

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN
NiTiCu ALAŞIMLARININ MİKROYAPI VE
FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim Halil KAHKECİ

Anabilim Dalı: Fizik

Doç. Dr. Cengiz TATAR

2011

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN NiTiCu ALAŞIMLARININ
MİKROYAPI VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim Halil KAHKECİ

Anabilim Dalı: Fizik

Programı: Genel Fizik

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cengiz TATAR

AGUSTOS-2011

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN NiTiCu ALAŞIMLARININ
MİKROYAPI VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim Halil KAHKECİ

(09114102)

Anabilim Dalı: Fizik

Programı: Genel Fizik

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cengiz TATAR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 15 Temmuz 2011

AGUSTOS-2011

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN NiTiCu ALAŞIMLARININ
MİKROYAPI VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim Halil KAHKECİ

(09114102)

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 Temmuz 2011
Tezin Savunulduğu Tarih : 03 Ağustos 2011**

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Cengiz TATAR (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU (F.Ü)

Doç. Dr. Raşit ZENGİN (F.Ü)

AGUSTOS-2011

ÖNSÖZ

Bu Yüksek Lisans Tezi'nin hazırlanmasında bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım danışman hocam Doç. Dr. Cengiz TATAR' a şükranlarımı sunarım.

Çalışmam süresince benden yardımlarını esirgemeyen Fırat Üniversitesi Fizik Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU'na, Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Niyazi ÖZDEMİR'e, Fizik Bölümü araştırma görevlileri Dr. Ömer KAYĞILI, Merivan ŞAŞMAZ ve Köksal YILDIZ' a ayrıca arkadaşım Düzgün KAL'a teşekkür ederim.

Ayrıca tüm bu süreç boyunca bana verdikleri maddi ve manevi desteklerden dolayı aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) Birimi 2083 No' lu Proje kapsamında desteklenmiştir.

İbrahim Halil KAHKECİ

ELAZIĞ-2011

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET.....	IV
SUMMARY.....	V
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VI
TABLolar LİSTESİ.....	VIII
1. GİRİŞ.....	1
2. TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ.....	3
2.1. Toz Metalurjisi.....	3
2.2. Metal Tozlarının Hazırlanması ve Üretim Yöntemleri.....	6
2.2.1. Kimyasal Yöntemler.....	7
2.2.2. Mekanik Yöntemler.....	7
2.2.3. Elektrolitik Yöntemler.....	9
2.2.4. Atomizasyon.....	9
2.3. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Parça Üretim Süreci.....	12
2.3.1. Tozların Karıştırılması.....	13
2.3.2. Karışımın Preslenmesi.....	14
2.3.2.1. Tek Yönlü Presleme.....	16
2.3.2.2. Çift Yönlü Presleme.....	18
2.3.2.3. İzostatik Presleme.....	18
2.3.3. Sinterleme.....	23
2.3.4. İkincil İşlemler.....	25
2.4. Toz Metalurjisi Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları.....	25
2.5. Toz Metalurjisinin Uygulama Alanları.....	26
2.5.1. Kendinden Yağlamalı Yatak Burçları.....	26
2.5.2. Sürtünme Plakaları.....	27
2.5.3. Gümüş Alaşımli Dolgular.....	27
2.5.4. Elektrik Kontakları.....	27

2.5.5.	Savunma Sanayi	28
2.5.6.	Sürelî Mıknatıslar.....	28
2.5.7.	Dişliler	28
2.5.8.	Akıllı Metaller.....	29
2.5.9.	Sert Elmas Kesici Uçlar.....	29
2.5.10.	NiTiCu Alaşımları	30
2.5.11.	Toz Metalürjisinin Durumu	31
3.	MATERYAL VE METOT.....	34
3.1.	Deney Numunelerinin Üretimi ve Kullanılan Tozların Özellikleri	34
3.2.	Toz Karışımının Hazırlanması.....	34
3.3.	Presleme İşlemi.....	36
3.4.	Yoğunluk Ölçümü ve Gözeneklilik Hesabı.....	38
3.5.	Mikrosertlik Ölçümleri	38
3.6.	Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC).....	40
3.7.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	40
4.	ÖLÇÜM SONUÇLARI	42
4.1.	Yoğunluk ve Gözeneklilik Ölçümü	42
4.2.	Mikrosertlik Ölçümü.....	42
4.3.	Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) Ölçümleri	43
4.4.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntülemeleri ve Enerji Dağılımlı X-Işını (EDS) Analizleri	46
5.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	54
5.1.	İleri Çalışmalar İçin Öneriler	55
	KAYNAKLAR.....	56
	ÖZGEÇMİŞ.....	62

ÖZET

Bu tez çalışmasında, üç farklı kompozisyonda NiTiCu toz metal alaşımları toz metalurjisi tekniği kullanılarak sıcak izostatik pres (HIP) yapılarak üretilmişlerdir. Üretilen malzemelerin mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Sıcak izostatik pres (HIP) sonrası alaşım yüzdeleri değişeceğinden dolayı numunelerin en az iki farklı bölgesinden alınan EDS sonuçları kullanılarak alaşım oranları belirlendi. Alaşımların termal özellikleri diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) kullanılarak incelendi.

Üretilen alaşım yoğunlukları Arşimet prensibi kullanılarak ölçüldü ve gözeneklilik miktarları belirlendi.

Ayrıca alaşımların mikrosertlik değerleri, FM-700 model vickers sertlik ölçüm cihazından yararlanılarak tespit edildi. Bakır katkısı arttıkça alaşımların yoğunlukları artarken, mikrosertlik ve gözeneklilik değerleri azaldığı görüldü.

Anahtar Kelimeler: NiTiCu, HIP, toz metalurjisi.

SUMMARY

Investigation of Physical and Microstructure Properties of NiTiCu Alloys Produce by Powder Metallurgy Method

In this thesis, NiTiCu powder metal alloys in three different compositions were produced with hot isostatic pressing (HIP) process of powder metallurgy technique. Microstructures of the produced alloys were investigated by using scanning electron microscope (SEM). Due to changes of the alloy percentages after HIP technic, alloys rates were determined by using energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) results received from least two different zones. Thermal properties of alloys were investigated by using a differential scanning calorimetry (DSC).

Density of the alloys were measurement with Archimedes' principle. Quantities of porosity were determined

Also microhardness values were determined by using FM-700 design vicker hardness measurement. It seems that, when cooper quantity increase while density is also increasing and microhardness and porosity are decreasing.

Key Words: NiTiCu, HIP, powder metallurgy.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1.	Toz metalurjisi ile üretilen parçaların dünya genelindeki pazar payları.....	4
Şekil 2.2.	Bir arabada kullanılan toz metalurjisi ile üretilmiş parçalar	5
Şekil 2.3.	Demir ve bakır esaslı toz metalurjisi parçaları.....	5
Şekil 2.4.	Tane boyutu ve metal toz uygulamaları arasındaki ilişki	6
Şekil 2.5.	Mekanik Öğütme yönteminin şematik gösterimi	8
Şekil 2.6.	Elektrolitik yöntemle toz üretiminin mekanizması	9
Şekil 2.7.	Farklı metallerden elde edilen toz şekillerinin SEM görüntüleri	11
Şekil 2.8.	Toz metalurjisi yöntemi ile parça üretim aşamaları	13
Şekil 2.9.	TM ile elde edilen numunede basınç değişiminin farklı özelliklere etkisi	14
Şekil 2.10.	TM ürünlerinde çekme mukavemetinin %teorik yoğunlukla değişimi	15
Şekil 2.11.	Toz metalurjisi yönteminde presleme işleminin basamakları.....	16
Şekil 2.12.	Presleme işleminde kullanılan kalıp ve diğer elemanlar.....	16
Şekil 2.13.	Tek yönlü presleme basamakları; 1- Besleme ayağının kalıba yaklaşması. 2- Besleme. 3- Presleme. 4- Karışımın sıkıştırılması. 5- Parçanın Kalıptan Çıkarılması. 6- Yeniden besleme	17
Şekil 2.14.	İndüksiyon İle kalıbın ısıtılması; 1. Grafit Yan tutucular, 2. Baskı grafitleri, 3. Preslenecek malzeme, 4. İndüksiyon sargısı.....	20
Şekil 2.15.	Dolaylı dirençli ısıtma tekniği ile ; 1. Grafit Yan tutucular, 2. Baskı grafitleri, 3. Preslenecek malzeme, 4. Grafit ısıtıcı	21
Şekil 2.16.	Direkt ısıtma tekniği; 1. Grafit Yan tutucular, 2. Baskı grafitleri, 3. Preslenecek malzeme, 4. Grafit elektrot, 5. Bronz Plaka, 6. Bakır elektrot, 7. Güç Kaynağı	21
Şekil 2.17.	Presleme basıncındaki artışlar sırasında kalıp içindeki taneciklerin durumu	22
Şekil 2.18.	Toz taneciklerinin birleşmesini gösteren SEM görüntüsü	24
Şekil 2.19.	Sinterleme ısı işlem basamağının süreci.....	24
Şekil 2.20.	Kendinden yağlamalı yatak burçlarının gösterimi.....	26
Şekil 2.21.	Toz metalurjisiyle üretilmiş elektrik kontaklarının çeşitleri	27

Şekil 2.22. Farklı boyutlarda hazırlanan toz metalurjisi alet parçaları.....	28
Şekil 2.23. Farklı boyut ve şekillerde üretilmiş elmas uçlar.....	29
Şekil 2.24. Emniyet vanası olarak kullanılan NiTiCu çalıştırıcılar	31
Şekil 2.25. Yangınlara karşı NiTiCu alaşımı ile yapılmış duş vanaları	31
Şekil 3.1. Numunelerin üretiminde kullanılan 88-tipi mikserin yan, üst ve ön görünüşü.....	35
Şekil 3.2. Sıcak presleme makinesi üniteleri; a) Argon gazı atmosferindeki presleme kabini, b) Otomasyon panosu, c) Argon gazı tüpü, d) Hidrolik basınç üreten asenkron elektrik motoru	36
Şekil 3.3. Sıcak presleme işlemi sonunda elde edilen numuneler	37
Şekil 3.4. Mikrosertlik ölçüm cihazı	39
Şekil 3.5. Vickers sertlik ucu şematik gösterimi.....	39
Şekil 3.6. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDS analiz cihazı.....	41
Şekil 4.1. N1 numunesine ait dakikada 5 °C ısıtma hızı ile alınan DSC ölçüm eğrileri	43
Şekil 4.2. N2 numunesine ait dakikada 5 °C ısıtma hızı ile alınan DSC ölçüm eğrileri	44
Şekil 4.3. N3 numunesine ait dakikada 5 °C ısıtma hızı ile alınan DSC ölçüm eğrileri	45
Şekil 4.4. Isıl işlem uygulanmayan N1 numunesinin SEM görüntüsü	46
Şekil 4.5. Isıl işlem uygulanmayan N2 numunesinin SEM görüntüsü	46
Şekil 4.6. Isıl işlem uygulanmayan N3 numunesinin SEM görüntüsü	47
Şekil 4.7. Isıl işlem uygulanan N1 numunesinin SEM görüntüleri	48
Şekil 4.8. Isıl işlem uygulanan N1 numunesinin 1. bölgedeki EDS analizi	49
Şekil 4.9. Isıl işlem uygulanan N1 numunesinin 2. bölgedeki EDS analizi	49
Şekil 4.10. Isıl işlem uygulanan N2 numunesinin SEM görüntüleri	50
Şekil 4.11. Isıl işlem uygulanan N2 numunesinin 1. bölgedeki EDS analizi	51
Şekil 4.12. Isıl işlem uygulanan N2 numunesinin 2. bölgedeki EDS analizi	51
Şekil 4.13. Isıl işlem uygulanan N3 numunesinin SEM görüntüleri	52
Şekil 4.14. Isıl işlem uygulanan N3 numunesinin 1. bölgedeki EDS analizi	53
Şekil 4.15. Isıl işlem uygulanan N3 numunesinin 2. bölgedeki EDS analizi	53

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1.	Bazı materyallerin toz üretim yöntemi	12
Tablo 2.2.	Bazı farklı metallerin presleme basınçları	15
Tablo 3.1.	Toz karışım oranları	34
Tablo 3.2.	Otomasyon sistem reçetesi.....	37
Tablo 4.1.	Yoğunluk ve gözeneklik verileri	42
Tablo 4.2.	Mikrosertlik değerleri	42
Tablo 5.1.	Üretilen numunelerin dönüşüm sıcaklıkları ve entalpi değerleri	55

1.GİRİŞ

Teknolojik gelişmelere paralel olarak, sanayinin temel yapıtaşı olan malzeme ve malzeme bilimindeki gelişmeler hızlı bir şekilde artmıştır. Teknolojik çalışmalarda kullanılan hammadde kaynaklarının sınırlı olması, ayrıca bu malzemelerin fiziksel ve kimyasal açılarından yetersizliği, malzeme bilimcilerini yeni malzemeler geliştirmeye zorlamaktadır [1]. Toz metalurjisi (T/M), diğer bilinen ve geleneksel üretim teknolojileri ile karşılaştırıldığında, talaşlı işlem ihtiyacının gerekmemesi ya da az gerekli olması, karmaşık geometriye sahip parçaların seri olarak üretilebilmesi, çok geniş kompozisyon aralığına sahip parçaların üretilebilmesi, arzu edilen mekanik özelliklere sahip parçaların rahatlıkla imal edilebilmesi, malzeme kayıplarının çok az olması gibi nedenlerden dolayı endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır [2–5]. Ayrıca bu üretim yöntemi, yatırım maliyetlerinin düşük olması, kullanılan donanımlarda esneklik, yüksek verimlilik, farklı özelliklere sahip malzemelerin kolaylıkla üretilebilmesi gibi birçok avantaja sahiptir [4].

