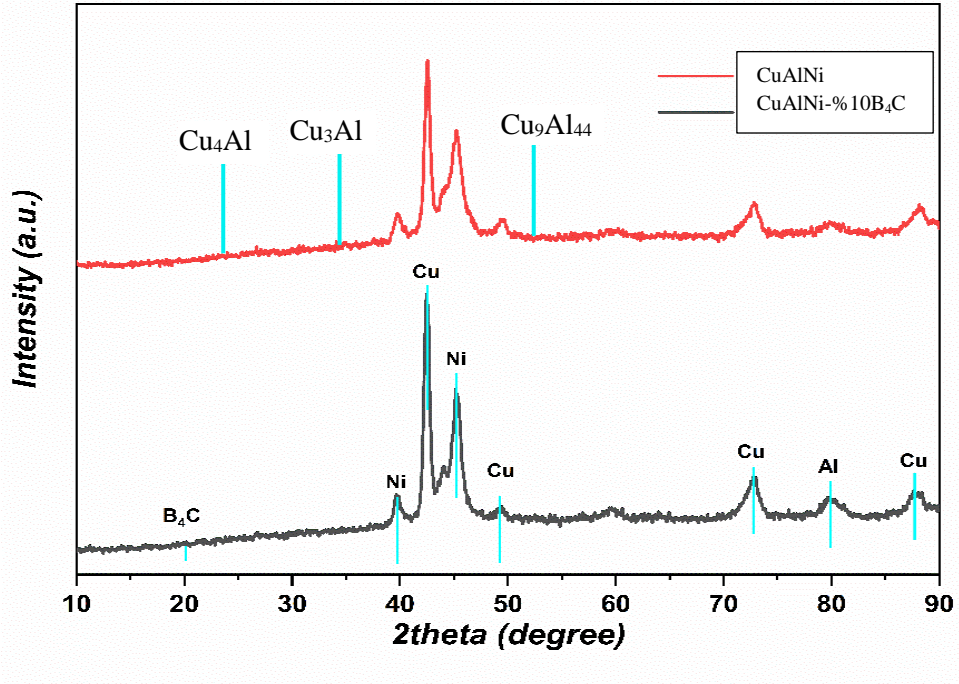
5.3. NUMUNELERİN XRF VE XRD ANALİZ SONUÇLARI

Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen CuAlNi-B₄C takviyeli numunelerin XRF analiz sonuçları Çizelge 5.1'de verilmiştir. XRF analizlerinde Bor ve Karbon tespiti zor elementler olduğundan yapıda B₄C saptanamamış, fakat XRD ve EDS analizlerinde B₄C' nin yapıdaki varlığı gözlemlenmektedir.

Çizelge 5.1. XRF deney sonucu.

| | Cu (%) | Al (%) | Ni (%) |
|--------|--------|--------|--------|
| CuAlNi | 67,628 | 29,123 | 3,247 |

Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen CuAlNi ve CuAlNi-B₄C takviyeli numunelerin XRD analiz sonuçları Şekil 5.11'de verilmiştir.



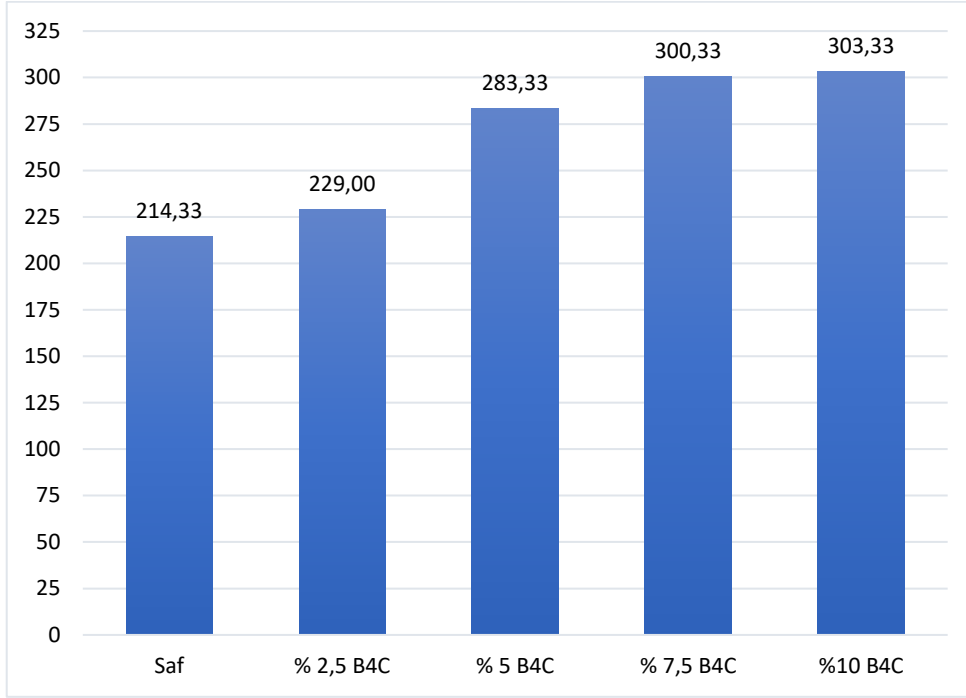
Şekil 5.11. XRD deney sonucu.

Şekil 5.11’de verilen XRD grafiği incelendiğinde Cu, Al, Ni elementleri ve B₄C fazının varlığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak xrd grafiğinde Cu, Al ve B₄C fazının baskın olduğu açıkça görülmektedir. Sinterleme işlemi sırasında Cu, Al, Ni ve B₄C parçacıkları arasında Cu₄Al, Cu₉Al₄₄, Cu₃Al intermetalik fazlar oluşmuştur.

5.4. NUMUNELERİN MİKROSERTLİK ANALİZ SONUÇLARI

Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen yalnızca CuAlNi ve %2,5, %5, %7,5, %10 B₄C takviyeli CuAlNi numunelerin mikrosertlik grafikleri Şekil 5.11’de verilmiştir. Üretilen kompozitlerin mikrosertlik testi ölçümleri 100 µm aralıklarla belirlenen bir çizgi boyunca numune yüzeyinden alınmıştır. Saf olarak nitelendirdiğimiz CuAlNi numunenin sertliği ortalama 214 HV₅’dir. %2,5 B₄C ilaveli numunenin sertlik değeri ortalama 229 HV₅ olarak tespit edilmiştir. %5 B₄C ilaveli numunenin sertlik değeri ortalama 283,3 HV₅ olarak tespit edilmiştir. %7,5 B₄C ilaveli numunenin sertlik değeri ortalama 300,3 HV₅ olarak tespit edilmiştir. Son olarak %10 B₄C ilaveli numunenin sertlik değeri ortalama 303,3 HV₅ olarak bulunmuştur. B₄C partikül takviyeli numunelerin sertliği partikül takviyesiz numuneden daha yüksektir. Bu

artışın sebebi olarak, % hacim olarak artan karbür ve sonucunda oluşan sert intermetalik fazların varlığı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.



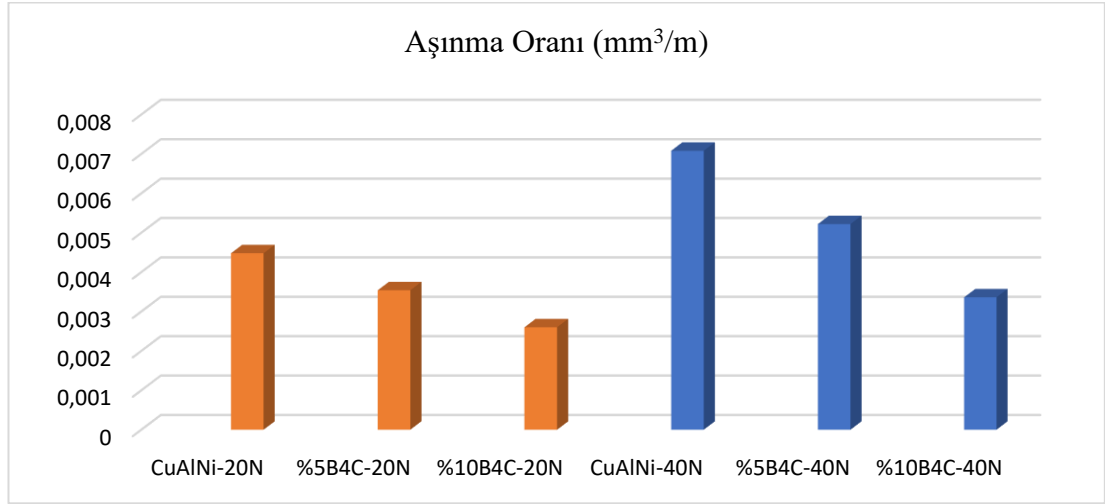
Şekil 5.11. CuAlNi ve B₄C takviyeli CuAlNi numunelerin mikrosertlik sonuçları.