Bu yöntem, metal işleme teknolojileri arasında çok büyük farklılık gösteren bir üretim yöntemidir. Toz metalurjisi, metal ve metal alaşımlarından, fiziksel ve kimyasal yöntemlerle elde edilen metal tozlarının preslenmesi ve daha sonra üretilecek malzemelerin yapısındaki toz tanecikler arasında kuvvetli bağlar oluşturmak için sinterlenmesi işlemleridir. Toz metalurjisi işlemi, şekillendirme, presleme ve daha sonradan parçacıkların sinterlenmesi yolu ile ısıl olarak bağlanmasını içerir. Metal tozlarının boyutları mikron mertebesindedir. Toz metalurjisi ile üretilen parçaların büyük kısmında elde edilen boyutsal hassasiyet ve yüzey kalitesi talaşlı işlem gibi ekstra operasyonlara gereksinimi ortadan kaldırmaktadır.

Toz metalurjisinin önemi; döküm, talaşlı işlem veya plastik deformasyonla şekillendirilmesi oldukça zor veya imkânsız olan alaşımların bu yöntemle kolaylıkla ve ekonomik bir şekilde mamul haline getirilmesinden kaynaklanmaktadır. Bir metal şekillendirme tekniği olmasının yanı sıra toz metalurjisi aynı zamanda bir malzeme üretim yöntemidir. Periyodik cetvelde metal olarak kabul edilen 86 kadar elementten 8000 kadar alaşım üretilmiştir. Aslında bu 86 elementten ikili, üçlü, dörtlü gibi farklı kombinasyonlarla 10^{25} mertebesinde alaşım üretebilmek mümkün olabilir. Bunu mümkün kılacak olan yegane yöntem ise toz metalurjisi yöntemi olarak görülmektedir. Günümüzde

toz metalurjisiyle parça üretiminin tercih edilmesine maliyet açısından baktığımız zaman gelişen ve ilerleyen teknolojik yeniliklerle birlikte en önemli ve üstün özelliklerden biri olacaktır. Toz metalurjisiyle üretilmek istenen parçalar üretildikten hemen sonra kullanılabilceği gibi istenirse ikincil işlemlere de bırakılabilir. Döküm ve klasik üretim metotlarıyla üretilmesi mümkün olmayan malzemelerin yapımı toz metalurjisi yöntemiyle gerçekleştirilebilmektedir [6].

Toz metalurjisi yönteminde ekonomik ve seri imalat yapılan en avantajlı yöntemlerden biri sıcak presleme tekniğidir. Sıcak presleme tekniğinde argon gazı atmosferinde basınç ve sinterleme işlemi bir arada yapıldığından ayrı bir sinterleme işlemi gerektirmez. İşlem basınçla birlikte yapıldığı için kısa sürede gerçekleşmektedir. Daha önceden hazırlanmış kalıplar sayesinde grafit kalıplara konulan metal tozları 10 dakikalık kısa bir sürede imal edilebilmektedir. Ayrıca düzgün içyapılı malzemeler, yüksek yoğunluk, düşük maliyet, sıcak presleme tekniğinin avantajları arasındadır. T/M yöntemiyle oksitlenmeyen seramikler yapılmaktadır. Bu yöntemle saptanan fiziksel özellikleri daha iyi olan ve yüksek yoğunluklara bağlı olarak dayanıklılık sağlanmaktadır [7].

Üçlü alaşım sınıfı içerisinde yer alan NiTiCu alaşımı ikili NiTi alaşımında bir miktar nikelin periyodik tablodaki komşusu olan bakır ile yer değiştirmesi ile oluşturulmuştur [8]. Bu yeni alaşımında bakır ilavesiyle karakteristik sıcaklık tutarlı olduğundan ve yorulma direncinde artma sağlandığından son yıllarda yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Literatürde NiTiCu alaşımaları üzerine şekil hafıza etkisi, ince film, kaynak edilebilirlik gibi birçok çalışma yapılmıştır [9,10].

Bu tez çalışmasında, toz metalürjisi yöntemi ile üç farklı kompozisyona sahip NiTiCu alaşımaları üretilmiştir. Üretilen NiTiCu alaşımalarının mikroyapı ve fiziksel özelliklerinin farklı kompozisyonlarla nasıl bir değişim sergilediği incelenmiştir.

2. TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ

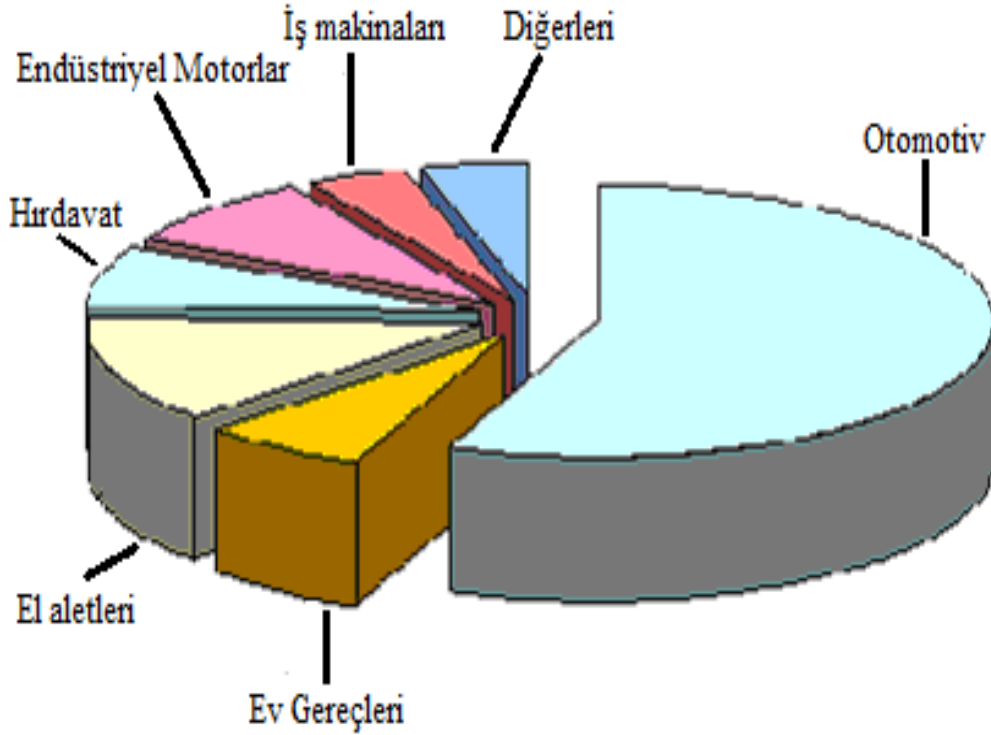
2.1. Toz metalurjisi

Parçanın şekil ve boyutlarına uygun olarak metal esaslı tozları presleyip, belli bir sıcaklık aralığında vakum veya koruyucu gaz atmosferinde sinterlenmesi ile üretimine Toz Metalurjisi denir [11]. Toz metalurjisi, mekanik ve fizikokimyasal yöntemlerle metal ve ametal alaşımları toz haline getirmek ve tozları ergitmeden basınç ve sıcaklık yardımıyla iş parçası üretmektir [12]. Bu yöntemde; 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 [13]. Sinterleme ısıl işlemi, eğer kullanılan tozlar bir karışım halindeyse, bu tozlardan en yüksek ergime sıcaklığına sahip olan tozun ergime sıcaklığı altında yapılır. Bazı durumlarda sinterleme, düşük ergime sıcaklığına sahip tozun ergime derecesinin üzerinde yapılır. Bu şekildeki sinterleme işlemine sıvı faz sinterlenmesi denir.

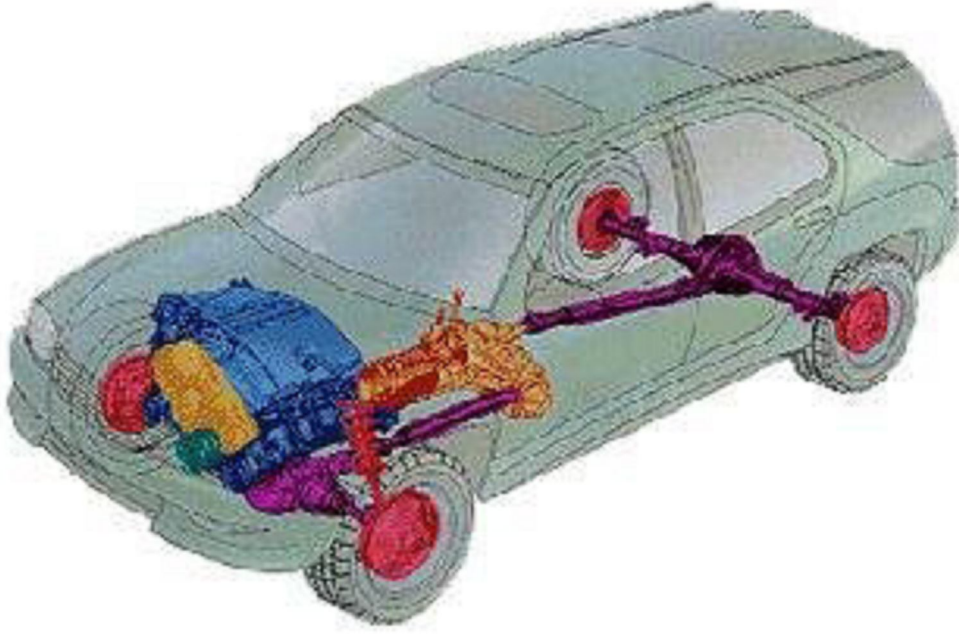
Toz metalurjisi, çeşitli metal işleme teknolojileri arasındaki en farklı üretim tekniğidir. Yüksek kaliteli ve karmaşık parçaların ekonomik olarak üretilebilmesi toz metalurjisinin kullanımını etkili kılmaktadır. Toz metalurjisi farklı boyut, şekil ve paketleme özelliğine sahip metal tozlarının önce preslenmesi ve daha sonra taneciklerin sinterleme yoluyla birleştirilerek sağlam, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürülmesidir. Toz metalurjisi düşük enerji tüketimine, yüksek malzeme kullanımına ve düşük maliyete sahip otomatikleşmiş işlemleri düzenli bir şekilde kullandığı için, sahip olunan bu özellikler ile verimlilik, enerji ve hammadde gibi günümüz kaygılarını ortadan kaldırmaktadır. Toz metalurjisi küçük, karmaşık ve boyutsal hassasiyeti yüksek parçaların imalatlarına 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 [14]. Bu sebeplerden dolayı, toz metalurjisi sürekli bir gelişim göstermekte ve geçmişten günümüze gelenekselleşmiş metal şekillendirme yöntemlerinin yerini almaktadır.

Toz metalurjisi çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Tungsten lamba teli, diş dolguları, otomotiv güç aktarma dişlileri, zırh delici mermiler, elektrik kontakları ve fırçaları, mıknatıslar, nükleer güç yakıt elemanları, yüksek sıcaklık filtreleri, şarj edilebilir piller, jet motoru parçaları, kendinden yağlamalı yataklar, akü parçaları ve yağlamasız yatak elemanlarının parçaları metal tozlarından üretilen parçalara örnek olarak verilebilirler.

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen parçaların dünya genelindeki pazar payları, otomotiv endüstrisindeki kullanımı ve üretilen bazı parçalar aşağıdaki Şekil 2.1, Şekil 2.2 ve Şekil 2.3’de verilmiştir. Pazar payındaki en yüksek oran %75 kullanımla otomotiv endüstrisine aittir. Bir Amerikan yapımı arabada ortalama olarak 16kg, Avrupa yapımı arabada 7kg ve Japon yapımı arabada ise 5kg toz metalurjisi ile üretilen parça kullanılmaktadır.



Şekil 2.1. Toz metalurjisi ile üretilen parçaların dünya genelindeki pazar payları



Şekil 2.2. Bir araba da kullanılan toz metalurjisi ile üretilmiş parçalar

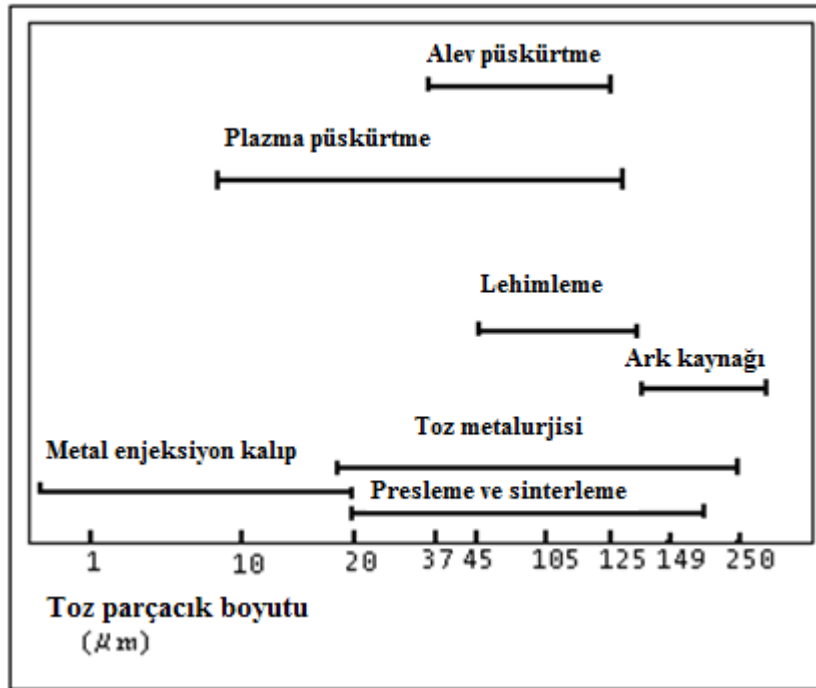


Şekil 2.3. Demir ve bakır esaslı toz metalurjisi parçaları

2.2. Metal Tozlarının Hazırlanması ve Üretim Yöntemleri

Yaklaşık olarak doğadaki bütün materyaller toz haline getirilebilirler. Metal tozların hazırlanmasında sanayide çok sayıda yöntem mevcuttur, ancak tozları üretmek için seçilen yöntemler malzeme özelliklerine göre değişim gösterirler. Metal malzeme üretimi açısından, ortalama boyutları birkaç mikrona kadar parçalanmış tanecikler toz olarak tanımlanırlar. Gelişen teknolojiyle birlikte toz boyutu git gide küçülmektedir. Tozun geometrik şekli üretim yöntemlerine bağlı olarak küreselden dentritik şekle göre değişmektedir [14]. Toz üretim yöntemleriyle üretilen tozların boyutları, şekilleri, mikroyapıları ve kimyasal özellikleri arasında daima bir ilişki vardır. Bundan dolayı belirli özellikteki tozların üretiminde farklı üretim yöntemleri kullanılmaktadır. Toz metalurjisi imalat teknikleri ve metal tozları imalat teknolojileri arasında kuvvetli bir bağ vardır. Kullanılan yöntemler üretilen tozun fiziksel özelliklerini etkilemektedir. Bu bakımdan planlanan parça üretimine göre uygun toz seçimi yapılmalıdır [15].

Tozun boyutu, şekli ve yüzey morfolojisi kullanılan metal ve alaşımın üretiminde hangi parametrelerin kontrol edilebileceğini yansıtır. Boyut toz metalurjisinde son kullanım için belirlenen önemli bir özelliktir. Şekil 2.4’de bazı toz metalurjisi uygulamalarıyla metal toz boyutu şekillendirilmiştir.



Şekil 2.4. Tane boyutu ve metal toz uygulamaları arasındaki ilişki [16].

Metal tozlarının hazırlanmasında genellikle aşağıdaki yöntemler kullanılır.

- 1- Kimyasal yöntemler
- 2- Mekanik yöntemler
- 3- Elektrolitik yöntemler
- 4- Atomizasyon yöntemleri

2.2.1. Kimyasal Yöntemler

Genelde tüm metal tozları kimyasal yöntemlerle üretilebilirler. Kimyasal yöntemlerle katı, sıvı veya buhar tepkimeleriyle toz üretimi gerçekleştirilebilir. Başlıca üretim yöntemleri şunlardır;

- a) Gaz altında katının ayrışması
- b) Termal ayrışma
- c) Sıvıdan çöktürme
- d) Gazdan çöktürme

Kullanılan bu kimyasal yöntemlerin avantajları aşağıdaki gibidir.

- Metal ve oksitlerin boyut kontrolü yapılabilir,
- Metal oksitler kolaylıkla bulunabilir,
- Gözenekli porlar elde edilebilir,
- Clad yapılmış tozlar elde etmek mümkündür,
- Üretilen tozların akıcılığı çok iyidir.

Dezavantajları ise şöyle sıralanabilir.

- Alaşım tozlarının üretilmesinin mümkün olmayışı,
- Metal oksit saflığının toz saflığını etkilemesi [17].

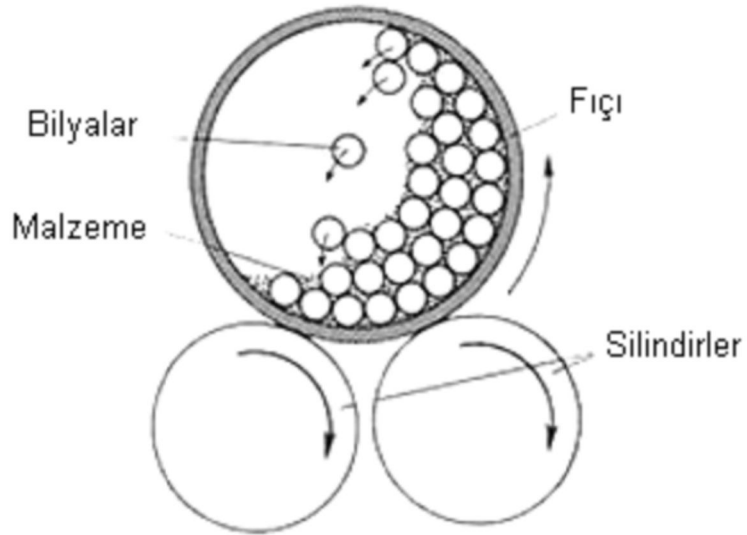
2.2.2. Mekanik Yöntemler

Kırılgan ve gevrek bir yapıya, kimyasal bağları zayıf ve kayma sistemi az olan karışık kristalli yapılara sahip metal alaşımlarının ve seramik malzemelerin çarpışma sonucu ufalanarak toz haline getirilmesi işlemidir. Ayrıca malzemeler mekanik ve pnomatik olarak kırma ve öğütme şeklinde de parçalanarak toz haline getirilirler. Bu amaçla kullanılan makineleri kırıcılar, kaba ve ince öğütücüler olarak gruplandırabiliriz. Kırıcılar genellikle cevher hazırlamada, kaba ve ince öğütücüler ise birkaç mikrona kadar

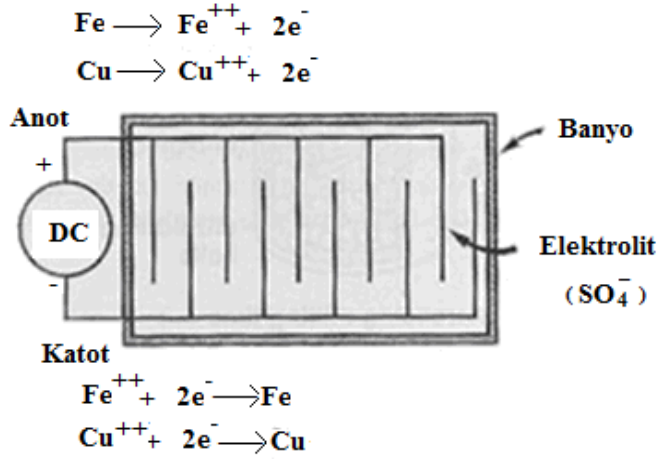
değişen boyutlarda toz hazırlamada kullanılırlar [18]. Seramik malzemeler, metaller arası bileşikler, ferrosilis ve ferrokrom gibi gevrek alaşımlar bilyeli değirmenlerde öğütülür ve toz haline getirilirler. Gevrek olmayan malzemelerin kırılması zor olduğu için öğütme işlemi genellikle bu tür malzemelere uygulanmaz. Bunun yerine bazı sünek malzemelerin sıvı azot ile soğutularak gevrek hale getirilmesi ve öğütme işlemine elverişli duruma ulaşabilmesi için bu işlem uygulanır.

Bu yöntem metal tozlarının öğütülmesinde yaygın olarak kullanılmakla birlikte, düşük hızlarda çalıştıklarından öğütme süresi uzundur [19]. Mekaniksel yöntemle üretilen tozlar çoğunlukla boyacılık ve baskı uygulamalarında fleyk metal tozu üretiminde kullanılır. Bunun yanı sıra, oksit tozların üretiminde en çok kullanılan metottur [20]. Şekil 2.5’de mekanik öğütme yönteminin temsili resmi gösterilmiştir.

Başlıca üretilen metal tozları Al, Cu ve piriçtir. Bunların yanı sıra Sn, Pb, Mn, Co, Si, Zn, Fe, Fe esaslı ve Cu esaslı tozlarda üretilebilmektedir [21].



Şekil 2.5. Mekanik öğütme yönteminin şematik gösterimi [18].



Şekil 2.6. Elektrolitik yöntemle toz üretiminin mekanizması [18].

2.2.3. Elektrolitik Yöntemler

Genellikle iyi preslenebilen ve sinterlenebilen yüksek saflıktaki metal tozlarının üretiminde bu metot kullanılır. Bu yöntemle elde edilen tozlar %99.99 saflıktadır [22]. Bu yöntemde tozu elde edilecek olan malzeme anot olarak, elektrolitik banyo içerisine yerleştirilir. Gerilim uygulandığı zaman anottaki malzeme elektrolitik banyo içerisinde çözünür ve katot üzerinde toplanır. Daha sonra işlemler sonucu elde edilen metal parçacıkları yıkanır, kurutulur, redüklenir, tavlınır ve öğütülerek ince toz haline getirilirler [6,19]. Elektrolitik yöntemle elde edilen toz dentritik, süngerimsi ve gözenekli bir yapıya sahiptir [12]. Tozun spesifik özellikleri, elektrolit kompozisyonuna, elektrolit sıcaklığına, elektrolit sirkülasyon hızına, akım yoğunluğuna, anot ve katodun büyüklüğüne ve şekline, elektrot aralığı ve tozun uzaklaştırma hızı gibi etkenlere bağlıdır. Banyo sıcaklığı ise genellikle 60°C civarındadır [22]. Bu yöntemle en çok bakır tozu üretilir. Bunun yanı sıra demir, nikel, kobalt ve benzeri birçok metal tozu da bu yöntemle üretilebilmektedir [12]. Şekil 2.6'da elektrolitik yönteminin şematik çizimi gösterilmiştir.

2.2.4. Atomizasyon

Atomizasyon bir sıvı metalin 100-150 µm'den daha küçük boyutlarda sıvı damlacıklar oluşturacak şekilde parçalanması ve bu parçacıkların ani ve aşırı soğumasıyla toz haline getirilmesidir. Buna bağlı olarak ergitilebilen malzemelerin atomize

edilebileceğini söyleyebiliriz [23]. Günümüzde endüstride en fazla kullanılan yöntem atomizasyon yöntemidir. Atomizasyonun temel prensibi, atomizasyon ortamında ergiyik metalin kararsız ve dağılmış hale gelene kadar parçalanmasıdır. Atomizasyon yönteminde kullanılan gaz çeşitleri genellikle argon, azot veya hava, kullanılan sıvı ise su'dur. Püskürtme açısı, püskürtme konisi, akışkan hızı, akışkan debisi, akan metalin kalınlığı gibi birçok parametrenin kontrolü ile çok farklı boyutlarda toz üretimi mümkündür. Katılma hızına bağlı olarak parçacığın şekli küresel halden, su veya düşük ısı kapasiteli gaz kullanılması halinde ise daha düzensiz parçacığa kadar farklılık gösterebilir.

İki akışkan atomizasyonu olarak da adlandırılan su ve gaz atomizasyonu ucuz ve yüksek kapasitede toz üretimi için tercih edilmektedir. Bu yöntemin üretim tekniği; bir sıvı metalin pota dibindeki bir delikten akması sırasında, üzerine basınçlı gaz veya sıvı gönderilmesi ile ergimiş metalin çok ince parçalara ayrılarak katılaştırılmasıdır. Günümüzde üretilen metal tozlarının % 80 'i atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir. Sıvı metalin su jeti ile parçalanması "suyla atomizasyon" gaz jeti ile parçalanması "gazla atomizasyon" ve santrifüj kuvvetle parçalanması "santrifüj atomizasyon" olarak bilinir. Bunların içerisinde su atomizasyonu en yaygın olarak kullanılan yöntemdir [14].

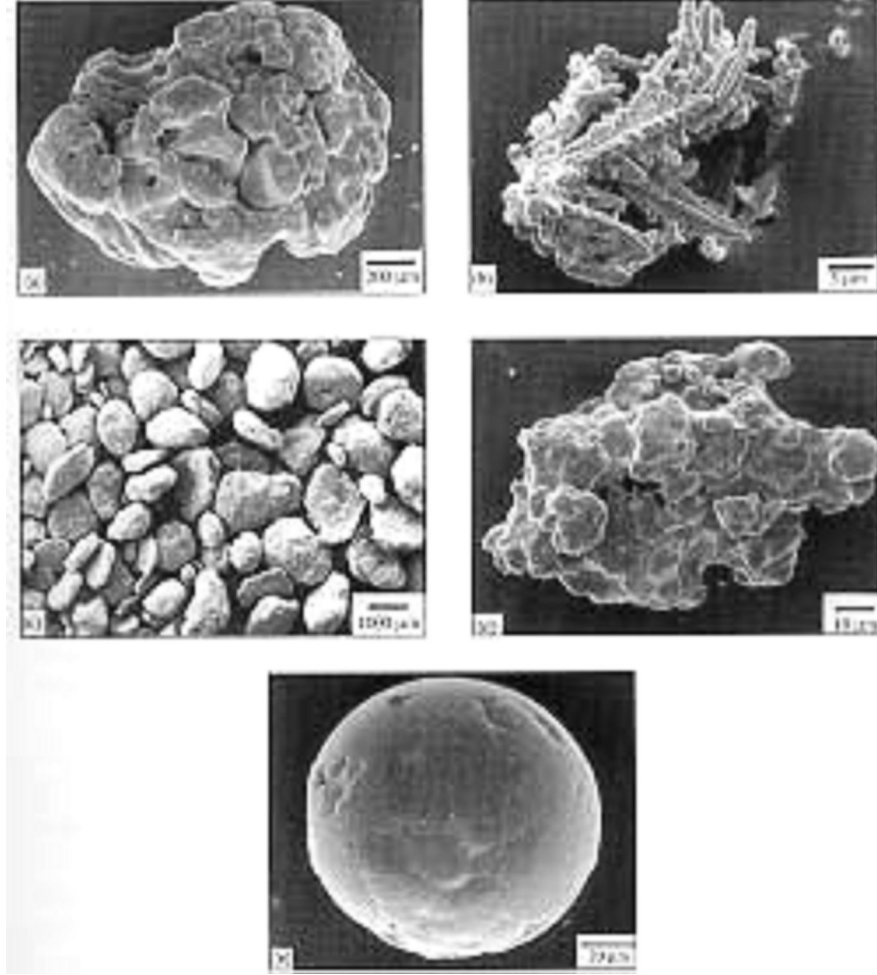
Atomizasyon yöntemiyle toz metal üretiminin tercih edilmesinin nedenleri şu şekilde sıralanabilir.