5.5. NUMUNELERİN AŞINMA ANALİZ SONUÇLARI

Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen CuAlNi ve %5 ve %10 B₄C takviyeli CuAlNi numunelere ait 20 ve 40N yük uygulanarak yapılan aşınma sonuçlarına ait grafik Şekil 5.12'de verilmiştir. Kayma hızı, uygulanan yük, kayma mesafesi ve takviye elemanı oranı gibi parametreler kompozit malzemelerin aşınma davranışı üzerinde etkilidir. CuAlNi, %5 ve %10 B₄C katkılı CuAlNi numunelerin aşınma testlerinde, aşındırıcı malzeme olarak 6 mm çapında 62 HRC sertliğe sahip AISI 52100 bilye kullanılmıştır.

Çizelge 5.3. Aşınma analiz sonuçları.

| | Aşınma derinliği (mm) | Aşınma hacim kaybı (mm ³) | Aşınma oranı (mm ³ /m) |
|-------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| CuNiAl-20N | 0,14 | 1,12 | 0,00448 |
| %5B ₄ C-20N | 0,085 | 0,885 | 0,00354 |
| %10B ₄ C-20N | 0,03 | 0,65 | 0,0026 |
| CuNiAl-40N | 0,18 | 1,77 | 0,00708 |
| %5B ₄ C-40N | 0,1385 | 1,305 | 0,00522 |
| %10B ₄ C-40N | 0,097 | 0,84 | 0,00336 |



Şekil 5.12. CuAlNi, %5 ve %10 B₄C takviyeli CuAlNi numunelerin aşınma sonuçları.

Aşınma sonuçları incelendiğinde B₄C takviyeli kompozitlerin aşınma oranları, saf CuAlNi kompozitine göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bor karbürün sertlik değeri kompozitte bulunan diğer elementlerden (Cu, Al, Ni) daha yüksektir. Mikrosertlik sonuçlarına bakıldığında %5 ve %10 B₄C takviyeli kompozitlerin sertlik değerleri sırasıyla 283 ve 303 HV olarak ölçülmüştür. Aşınma oranı sonuçlarına bakıldığında sertlik değeri yüksek olan numunelerin aşınmaya karşı daha fazla dirençli oldukları görülmüştür. Aşınma grafiği incelendiğinde, artan yükte doğru orantılı olarak aşınma oranlarının arttığı görülmektedir. Literatür incelemeleri sonucunda sertlik ile aşınma dayanımı arasındaki ilişkinin doğru orantılı olduğu bilinmektedir [49].