- Atomizasyon yöntemlerinin çeşitliliği sayesinde, istenilen değerlerde tozun boyutu, şekli ve yüzey yapısı gibi fiziksel ve kimyasal özellikler elde edilebilir.
- Ergitilebilen malzemelerin hemen hemen tamamı bu yöntemle toz haline getirilebilir.
- Demir tozlarının dışında, alüminyum, bakır, paslanmaz çelik gibi yüksek kalitede tozlar, demir ve demir içermeyen alaşımların toz üretimi atomizasyon yöntemleriyle sağlanmaktadır.

Başlıca atomizasyon yöntemleri şunlardır;

- a) Su atomizasyonu
- b) Gaz atomizasyonu
- c) Yağ atomizasyonu
- d) Döner disk atomizasyonu

Şekil 2.7’de bazı toz üretim yöntemleriyle üretilen toz şekillerinin SEM fotoğrafları verilmiştir. Üretim yöntemine göre toz şekilleri farklılıklar göstermektedir.



Şekil 2.7. Farklı metallere elde edilen toz şekillerinin SEM görüntüleri [15].

Tablo 2.1’de bazı materyallerin hazırlanmasında kullanılan tozların üretim yöntemleri verilmiştir.

Tablo 2.1. Bazı materyallerin toz üretim yöntemi [6].

Materyal	Yöntem
Takım çelikleri	atomizasyon
Alüminyum	atomizasyon, mekanik öğütme
Berilyum	atomizasyon, mekanik öğütme
Kobalt	kimyasal yöntemler
Kompozitler	mekanik alaşımlama
Bakır alaşımları	atomizasyon
Altın	atomizasyonu, kimyasal yöntemler, elektrolitik
Demir	atomizasyon
Nikel alaşımlar	atomizasyon
Süperalaşımlar	mekanik alaşımlama, atomizasyon

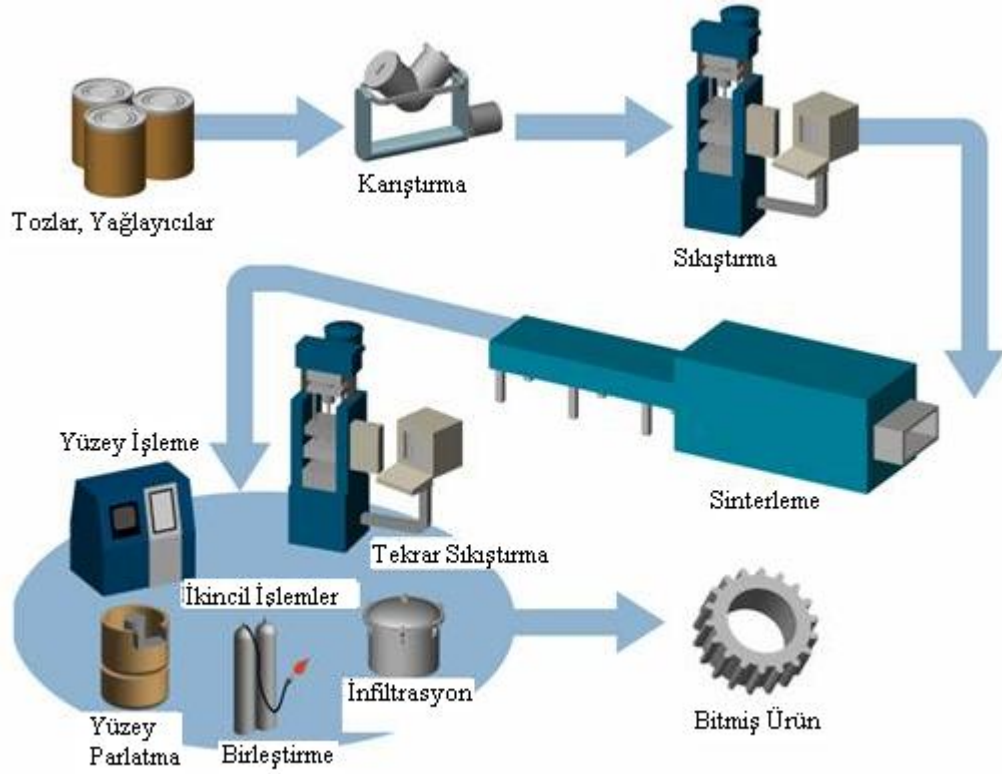
2.3. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Parça Üretim Süreci

Toz metalurjisiyle parça üretimi nihai ölçülerde ve hassas boyutlarda parça üretimine imkan verdiğinden çok önemli ve üretim miktarı ile karmaşıklığı göz önüne alındığında oldukça ekonomik sayılabilecek bir üretim tekniğidir [18].

Toz metalurjisi yöntemi ile toz metaller kullanılarak parça üretim süreci dört aşamadan oluşur.

1. Tozların karıştırılması
2. Karışımın preslenmesi
3. Sinterleme
4. İkincil işlemler

Aşağıdaki Şekil 2.8’de toz metalurjisi ile parça üretiminin işlem basamakları verilmiştir.



Şekil 2.8. Toz metalurjisi yöntemi ile parça üretim aşamaları [24].

2.3.1. Tozların Karıştırılması

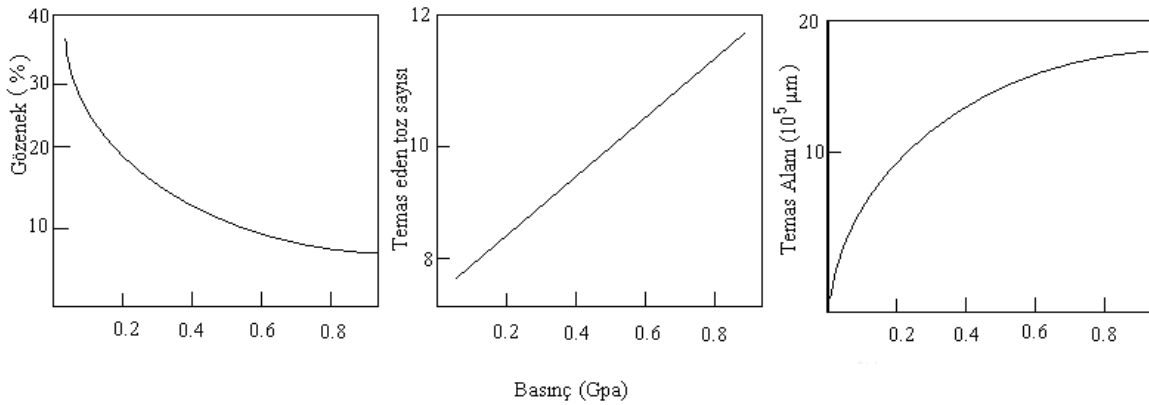
Metalik tozlar, yağlayıcılar ve isteğe bağlı alaşım elementleri ile homojen bir karışım elde etmek için karıştırılırlar. Tozların karıştırılması çift konili karıştırıcılarda yapılmaktadır. Bu işlemde karışım içerisine genellikle %0,5 ile %1,5 arasında yağlayıcı ilave edilir [14]. Karışımında yağlayıcı kullanılmasının en önemli nedeni presleme sırasında tanecikler arasındaki sürtünmeyi azaltmaktır ve kalıptan preslenen parçanın sıyrılmasını kolaylaştırmaktır. Sürtünmenin azalması sıkıştırılan toz metal parçaların kalıptan kolayca çıkmasına yardımcı olur [25].

Sıvı yağlayıcılar tozun akma özelliğini bozduğu için karışıma ilave edilen yağlayıcılar genellikle kuru toz şeklindedir [17,26]. En yaygın yağlayıcılar metal stearatlar ve parafindir. Sinterleme sırasında yağlayıcılar yanarak malzemedan çıkmaktadırlar. Karmaşık şekilli parçaların kalıptan çıkarılmasını kolaylaştırmak için kullanılan yağlayıcı miktarı artırılabilir. Yağlayıcı ve toz karışımının yoğunluğu ve karıştırma zamanı, toz karışımının akış ve yoğunluk gibi özelliklerini etkiler.

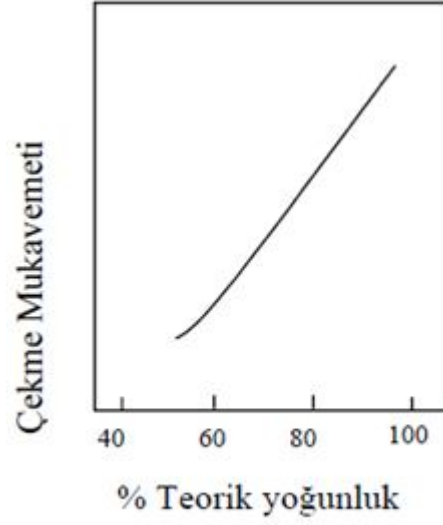
2.3.2. Karışımın Preslenmesi

Metal tozlarından parça üretebilmek için tozları parçanın şekline göre preslemek ve tozlar arasında mekanik bağlar oluşturmak gereklidir. Presleme yöntemleri üretilecek parçaya şeklini verir, fakat gerekli parça mukavemeti ancak sinterleme işleminden sonra oluşmaya başlar [14]. Presleme genellikle oda sıcaklığında ve özel hazırlanmış çelik kalıplarda yapılmaktadır. Kalıplar sementit karbür esaslı ve ısıl işleme sertleştirilmiş takım çeliğinden imal edilirler [21].

Tozların preslenmesi sırasında presleme basıncına göre gözenek miktarı değişmekte olup, basınç arttıkça gözenek miktarı azalmaktadır. Ayrıca artan presleme basıncına göre birbirine temas eden toz sayısı ve yüzey alanı artmaktadır. Gözenek miktarı arttıkça yoğunluk azalır. Toz metalurjisi ile üretilen parçalarda gözenek miktarına göre çekme mukavemeti değişmektedir. Yoğunluk arttıkça çekme mukavemeti de artmaktadır. Şekil 2.9'de basıncın numunenin fiziksel özellikleri üzerine etkisi ve Şekil 2.10'de ise toz metalurjisi ile üretilen numunelerin teorik yoğunluğa göre çekme mukavemetleri gösterilmiştir [15].



Şekil 2.9. TM ile elde edilen numunede basınç değişiminin farklı özelliklere etkisi [15].

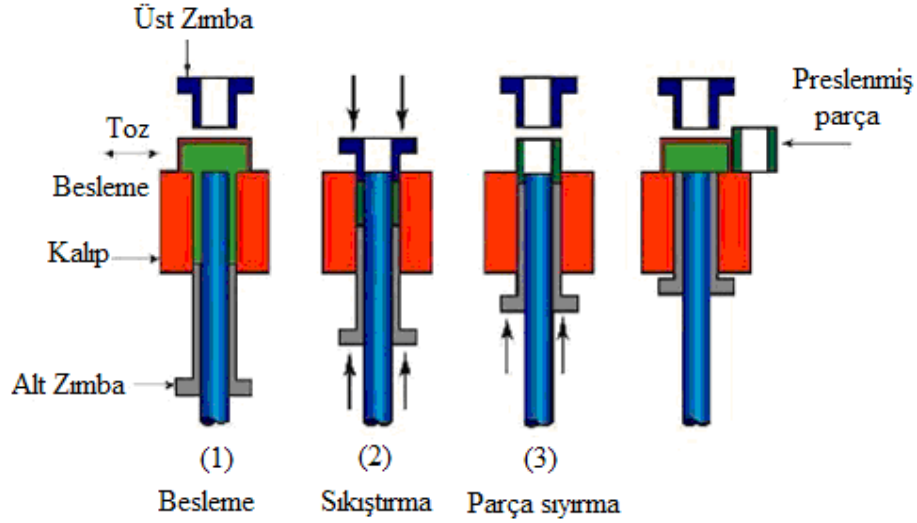


Şekil 2.10. Toz metalurjisi ürünlerinde, çekme mukavemetinin % teorik yoğunlukla değişimi [15].

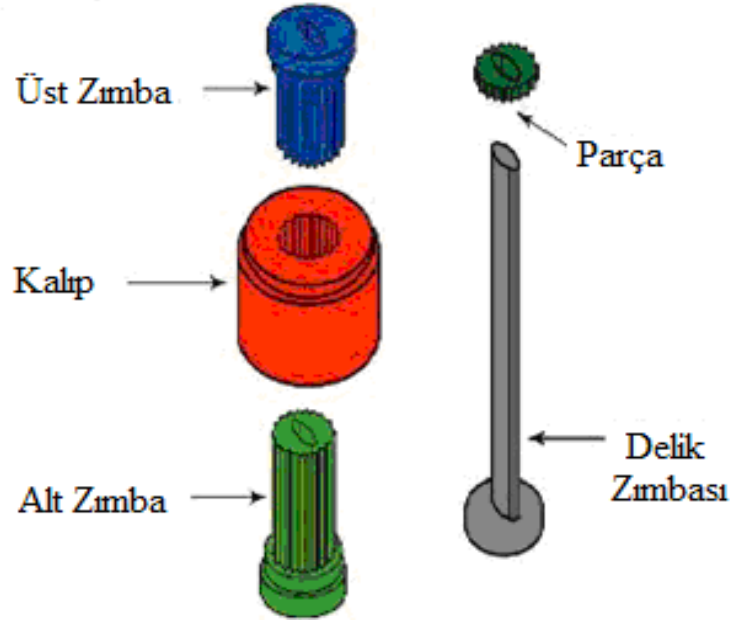
Malzeme ne kadar yumuşak ise preslenebilirliği okadar yüksektir. Preslenebilirlik toz tanelerinin presleme sırasında kendi aralarındaki ve tanelerle kalıp arasındaki sürtünmeye de bağlıdır [14]. Presleme işlemi üç basamakta gerçekleşmektedir. Öncelikle metal tozu ve kullanılan yağlayıcı karışım kalıba doldurulur. Daha sonra karışım belirli bir basınç altında preslenir. Son basamakta ise parça kalıptan sıyrıcı yardımıyla çıkartılır. Aşağıdaki Şekil 2.11 ve Şekil 2.12’ de presleme yönteminin işlem basamakları ve kalıp elemanları Tablo 2.2’ de ise bazı metallerin presleme basınçları verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi her malzemenin preslenme basıncı farklıdır. Maddeden maddeye değişim gösterebilir.