BÖLÜM 6

GENEL SONUÇLAR

Yapmış olduğumuz bu çalışmada, toz metalurjisi (TM) yöntemiyle üreilmeye çalışılan CuAlNi ve CuAlNi-B₄C kompozitler başarılı bir şekilde üretilmiştir. Üretilen deney numuneleri, optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS), X-ışını difraktogramı (XRD), X ışını floresansı (XRF) ve mikrosertlik testlerinden başarılı bir şekilde geçmiştir. Deneysel sonuç raporları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Deney numunelerinden alınan optik mikroskop ve SEM-EDS görüntülerinde B₄C metalik toz parçacıklarının homojen bir şekilde numune içerisine dağıldığı rapor edilmiştir.
- Yapılan EDS analiz sonuçları, üretilen deney numunelerinin kimyasal bileşimlerini desteklenmiştir ve deney numunelerinin içyapılarında farklı oranlarda Cu, Al, Ni, B ve C olduğu tespit edilmiştir.
- XRD grafiği incelendiğinde Cu, Al, Ni, B₄C ve Cu₄Al, Cu₉Al₄₄, Cu₃Al intermetaliklerine ait pikler tespit edilmiştir.
- Mikrosertlik testi sonuçlarına göre B₄C parçacık takviyeli numunelerin sertliği parçacık takviyesiz numuneden daha yüksek sertlikte olduğu tespit edilmiştir. Artan B₄C miktarına bağlı olarak sertlik değerlerinde artış olmuştur. En iyi mikrosertlik değeri %10 B₄C ilave edilen numunede 303,3 HV₅ olarak ölçülmüştür.
- • Aşınma analiz sonuçlarında %10 B₄C takviyeli numunenin aşınma oranı takviyesiz ve %5 takviyeli numunelere göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Artan B₄C miktarına bağlı olarak aşınma oranı değerlerinde azalma olmuştur. Mikrosertlik

- sonuçlarına bakıldığında %5 ve %10 B₄C takviyeli kompozitlerin sertlik değerleri sırasıyla 283 ve 303 HV olarak ölçülmüştür. Literatür incelemeleri sonucunda sertlik ile aşınma dayanımı arasındaki ilişkinin doğru orantılı olduğu bilinmektedir [49]. Sinan AKSÖZ ve arkadaşları toz metalürjisi yöntemiyle ön alaşımlı NiTi tozlarından numuneler üretmişlerdir. Bu deney numunelerine sırasıyla 900°C ve 1000°C’de 6 saat ve 12 saat süresince borlama işlemlerine tabi tutmuşlardır. Bu araştırmada uygulanan tüm borlama işlem parametrelerinde numunelerin yüzey sertliklerinin arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca en fazla tabaka kalınlığı ve en yüksek sertlik miktarı 1000°C’de 12 saat süreyle borlama işlemine tabi tutulan NiTi alaşımında sırasıyla yaklaşık 50 µm ve 2074,9 HV sertlik değerinde ölçülmüştür [50].

KAYNAKLAR

1. Recarte, V., Perez-Landazabal, J. I., Rodriguez, P. P., Bocanegra, E. H., No, M. L. and San Juan, J., “Thermodynamics of thermally induced martensitic transformations in Cu-Al-Ni shape memory alloys”, *Acta Materialia*, 52: 3941-3948 (2004).
2. Taulor, P. M., Moser, A. and Creed, A., “A sixty-four element tactile display using shape memory alloy wires”, *Displays*, 18: 163-168. (1998).
3. Kayalı, N., “Cu-Zn-Al alaşımlarında martenzit stabilizasyonu ve yaşlandırma etkileri”, *Firat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi*, Elâzığ (1993).
4. Wang, W., Guo, E., Chen, Z., Kang, H., Chen, Z., Zou, C., ... and Wang, T., “Correlation between microstructures and mechanical properties of cryorolled CuNiSi alloys with Cr and Zr alloying”, *Materials Characterization*, 144: 532-546 (2018).
5. Lei, Q., Li, S., Zhu, J., Xiao, Z., Zhang, F., and Li, Z., “Microstructural evolution, phase transition, and physics properties of a high strength Cu–Ni–Si–Al Alloy”, *Materials Characterization*, 147: 315-323 (2019).
6. Kim, H., Ahn, J. H., Han, S. Z., Jo, J., Baik, H., Han, H. N., and Kim, M., “Microstructural characterization of cold-drawn Cu-Ni-Si alloy having high strength and high conductivity”, *Social Science Research Network*, (2019).
7. Gholami, M., Vesely, J., Altenberger, I., Kuhn, H. A., Janecek, M., Wollmann, M., and Wagner, L. “Effects of microstructure on mechanical properties of CuNiSi alloys”, *Journal of Alloys and Compounds*, 696: 201-212 (2017).
8. Lei, Q., Li, Z., Wang, M. P., Zhang, L., Gong, S., Xiao, Z., and Pan, Z. Y., “Phase transformations behavior in a Cu–8.0 Ni–1.8 Si Alloy”, *Journal of alloys and compounds*, 509(8): 3617-3622 (2011).
9. Semboshi, S., Sato, S., Iwase, A., and Takasugi, T. “Discontinuous precipitates in age-hardening CuNiSi alloys”, *Materials Characterization*, 115: 39-45 (2016).
10. Atapek, Ş. H., Pantelakis, S., Polat, Ş., Chamos, A., and Çelik, G. A., “Fatigue behavior of precipitation strengthened Cu–Ni–Si alloy modified by Cr and Zr addition” *International Journal of Structural Integrity*, (2020).
11. Wu, R., Zhou, K., Yang, Z., Qian, X., Wei, J., Liu, L., ... and Wang, L., “Molten-salt-mediated synthesis of SiC nanowires for microwave absorption applications”, *CrystEngComm*, 15(3): 570-576, (2013).