Tablo 2.2. Bazı farklı metallerin presleme basınçları [21].

Metaller	presleme basınçları (MPa)
Alüminyum	70-275
Pirinç	400-700
Bronz	200-275
Demir	350-800
Tantal	70-140
Tungsten	70-140
Titanyum	400-434



Şekil 2.11. Toz metalurjisi yönteminde presleme işleminin basamakları [6].

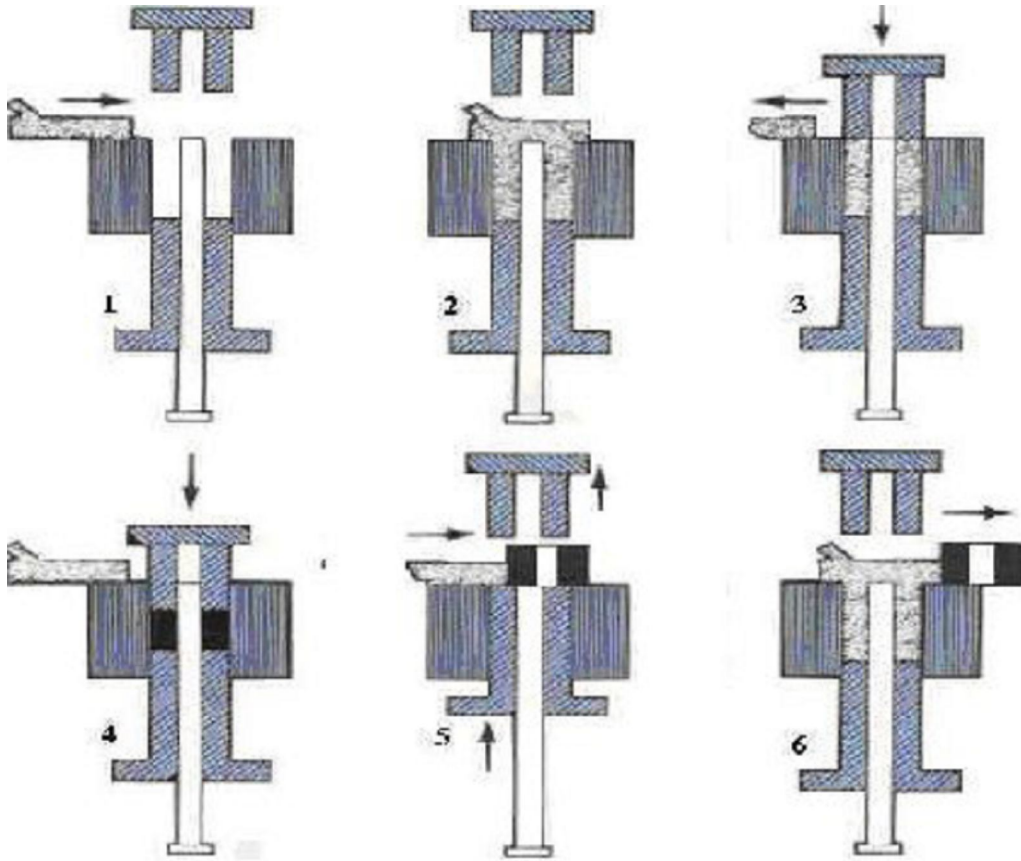


Şekil 2.12. Presleme işleminde kullanılan kalıp ve diğer elemanlar [6].

2.3.2.1. Tek Yönlü Presleme

Geleneksel toz sıkıştırma işlemleri tek yönlü olarak yapılmaktaydı. Bu yöntemde, toz karışım kalıba doldurulduktan sonra üst baskı plakası ile basma işlemi gerçekleştirilir. Alt pistonun görevi parçayı kalıptan sıyırmaktır. Parçanın kalıptan çıkarılmasını kolaylaştırmak ve sıkıştırılabilirliğini sağlamak amacıyla kalıp duvarları yağlanmaktadır. Tek yönlü presleme işleminde uygulanan basınç artırıldıkça sıkıştırılan malzemenin yoğunluğu artmaktadır. Bunun nedeni, tozlar arasında gözenek dediğimiz boşlukların

azalmasıyla birlikte kütlenin aynı kalması ve hacmin azalmasıdır. Bu yöntem kalıp tipinin basitliği nedeniyle, maliyet açısından uygun bir yöntem olmasına rağmen karmaşık şekilli parçalar ile boy/en ($L/D \geq 2.5$) oranı yüksek metalik parçalarda istenilen yoğunluğu sağlayamadığı için tercih edilmemektedir [27]. Bu yüzden bu tip parçaların preslenmesi soğuk izostatik presleme (CIP) ile gerçekleştirilir. Soğuk izostatik presleme uygulamasında, tozlar kauçuk bir kalıba doldurularak yağ ile dolu basma hücrene yerleştirilir. Basma pistonu ile basınç uygulandığında, yağ sayesinde kalıbın her yerine eşit baskı uygulanır ve numunenin her tarafı eşit yoğunluğa sahip olur. [28]. Aşağıdaki Şekil 2.13’de tek yönlü presleme basamakları verilmiştir.



Şekil 2.13. Tek yönlü presleme basamakları; 1- Besleme ayağının kalıba yaklaşması. 2- Besleme. 3- Presleme. 4- Karışımın sıkıştırılması. 5- Parçanın kalıptan çıkarılması. 6- Yeniden besleme [28].

2.3.2.2. Çift Yönlü Presleme

Çift yönlü preslemede metal tozu, hem alt hemde üst zımba tarafından sıkıştırılmaktadır. İki zımba da hareketlidir. Zımbalar farklı yada eşit miktarda hareket ve basınç uygulayabilirler.

2.3.2.3. İzostatik Presleme

İzostatik presleme metal tozlarının bir hidrolik (akışkan) basınç altında preslenmesidir. Presleme genellikle bir yağ veya su içinde ve oda sıcaklığında soğuk olarak yapılır. Bundan dolayı bu işleme soğuk izostatik presleme (CIP) adı verilir. Soğuk izostatik presleme uygulamasında, tozlar kauçuk bir kalıba doldurularak yağ ile sıvanmış basma hücrelerine konulur. Baskı pistonu ile basınç uygulandığı zaman, yağ sayesinde kalıbın her noktasına eşit basınç uygulanır ve numunenin her noktası eşit bir yoğunluğa sahip olur. Bu presleme işlemi için en iyi örnekler süper alaşım uçak türbinleri ve takım çeliği kütükleridir [28]. İstenene yakın bir boyut ve şekildeki parça üretimlerinde izostatik presleme uygulanmaktadır.

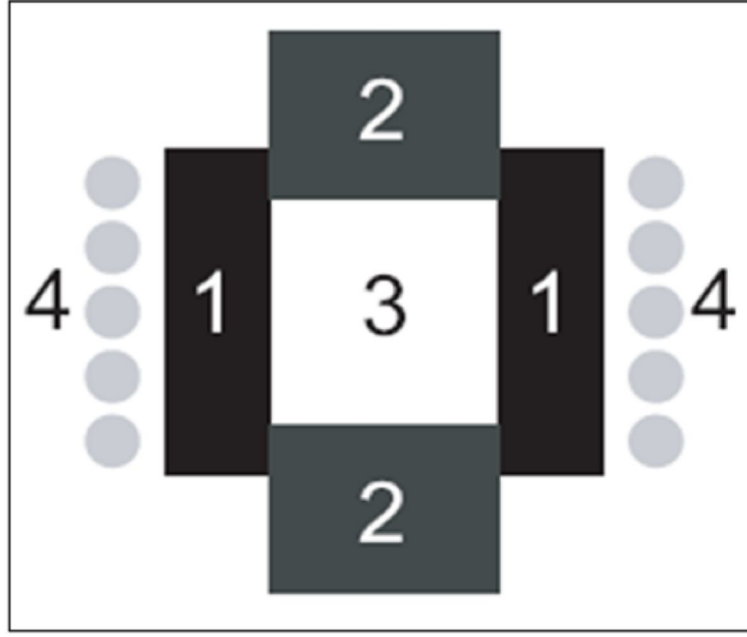
Sıcak izostatik presleme işlemi (HIP), ısı ve basıncın bir araya gelerek neredeyse tamamen iç gözeneklilikten arınmış bir ürün elde etme işlemidir. Presleme, tek hareketli zımba veya çift hareketli zımba ile yapılabilir. Tek yönlü sıkıştırma yoluyla tam yoğunluğa kavuşmak mümkün değildir. Çift yönlü sıkıştırmada toz alt ve üst zımba tarafından aynı anda sıkıştırılmaktadır. Bu yöntemde, kalıp duvarı ile toz partiküller arasındaki sürtünme kuvveti, kalıp tabanında bulunan yay gibi esnek elemanın yay kuvvetini yenip kalıbın aşağıya doğru hareket etmesini sağlayarak, tozun taban yüzeyine alt zımbanın, üst zımba ile eşit şiddetle basınç uygulamasını sağlar. Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra TM parçası alt zımbanın yukarı hareketi ile kalıptan çıkarılır. Yoğunluk dağılımı tek yönlü presleme ile elde edilen parçalara göre daha homojendir. En düşük yoğunluk sıkıştırılmış parçanın orta noktasında bulunur. Yoğunluk dağılımı orta noktadan geçen yatay ve dikey eksenlere göre simetriktir [12]. Basınç, statik veya dinamik olarak ısıtılmış toza bir veya iki yerden zıt yönlerde tek bir eksenden uygulanmaktadır. Sıkıştırılmış kutu içinde toz metalin sıcak preslenmesi toz metalin eski sıkıştırma uygulamalarındandır. Sıcak Presleme ile yüksek özellikte ürün elde edilmesine rağmen, kalıbın aşınması, zımba yüzeylerinden kalıp duvarlarına sıvı metalin kaynaması bundan dolayı da sıkıştırılmış yüzeylerin

bozulması, kutu duvarları ve hareketli burçlar arasındaki boşluk, numune kaybı, alet aşınması gibi dezavantajları vardır [19]. Geleneksel soğuk presleme-sinterleme işlemleriyle karşılaştırıldığında sıcak presleme tekniği daha az güç, daha kısa süre, (genellikle 10- 15 dakika) ve daha düşük sıcaklıklara ihtiyaç duyar. Ayrıca bu teknikte soğuk presleme-sinterleme işlemine göre, daha yüksek yoğunluklara ulaşılır [29].

Sıcak preslemede ergimiş metal sıkıştırılmaktadır. Sıcak Presleme için çeşitli teknikler ortaya konulmaktadır. Yöntemin seçilmesi metalin fiziksel özelliklerine bağlıdır. Bütün sıcak Presleme teknikleri çeşitli ortak özelliklere sahiptir. Aparatlar ve tozları sağlamlaştırma işlemleri ve artık ürünlerin uzaklaştırılması soğuk presleme ve sinterleme operasyonlarından çok farklı değildir [30].

Sıcak presleme işleminde 3 ayrı ısıtma tekniği kullanılmaktadır. Bunlar indüksiyon ile ısıtma, endirekt dirençli ısıtma ve direkt dirençli ısıtmadır. İndüksiyon ile ısıtma işleminde, yüksek frekanslı akım ile kalıp içerisindeki tozların ısıtılması esasına dayanır. Metal ya da grafitten yapılan kalıplara basınç uygulanarak tozların sıkışması sağlanır. Kalıp indüksiyon sargısı içerisine bırakılır. Sinterleme işlemi süresince yüksek frekans jeneratörü ve indüksiyon sargısı ile kalıbın ısıtılması sağlanır. Bu yöntemin avantajı basınç ve indükleme gücünün tamamen birbirinden bağımsız olmasıdır. Düşük basınçlarda sıvı faz sinterleme işlemini yapmak mümkündür.

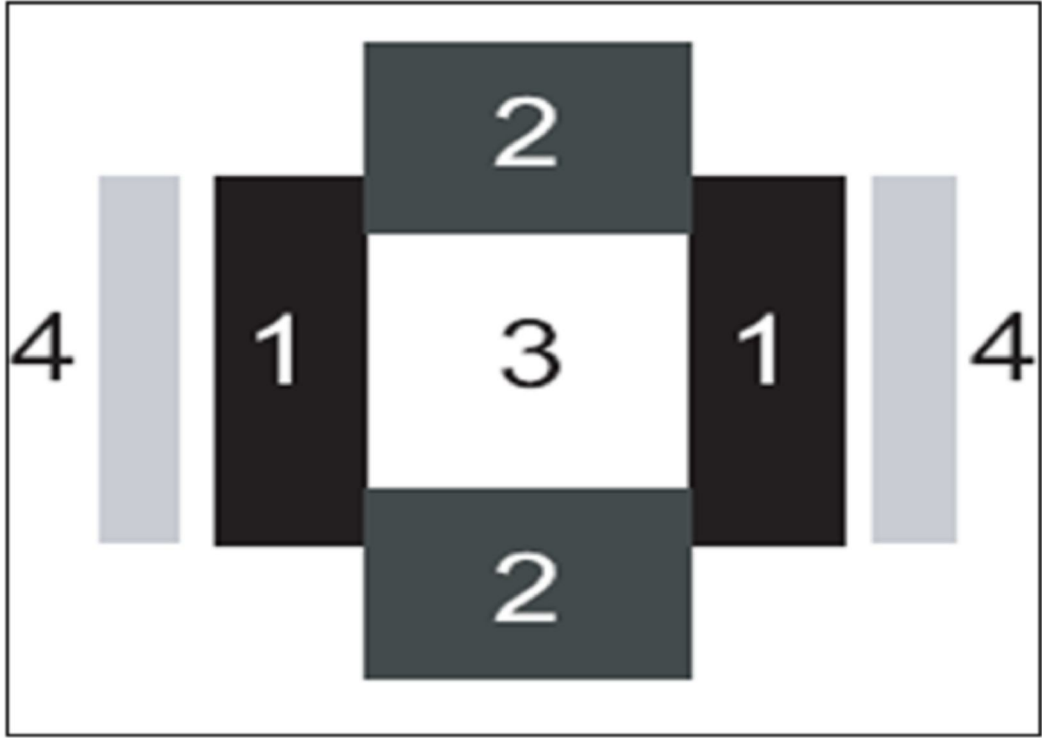
Yöntemin dezavantajları yüksek frekans jeneratörünün pahalı ve kalıbın yerleşiminin çok düzenli olması gerekmektedir. Kalıp düzenli olarak yerleştirilemez ise ısı yayılımı düzgün olmaz. Sistemin temel dezavantajı, sıcaklığın tam olarak dağılımını sağlayabilmenin zor olmasıdır. Manyetik alan kalıbın içerisine sadece 0.5 ila 3 mm nüfuz etmektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi sıcaklık kalıbın ısı iletkenliği ile yayılır. Kalıbın merkezinin ısıtılması çok zordur. Bu nedenden dolayı başka bir potansiyel sorun ise çok yüksek ısıtma oranlarında yüksek sıcaklık farkları kalıbı tahrip edebilmektedir. Aşağıdaki Şekil 2.14 de indüksiyonla ısıtma şematik olarak gösterilmiştir.



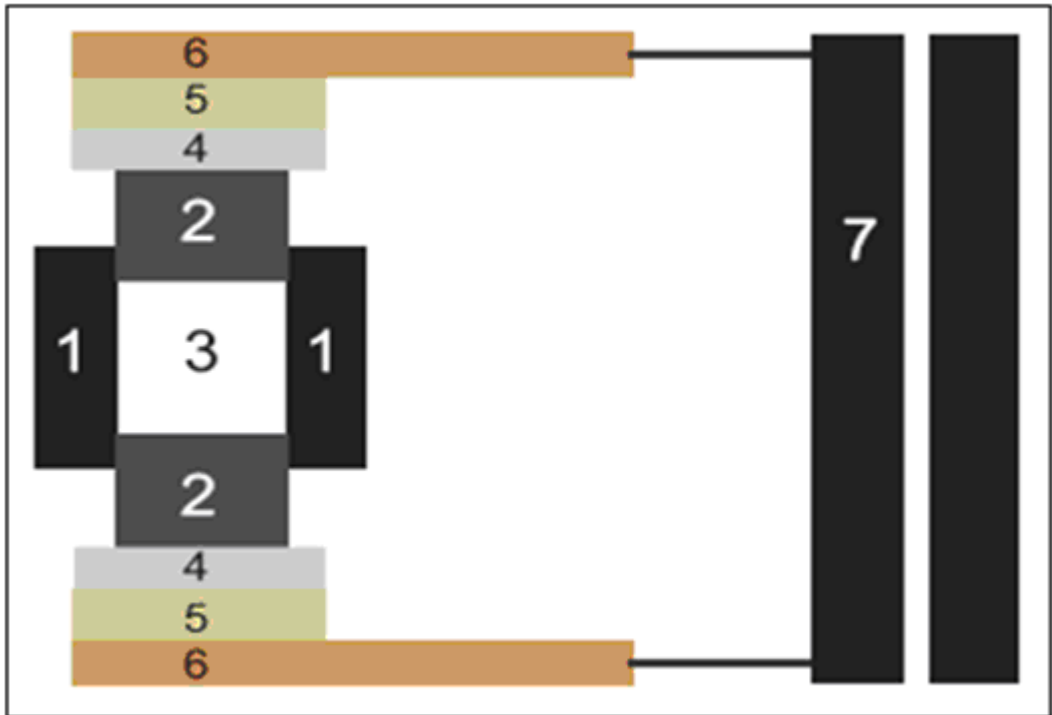
Şekil 2.14. İndüksiyon ile kalıbın ısıtılması; 1. Grafit yan tutucular 2. Baskı grafitleri. 3. Preslenecek malzeme 4. İndüksiyon sargısı [31].

Dolaylı dirençli ısıtma tekniğinde, kalıp ısı bölmesine konumlandırılır. Isı bölmesi elektrik akımı ile ısıtılan grafit ısıtma elemanlarıyla ısıtılır. Isınan grafit ısıtıcılar kalıp ile temas halinde olduğundan ikincil olarak kalıbı ısıtırlar bu nedenle işlem endirekt dirençle ısıtma olarak adlandırılır. Yöntemin avantajı yüksek sıcaklıklara çıkabilmesi, kalıp malzemesinin ısıl iletkenliğinden bağımsız olması sıcaklık ve basıncın birbirinden bağımsız olarak kullanılabilmesidir. Yöntemin temel dezavantajı ise kalıbın ısıtılmasının çok zaman alması ve kalıbın dıştan içe doğru ısınması ile ısının eşit olarak dağılmasının uzun süre almasıdır [31]. Şekil 2.15.'de şematik olarak endirekt ısıtma tekniği gösterilmiştir.

Direkt dirençli ısıtma tekniğinde, kalıp direkt olarak elektrik gücü ile ısıtılır. Kalıp ve toz parçanın direnci ile ısı tam olarak kalıpta oluşur. Sonuç olarak ısıtma hızı çok yüksektir [31,32]. Önceki iki teknik ısı iletimi ile ilişkili iken direkt dirençli ısıtma teknolojisinde ısı ihtiyaç duyulan yerde üretilmektedir. Şekil 2.16'da şematik olarak direkt ısıtma tekniği gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Dolaylı dirençli ısıtma tekniği. 1. Grafit yan tutucular 2. Baskı grafitleri. 3. Preslenecek malzeme 4. Grafit ısıtıcı [31].



Şekil 2.16. Direkt ısıtma tekniği. 1. Grafit yan tutucular, 2. Baskı grafitleri, 3. Preslenecek malzeme, 4. Grafit elektrot, 5. Bronz plaka, 6. Bakır elektrot, 7. Güç kaynağı [31].

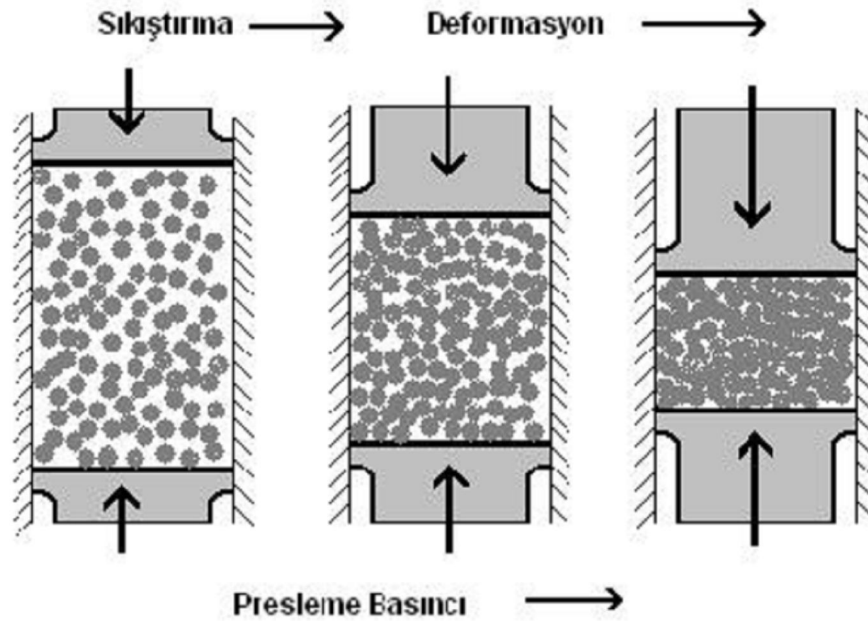
İzostatik preslemenin avantajları şunlardır;

- a – Malzeme kaybının az olması.
- b – Pahalı toz girişindeki maliyetin azalması.
- c – Parçayı son şekil ve yakın bir boyutta üretme.
- d – Presleme sırasında bağlayıcıya ihtiyaç olmaması.
- e – Karmaşık şekilli parçaların preslenme kabiliyeti.
- f – Preslenmesi imkansız veya zor olan parçaların üretimi.

Dezavantajları ise;

- a – Rijit metal kalıpla preslemeye göre daha düşük boyutsal kontrol elde edilir.
- b – İzostatik preslemede kullanılan esnek kalıplar, rijit çelik veya karbür kalıplara göre daha kısa bir ömre sahiptirler [14].
- c – İzostatik olarak preslenmiş kompakt parçaların sıkıştırılmış yüzeyleri daha az pürüzsüzdür.

Aşağıdaki Şekil 2.17’ de presleme basınçlarındaki artışlar sırasında kalıp içerisine yerleştirilen metal tozlarının durumu verilmiştir.



Şekil 2.17. Presleme basıncındaki artışlar sırasında kalıp içindeki taneciklerin durumu [33].

Toz metalurjisi ile parça üretim sürecinde en önemli olay sıkıştırılabilirliktir. Sıkıştırma işlemi üç basamaktan oluşur. İlk evrede taneciklerin boyut ve şekil gibi fiziksel özelliklerinin geniş ölçüde dağılımları tekrardan düzenlenir [33]. Sıkıştırma basıncının uygulandığı bu ilk anda plastik deformasyon söz konusu değildir. Bazı partiküllerde kırılmalar meydana gelebilir. Tanecikler arası boşluklar azalır ve bundan dolayı aralarında sürtünme başlar. İkinci evrede plastik ve elastik deformasyonlar görülmeye başlar. Tanecikler arasında bağlar oluşur. Üçüncü ve son evrede ise tanecikler kırılmaya başlar ve plastik deformasyonun oluşması nedeniyle tanecikler arası boşluklar tamamen yok olur.

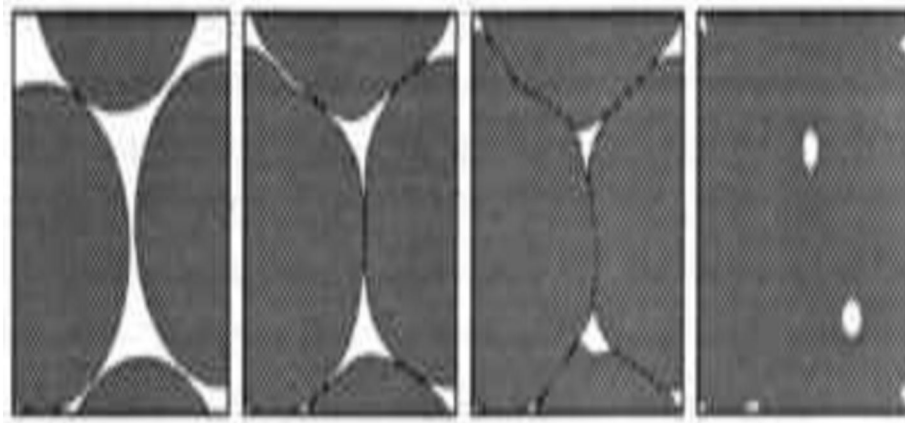
2.3.3. Sinterleme

Sinterleme sıkıştırılmış parçaların mukavemet kazandığı bir ısıtma işlemidir. Sinterleme sürecinde, toz parçacıkların yüksek yüzey enerjileri azalarak parçacıklarda tam ve mükemmel bir şekilde boylar oluşturulur. Bunun sayesinde iç yapıdaki gözeneklilik sıfıra düşer. Hacim başına düşen yüzey enerjisi toz parçacık çapının tersiyle doğru orantılı olduğundan, küçük toz parçacıkları daha kolay sinterlenmektedir [34]. Sinterleme ısıtma işlemi, istenilen yoğunluğun ve fiziksel dayanıklılığın elde edilmesi için önemli bir basamaktır. Çünkü toz metalurjisiyle elde edilen parçanın dayanıklılığı yoğunluğuyla doğrudan ilgilidir [35]. Aşağıdaki Şekil 2.18 ve Şekil 2.19'de toz taneciklerinin birleşimi sırasında çekilen SEM görüntüleri ve sinterleme ısıtma işlemi basamak süreçlerinin temsili resimleri gösterilmiştir.

Sinterleme ısıtma işlemi sırasında bir takım olaylarda meydana gelmektedir. Bunlar oksit indirgenmesi, bağlayıcıların kaldırılması ve bu sıradaki kimyasal reaksiyonlardır. Örnek olarak demirin sinterlenmesi aşamasında, oksit indirgenmesi, yağlayıcıların dağılımı, karbon kaybı olması sıcaklığa bağlı azot çözünürlüğü ile değişmektedir. Bununla birlikte boşluk morfolojisi de değişir [34]. Ayrıca malzemelerin yapılarında da değişimler gözlenir. Seramiklerde ısıtma iletkenlik, saydamlık, yoğunluk ve mukavemet artarken, polimerlerde yoğunluk ve mukavemet yükselir. Metallerde ise iletkenlik, süneklik ve mukavemet genelde artar [36].



Şekil 2.18. Toz taneciklerinin birleşmesini gösteren SEM görüntüsü [34].



Şekil 2.19. Sinterleme ısı işlem basamağının süreci [35].