12. Dash, A., Sohn, Y. J., Vaßen, R., Guillon, O., and Gonzalez-Julian, J., “Synthesis of Ti₃SiC₂ MAX phase powder by a molten salt shielded synthesis (MS3) method in air”, *Journal of the European Ceramic Society*, 39(13): 3651-3659, (2019).
13. Öveçoğlu, L. M., “Toz Metalurjisi: Tarihsel Gelişim, Üretim Aşamaları ve Son Eğilimler”, *9.Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, (1997).
14. Çalgılı, U., Dikbaş, H. ve Taşkın, M., “Sıcak presleme yöntemiyle imal edilmiş SiC takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin difüzyon kaynağında sıcaklığın birleşme üzerindeki etkisinin incelenmesi” *11. Denizli Malzeme Sempozyumu*, 233-236, (2006).
15. German, R. M., “Powder metallurgy science”, *Metal Powder Industries Federation*, New Jersey, (1994).
16. Özgün, Ö., “Toz metalurjisi ile üretilen alaşımlı çeliklerin mikroyapı ve mekanik özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2007).
17. German, R. M., “Powder metallurgy science”, *Metal Powder Industries Federation*, New Jersey, (1994).
18. International ASM, “Powder metallurgy”, *ASM International*, (1998).
19. Sarıtaş, S., “Makine mühendisliği el kitabı”, *MMO*, Ankara, (1994).
20. Lu, L., Lai, M. O. and Ng, C. W., “Enhanced mechanical properties of an Al based metal matrix composite prepared using mechanical alloying”, *Mater. Sci. Eng. A.*, 2: 203-211, (1998).
21. Cambronero, C. G., Sanchez, E., Ruiz-Romen, J. M. and Ruiz-prieto, T. M., “Mechanical characterization of AA7015 aluminium alloy reinforced with ceramics”, *Journal of Materials Processing Technology*, 378-383 (2003).
22. Gozzi, M. F., Radovanovic, E., Yoshida, I. P., “Si₃N₄/SiC nanocomposite powder from a preceramic polymeric network based on poly (methylsilane) as the precursor”, *Materials Research*, 4: 13-17 (2001).
23. German, R. M., Sarıtaş, S., Türker, M. ve Durlu, N., “Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri”, *Türk Toz Metalurjisi Derneği*, Ankara (2007).
24. Ersümer, A., “Toz metalurjisi sert metal sinterleme”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası*, İstanbul (1970).
25. Kurt, A., “Toz metal bronz yatak malzemelerinin özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (1992).
26. Evans, C., “Green strength of compacted metal powders”, *Pyron Corporation*, 288-289, (1993).
27. Çiğdem, M., “İmal usulleri”, *Çağlayan Kitapevi*, İstanbul, (2006).