Gözenekli bronzlar ve bunlara benzeyen alaşımlar 600°C ile 800°C arasında, demir grubu metal alaşımları 1000°C ile 1300°C arasında, sert alaşımlar ise 1400°C ile 1600°C arasında sinterlenir. Sinterleme sıcaklığı ve sinterleme süresi malzemedan malzemeye değişir. Elmas alaşımları için yarım saatten az bir zaman yeterli olurken sert alaşımlar için bir saatten fazla süren bir sinterleme uygulanır. Sinterleme sıcaklığı ve zamanı arasında ters bir oran vardır. Sinterleme sıcaklığı yüksekse zaman kısılır, sıcaklık azaldıkça ise uygulanan zamanda artış olur [10].

Presleme ve sinterleme işlemlerinin ayrı süreçler halinde olmasının yanı sıra artık bazı malzeme ve alaşımlar için presleme + sinterleme işlemleri aynı süreçte yapılmaktadır. Bu uygulamada tozlar belirli bir sıcaklık altında ilk olarak preslenir ve sonrada daha yüksek sıcaklıklarda sinterlenirler. Toz metalurjisi parçaları genellikle sinterleme ısı işleminden sonra kullanıma hazırdır. Fakat ekonomik bakımdan uygun görülmesi de bazı sinterleme sonrası işlemlere ihtiyaç duyulabilir.

2.3.4. İkincil İşlemler

Sinterleme ısıl işleminden sonra son ürün dediğimiz parçaya istekler doğrultusunda bir takım işlemlerde yapmamız mümkündür. Örneğin hazırlanan parçaya yoğunluk kazandırılmak istenirse tekrar presleme işlemi, yüzey parlatma, birleştirme, yüzey kaplama, yüzey sertleştirme, yeniden boyutlandırma ve yağ emdirme gibi işlemler yapılabilmektedir [6].

2.4. Toz Metalurjisi Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Toz metalurjisinin avantajları şunlardır;

- 1- Malzeme kaybı yoktur.
- 2- Ergime kayıpları yoktur.
- 3- Düşük maliyetlidir.
- 4- Seri üretime uygundur.
- 5- Metal olmayan malzemeler, metal asıllı ürünlerin içinde homojen bir şekilde dağılırlar [19].
- 6- Yüksek yoğunluğa sahip parçalar elde edilebilir.
- 7- Diğer üretim yöntemleriyle elde edilmesi imkansız ve zor olan gözenekli yapılar elde edilebilir [1].
- 8- Elde edilen parça düzgün yüzey kalitesine sahiptir.
- 9- Yoğunluk ve ergime noktalarındaki farklılıklarından dolayı başka yollarla üretimi mümkün olmayan alaşım ve karışımlar üretilebilir [34].
- 10- Toz metalurjisinde diğer yöntemlerle üretilen parçalara oranla bir ikincil işleme ihtiyacının gerekliliği nispeten daha azdır.

Dezavantajları ise;

- 1- Makine ve teçhizat bakımından ilk yatırım maliyeti yüksektir.
- 2- Metal tozlarının maliyeti yüksektir.
- 3- Elde edilecek malzemelerin boyutları sınırlıdır [37].
- 4- Güçlü bir presleme gereklidir [28].
- 5- Parça kesiti boyunca özellikler değişim gösterebilir.
- 6- Parçaları kalıptan çıkartmak zordur.

2.5. Toz Metalurjisinin Uygulama Alanları

Günümüz imalat sanayisinde toz metalurjisinin uygulama alanları oldukça geniş bir yer kaplamaktadır. Toz metalurjisi parçaları büyük ölçüde demir, çelik, bakır ve alaşımları (pirinç, tunç) alüminyum, nikel ve kalay esaslı tozlardan elde edilen alaşımlardır [38]. Bunlardan bazıları; tungsten lamba teli, kendinden yağlamalı yataklar, diş dolguları, otomotiv güç aktarma dişlileri, zırh delici mermiler, elektrik kontakları, mıknatıslar, nükleer güç yakıt elemanları, iş makinesi parçaları, yüksek sıcaklık filtreleri, boyalar, patlayıcılar, roket yakıt elemanları, sert lehim bileşikleri, katalizörler ve şarj edilebilir pillerdir.

2.5.1. Kendinden Yağlamalı Yatak Burçları

Demir, bakır, kalay, grafit ve yağlayıcı belirli oranlarda kalıba konulup karıştırılarak düşük bir basınç altında preslenme işlemine tabi tutulur. Düşük basınç altında preslenmesinin nedeni tozlar arasında gözenek kalmasının istenmesidir. Presleme işleminden sonra sinterleme ısıl işlemi yapılır, bu sırada yağlayıcı erir ve yanarak karışımdan ayrılır. Eriyen kalay ise bakır ile kuvvetli bir bağ meydana getirir. Bakırla birleşen kalayların yerinde boşluklar oluşur ve bu boşluklara yağ emdirilir. Mil ve burç arasında oluşan sürtünme sebebiyle yağ sürtünen yüzeylere akar ve yağlama işlemi gerçekleşmiş olur. Aşağıdaki Şekil 3.1’de kendinden yağlamalı tam ve kısmi kesitli yatak burçları verilmiştir.



Şekil 2.20. Kendinden yağlamalı yatak burçlarının gösterimi

2.5.2. Sürtünme Plakaları

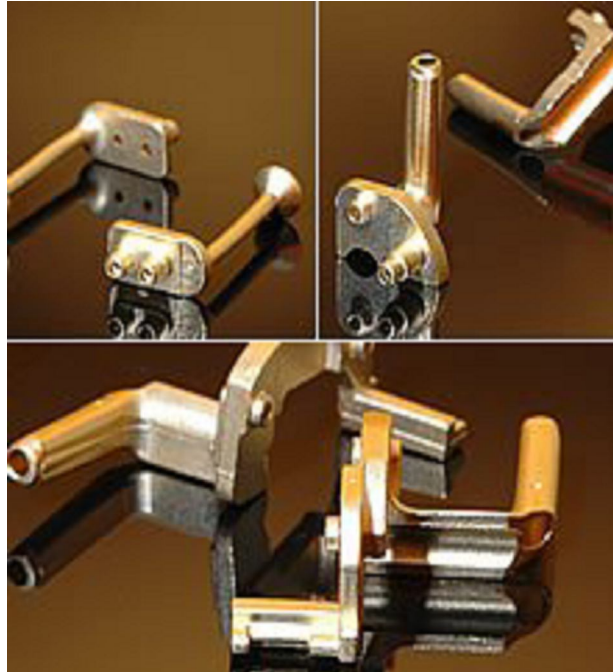
İnce bakır plakalar üzerine kalay, silisyum, grafit, kurşun ve bakır tozlarının preslenmesi ile imal edilir. Bu plakalar belirli bir sıcaklıkta sinterlenerek 0.3 mm kalınlığında sürtünme plakaları elde edilir. Bu plakalar otomobillerde fren ve kavramada, havacılıkta ise uçak iniş takımlarında kullanılmaktadır.

2.5.3. Gümüş Alaşımli Dolgular

Gümüş esaslı metal tozları diş amalgamları üretiminde kullanılan en önemli bileşiklerden biridir. Gümüş miktarı % 65'den fazla olup % 30'a yakın bir oranda da bakır veya kalay kullanılır.

2.5.4. Elektrik Kontakları

Elektrik iletkenliği çok yüksek olan bakır, gümüş ve nikel, karbür kalıpta karıştırıldıktan sonra preslenir ve sinterlenir. Elde edilen malzemeler elektrik kontaklarında kullanılırlar. Şekil 3.2'de elektrik kontakları gösterilmiştir.



Şekil 2.21. Toz metalurjisiyle üretilmiş elektrik kontaklarının çeşitleri

2.5.5. Savunma Sanayi

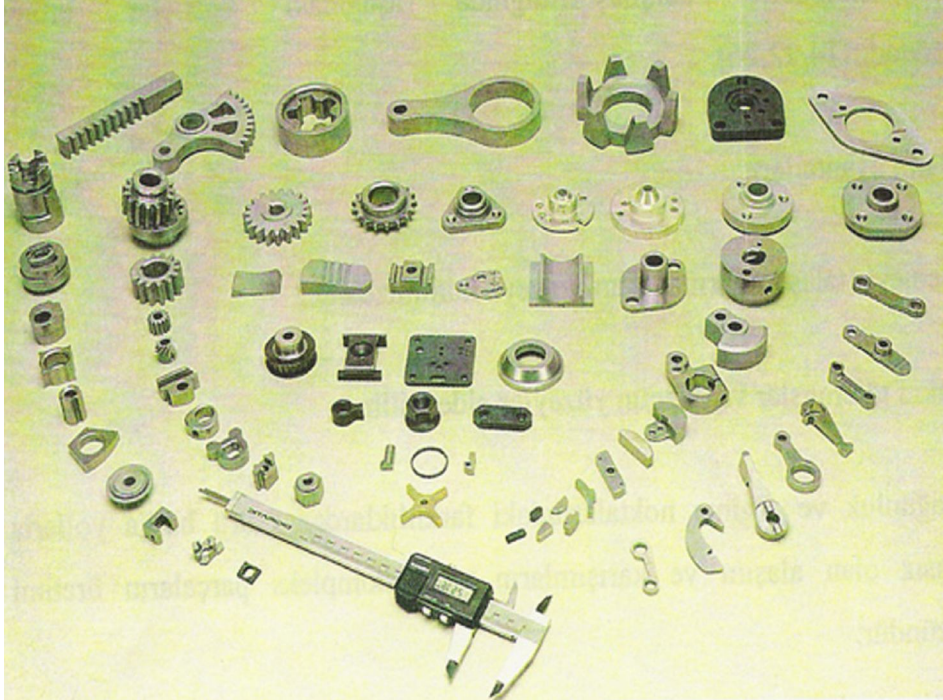
Toz metalurjisi savunma sanayisinde kibrit bileşenleri, ateşleyici, tutuşturucu karışımlar, ısı oluşturucular olarak bilinen parça ve malzemelerin üretiminde kullanılan yöntemlerden biridir. Dünya genelinde ülkelerin çoğu askeri hareket güçlerini artırmak, dayanıklı ve kullanışlı askeri teçhizat üretebilmek için toz metalurjisi ile ilgili bir çok çalışma yapmaktadırlar [39].

2.5.6. Süreli Mıknatıslar

Alüminyum, nikel ve kobaltı tozlarının %97 yoğunlukta karıştırıldıktan sonra preslenmesi sonucu çok ince yapılı ucuz mıknatıslar elde edilmektedir.

2.5.7. Dişliler

İstenilen boyutta ve mukavemette belirli bir basınç uygulanarak makineler için parça dişlileri üretilir. Dişlilerin üretimleri için karmaşık şekillerinden dolayı farklı türlerde kalıplar kullanılır. Şekil 3.3’de dişli parçaları gösterilmiştir.



Şekil 2.22. Farklı boyutlarda hazırlanan toz metalurjisi alet parçaları

2.5.8. Akıllı Metaller

Toz metalurjisiyle tanecik boyutunun ve bileşim kontrolünün çok iyi olması nedeniyle, akıllı metallerin üretiminde oldukça yaygındır [40].

2.5.9. Sert Elmas Kesici Uçlar

Çok yüksek kesme hızına sahip elmas kesiciler, freze çakıları, kaya delme ve petrol kuyusu delme matkaplarının yapımında da toz metalurjisinden önemli derecede faydalanılmaktadır. Sert maden uçlarının maliyetleri çok yüksektir. Bunun içinde uçlar küçük boyutlarda üretilir ve kullanılacakları takımlara göre malzemeler üzerine sert lehimle lehimlenirler. Şekil 3.4'de üretilen elmas uçlar gösterilmiştir.



Şekil 2.23. Farklı boyut ve şekillerde üretilmiş elmas uçlar

2.5.10. NiTiCu Alaşımaları

Üçlü alaşım sınıfı içerisinde yer alan NiTiCu alaşımı ikili NiTi alaşımında bir miktar nikelin periyodik tablodaki komşusu olan bakır ile yer değiştirmesi ile oluşturulmuştur [8].

Bu yeni alaşımın bakır ilavesi ile birlikte karakteristik sıcaklığın tutarlı olması sağlanmış ve iyi bir korozyon direnci elde edilmiş ve NiTi alaşımında görülen Ti_3Ni_4 çökelmesini önlemiştir [10,41,42]. Ayrıca faz dönüşüm histerezisinde düşüş, kimyasal bileşimin dönüşüm sıcaklığında azalma ve yorulma direncinde bir artış kaydedilmiştir [43-47]. NiTiCu yaklaşık olarak oda sıcaklığında yani düşük sıcaklıklarda martensit durumdadır [48,49].

NiTiCu alaşımının toz metalurjisiyle üretimi düşük maliyeti, malzeme kayıplarının az olması ve ikincil işlemlere ihtiyacı ortadan kaldırdığından dolayı tercih edilen bir yöntemdir [10,50].

NiTiCu özel mekaniksel özellikler, süper elastiklik ve şekil hafıza olayı gösterir [51]. Üstün özelliklerinden dolayı son yıllarda araştırmacılar tarafından yoğun olarak çalışılmaktadır [9]. Mekanik ve biyomedikal alanlarda geniş bir uygulama alanı oluşturur. Bu uygulamalardan en iyi bilinenleri diş için kavisli teller, stentler ve mikro çalıştırıcılardır [52].

Şuan üretilen NiTiCu alaşımından biri kendini temizleyen fırınlarda kapının açılmasını kontrol eden yaylardır. Ayrıca çalıştırıcılarda kullanılan küçük vanalar yapılmaktadır. Bu vanaların çalışma şekli sistem çevresinde dolanan suyun sıcaklığının 48 °C'yi geçtiği zaman vana kendiliğinden kapanır. Suyun sıcaklığı tekrar güvenli sıcaklığa indiğinde vana açılır ve sistem otomatik olarak çalışmaya başlar. Bu uygulama genellikle petrol ve petrokimyasal fabrikalarda yangın tehlikesine karşı kullanılmaktadır [53,54]. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da NiTiCu destek çalıştırıcıları ve vanalar gösterilmiştir.