28. Baksan, B. and Gürler, R., “Toz metalurjisinin savunma sanayiinde uygulanması”, *Osmangazi Üniversitesi Metalurji Enstitüsü*, Eskişehir, (2003).
29. Groover M. P., “Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems”, *Wiley*, 2012.
30. Lenel, F.V., “Powder Metallurgy- Principles and Applications”, *MPIF*, New Jersey, 1980.
31. İnternet: Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Toz Metalurjisi Deneyi Föyü, <https://cdn.bartın.edu.tr/metalurji/d7ee7cd9-f063-4669-8e1c-393503ed6ffb/toz-metalurjisi-deney-foyu.pdf>.
32. İnternet: Toz Metalurjisi, <https://uslularhadde.com/toz-metalurjisi>.
33. Emre, B., “Powder Metallurgy Processes and Making Metal Powder”, *Materials and Manufacturing Technologies*, Bahcesehir University, October 2020.
34. Matik, U., “Akımsız nikel kaplamalarda ısıl işlemin sertlik ve aşınma özelliklerine etkisi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-50, (2010).
35. Cura, M. E., “Sıcak preslenmiş WC-Co/B4C kompozitlerinin mekanik, manyetik ve mikroyapısal incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2002).
36. Soham, C., Bidyut, P., Pallab, D., “Composite Biomaterials for Bone Grafting and Other Biomedical Applications”, *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier, 2021.
37. Rachid, H., Rajaa, S., Zakaria, B., Miloudi, H., Mohamed, R., Ahmed, E., “Polymer composite materials: A comprehensive review”, *Composite Structures*, 262, 2021.
38. İnternet: Kompozit Malzeme Nedir? - Tanımı ve Çeşitleri, <https://www.engineeringchoice.com/composite-material/>.
39. Thevenot, F., “Boron carbide - A comprehensive review”, *Journal of the European Ceramic Society*, 6: 205-225, (1990).
40. Yeşilkaya, B. and İbişoğlu, G., “Bor karbür ön fizibilite etüdü”, *ETİ Holding A.Ş. Genel Müdürlüğü*, Ankara, (2003).
41. Niihara, K., Nakahira, A. and Hirai, T., “The effect of stoichiometry on mechanical properties of boron carbide”, *Journal of American Ceramic Society*, 67:1, 13-14, (1984).

42. Abramshe, R. A., "Improving ceramic armor performance with better Materials", *Ceramic Industry*, 156: 14-18, (2006).
43. Şahin, F. Ç. and Yeşilçubuk, A., "B4C-ZrB2 kompozitlerinin reaktif sıcak presleme ile, B4C-TiB2 kompozitlerinin reaktif sıcak presleme ve sıcak presleme ile eldesi, BOREN-TÜBİTAK Proje No: 105M342, (2007).
44. Alaca, M. A., "Bor karbür üretimi", Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi*, Afyon, (1999).
45. Emrullahoğlu, Ö. F., "İleri teknoloji seramikleri ders notları", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Seramik Mühendisliği*, (1999).
46. Alkan, M. A., "Kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi yöntemi ile bor karbür tozu üretimi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2008).
47. Weimer, A. W., "Thermochemistry and kinetics, in carbide, nitride and boride materials synthesis and Processing", *Chapman & Hall*, London, UK, 79-114, (1997).
48. Chang, B., Gersten, B. L., Szewczyk, S. T. and Adams, J. W., "Characterization of boron carbide nanoparticles prepared by a solid state thermal reaction", *Applied Physics A – Materials Science & Processing*, 86: 83-87, (2007).
49. He, X., Xiao, H., Ozaydin, MF., Balzuweit, K., ve Liang, H., 2015, " Low-Temperature Boriding of High-Carbon Steel Xingliang", *Surface and Coatings Technology*, Cilt 263, ss. 21-26.
50. AKSÖZ, S., BOSTAN, B., & KAPLAN, Y. Borlama İşleminin T/M Tekniği ile Üretilmiş NiTi Alaşımının Mikroyapı Ve Mikrosertliğine Etkilerinin İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 1-1.

ÖZGEÇMİŞ

Berhan ŞAHİN ilk ve orta öğrenimini Manisa'da tamamladı. Akhisar Anadolu Lisesinden mezun oldu. 2006 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2011 yılında iyi derece ile mezun oldu. Mezun olduktan sonra kendi şirketini kurdu. 2022 yılında KBÜ Lisansüstü Bilimler Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programını tamamladı. Halen Karabük ve Manisa' da faaliyet göstermekte olan Şahin Organizasyon firmasında kurucu olarak devam etmektedir.