Gelişmiş yarı iletken teknolojisinde üretilecek malzemede kullanılan gazların akışını kontrol eden hava vanaları vardır. Vana belirli bir sıcaklığa ısıtıldığı zaman sistem içerisinde bulunan yüksek yanıcılıktaki ve zehirli gazların akışı kapatılır. Gaz akını kontrol eden hava vanaları yardımı ile havalandırılır [53].



Şekil 2.24. Emniyet vanası olarak kullanılan NiTiCu çalıştırıcılar [53].



Şekil 2.25. Yangınlara karşı NiTiCu alaşımı ile yapılmış duş vanaları [53].

2.5.11. Toz Metalurjisinin Durumu

Toz metalurjisinin ileriki yıllarda daha da artan oranda kullanımının artacağı kuşkusuzdur. Çünkü toz metal dövme, sıcak izostatik presleme, yüksek sıcaklıkta sinterleme gibi T/M yöntemleri uygulama sahalarının giderek artmasını sağlamaktadır. Bu

da giderek yeni T/M ile üretilmiş parçaların artması ve yeni pazarlar meydana gelmesi demektir.

ABD' deki verilere göre 1997 yılında T/M ile üretilmiş parçaların değeri 1.7 milyar dolar mertebesinde idi. Yapılan tahminlere göre bu rakamın daha da artacağı ve T/M ile üretilmiş parçaların ağırlığının 500,000 tonu aşacağı öngörülmektedir. Bu nedenle üreticiler yeni üretim tesisleri yatırımına ağırlık vermektedirler. Yabancı ülkelerde bu konudaki yatırımlar bu kadar büyük boyutlarda olmasına rağmen ülkemizde halen endüstriyel olarak toz metal üretimi ciddi olarak ele alınmamıştır. Gerek üniversitemizde gerekse sanayide kullanılan tozlar halen yurtdışından getirilmekte ve memleketimizde işlenerek nihai ürün haline getirilmektedir. Savunma sanayi sektöründe, örneğin jet uçak motorları tamirinde hiç de azımsanmayacak miktarda toz metal termal sprey tekniği ile kullanılmaktadır.

Bakır ve bakır esaslı alaşım tozları, alüminyum ve paslanmaz çelik pazarları 2000 yılından itibaren giderek genişlemektedir. Alüminyum tozlarından, boyalar, kaplamalar, alaşım elementi olarak kimyasallar, katı füze ve roket yakıtları, patlayıcılar ve piroteknik uygulamalarda, T/M parçalar ve kompozit malzeme üretiminde giderek artan oranda faydalanılmaktadır. T/M den yapılmış alüminyum parçalar otomobil üreticilerinin ilgisini giderek artan oranda çekmektedir. Uygulama olarak kam mili yatakları, ayna parçaları, amortisör parçaları, pompalar ve bağlantı kolları sayılabilir. Paslanmaz çeliklerde ise daha çok 400 serisi ekzost flanşlarında, ABS sistemlerinin sensör parçalarında giderek kullanımı artmaktadır. Paslanmaz çelikler ayrıca kilitlerde ve bazı parçalarda kullanılabilir [18].

Avrupa'da da T/M parça üretimi giderek artmaktadır. Sonuçta küresel olarak bu sektörde genişleme görülmektedir. Bu konuda özellikle GM, Ford, Daimler-Chrysler, Toyota, Honda, BMW ve Volkswagen gibi otomotiv firmaları önemli adımlar atmaktadırlar.

T/M aynı zamanda stratejik bir yöntemdir, çünkü bu üretim tekniği daha önce bahsettiğimiz gibi birçok üretim tekniğinden avantajlı olabilecek yönlerinin yanı sıra üretimi zor olan parçaların üretiminde adeta tek üretim tekniği olarak görülmektedir. Bu üretim tekniği ile beraber kullanılan yöntemleri de bu konuda sürüklemekte ve onları da önemli uygulamalar olarak karşımıza çıkarmaktadır, örneğin sıcak izostatik presleme, püskürtme ile şekillendirme, termal sprey, soğuk şekillendirme ve mikron altı boyutta parçaların işlenmesi. Sıcak izostatik presleme ile üretilen süper alaşım T/M parçalar

uçakların motor parçaları, motor parçalarının tamiri, petrokimya endüstrisi sayılabilir. Roket ve füzelerde alüminyum ve magnezyum metal tozlarının katı yakıt olarak kullanımı ise son yıllarda giderek artmaktadır. Çünkü yakıt malzemesi dışında diğeri patlayıcı ve piroteknik uygulamalar toz metal uygulamalarının önemini artırmaktadır [6,18].

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Deney Numunelerinin Üretimi ve Kullanılan Tozların Özellikleri

NiTiCu alaşımı ikili NiTi alaşımında bir miktar nikel ile bakırın yer değiştirmesi sonucunda oluşan üçlü bir alaşımdır [55]. Akıllı malzemeler sınıfı içerisinde üstün özelliklerinden dolayı son yıllarda oldukça çok çalışılmaktadır. Uzay araştırmalarında ve uçak sanayisinde kullanılan NiTiCu alaşımları, elektriksel dirençlerinden dolayı ince film olarak da üretilmektedir [56,57]. Bu çalışmada Toz Metalurjisi yöntemiyle 3 farklı kompozisyonda NiTiCu alaşımları üretilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda mikroyapıdaki değişimler araştırılmıştır. Numuneler belli bir süre boyunca arttırılan sinterleme sıcaklıkları ve basınç altında üretilmiştir. Bu işlemler için argon gazı atmosferinde sıcak izostatik presleme (HIP) tekniği kullanılmıştır. Kullanılan metal tozları Alfa Aesar firmasından temin edilmiştir. İmalatta kullanılan metal tozlarının teknik detayları şöyledir;

- Nikel tozları (Ni) % 99,8 saflıkta, küresel ve taneler -100+325 mesh (40 µm) büyüklüğündedir.
- Bakır tozları (Cu) % 99,9 saflıkta, küresel ve taneler -100+325 mesh (40 µm) büyüklüğündedir.
- Titanyum tozları (Ti) % 99,9 saflıkta, küresel ve taneler -100+325 mesh (40 µm) büyüklüğündedir.

3.2. Toz Karışımının Hazırlanması

Tozlar 0,0001 hassasiyetindeki Scaltec marka hassas terazi ile tartılarak tablo3.1' de verilen oranlarda hazırlandı. Daha sonra tartılan tozlar Şekil 3.1' de görülen 88-tipi, kapalı toz hazneli, iki kg toz kapasiteli, üç boyutlu dönebilen bir mikserle konuldu.

Tablo 3.1. Alaşımda kullanılan toz karışım oranları

Numune	Ti (%)	Ni (%)	Cu (%)
N1	50	40	10
N2	50	30	20
N3	50	25	25



Şekil 3.1. Numunelerin üretiminde kullanılan 88-tipi mikserin yan, üst ve ön görünüşü

Numunelerin üretiminde kullanılan 88-tipi mikserin toz haznesi kapalı tipte olup toz içine konulduktan sonra dış ortam ile tozların ilişkisini kesmek amacıyla kapağı sıkıca kapatılmaktadır. Mikser çalıştırıldıktan sonra tozun iyice karışabilmesi için toz haznesi 360 derecelik turlarla her yöne dönebilmekte ve böylece tozların birbirleriyle iyi bir şekilde karışması sağlanmaktadır. Üç farklı kompozisyonda hazırlanan toz karışımları üç farklı kaba konularak 88-tipi mikserin haznelerine yerleştirildi. Toz karışımlarının içerisine granülizasyonu sağlamak ve daha homojen bir karışım elde etmek için ağırlıkça % 1 oranında Polietilen Glikol (PEG) yağlayıcı eklendi. PEG eklendikten sonra toz karışımları 33 dev/dak hızla 140 dakika süre karıştırıldı. Karıştırma işlemi bittikten sonra hazırlanan toz karışımları kap hacimleri hesaplanarak her kaba 22.40 gr konacak şekilde tartılarak hazırlandı.

3.3. Presleme İşlemi

Çalışmamızda sıcak izostatik presleme işlemi uygulanmıştır. Sıcak presleme işlemi, ısı ve basıncın bir araya gelerek tamamen iç gözeneklilikten arınmış bir ürün elde etme işlemidir. Geleneksel soğuk presleme işlemleriyle karşılaştırıldığında sıcak presleme tekniği daha az güç, daha kısa süre ve daha düşük sıcaklıklara ihtiyaç duyar. Ayrıca bu teknikte soğuk presleme işlemine göre, daha yüksek yoğunluklara ulaşılır. Şekil 3.2’ de sıcak presleme sisteminin bütün üniteleri görünmektedir.



Şekil 3.2. Sıcak presleme makinesi üniteleri: a) Argon gazı atmosferindeki presleme kabini, b) Otomasyon Panosu, c) Argon gazı tüpü, d) Hidrolik basınç üreten asenkron elektrik motoru

Presleme işlemine geçiş için grafit kalıplara tozlar yerleştirilmiştir. Hazırlanan kalıplar sıcak pres kabineye yerleştirildikten sonra kabin kapağı kapatıldı. Sıcaklık kontrolünün otomasyon programı tarafından kumanda edilmesi için kabin kapağına kalıbın ortasına denk gelecek şekilde açılmış olan delikten termoçift yerleştirildi. Oksitlenmeyi önlemek amacıyla kullanılan argon tüpünün vanası açıldıktan sonra Tablo 3.2’ deki değerler presleme makinesinin bilgisayarından program yazılımına (reçeteye) kaydedilmiştir. Presleme ve sinterleme işlemleri sonunda Şekil 3.3.’ de görülen numuneler elde edilmiştir.

Tablo 3.2. Otomasyon sistem reçetesi

Değişkenler	Süre (s)	Basınç (MPa)	Sıcaklık (°C)	Hedeflenen
İşlem basamakları				
1. Adım	30	27	460	Boşlukların dolması
2. Adım	30	60	550	
3. Adım	30	120	620	PEG’in yakılması
4. Adım	30	154	680	
5. Adım	180	154	685	Sinterleme işlemi
6. Adım	30	150	550	
7. Adım	30	100	400	Soğuma



Şekil 3.3. Sıcak presleme işlemi sonunda elde edilen numuneler

3.4. Yoğunluk Ölçümü ve Gözeneklilik Hesabı

Numunelerin yoğunluk değişimlerini Scaltec marka hassas terazi ve metal bir sepet yardımı ile Arşimet prensibine göre ölçülmüştür. Suyun sıcaklığı termometre ile 20°C ve yoğunluğu da 0,9982 gr/cm³ olarak ölçülmüştür. Bu yönteme göre öncelikle numunelerin havada kuru ağırlıkları ölçülmüş daha sonra numuneler darası alınan sıcaklığı termometre ile ölçülen saf su dolu ölçüm kabına batırılmıştır. Arşimet prensibi ile aşağıdaki aşamalar takip edilerek eşitlik 4.1'e göre hesaplanmıştır.

$$\rho = \frac{W_a \times \rho_s}{W_a - W_b} \quad (4.1)$$

ρ : Numunenin deneysel yoğunluğu

W_a : Numunenin havadaki ağırlığı

W_b : Numunenin sudaki ağırlığı

ρ_s : 20 °C'deki su yoğunluğu

Numunelerdeki gözeneklilik miktarı aşağıdaki eşitlik 4.2 ile hesaplanmıştır [10].

$$P_T(\%) = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_T}\right) \times 100 \quad (4.2)$$

P_T : Numunenin yüzde cinsinden toplam gözenekliliği

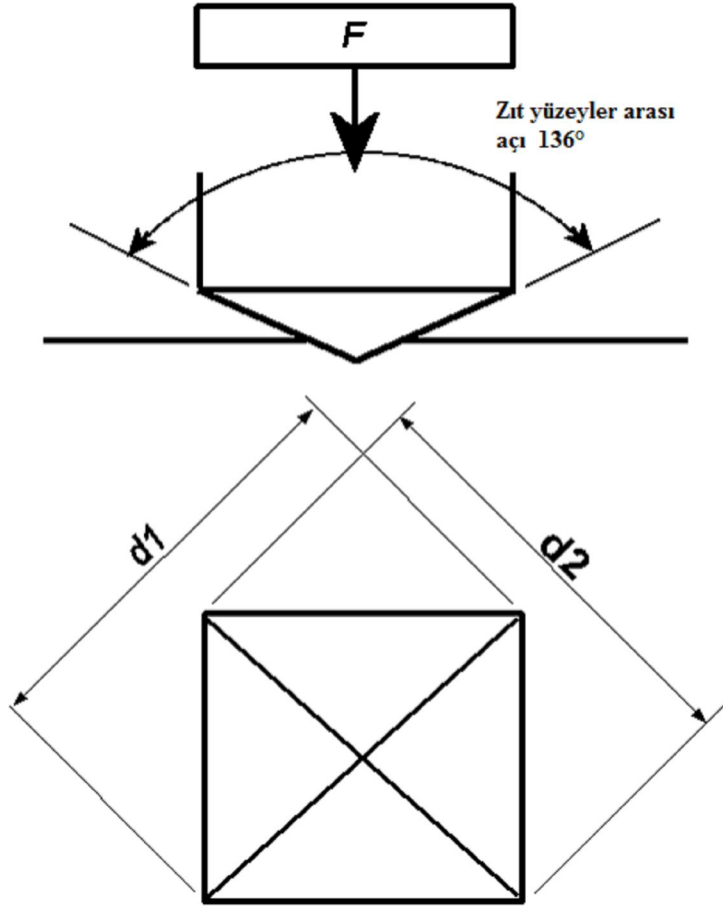
ρ_T : Numunenin teorik yoğunluğu

3.5. Mikrosertlik Ölçümleri

Deney numunelerinin mikrosertlik ölçümleri Şekil 3.4' de görülen cihazla alındı. Bu işlemde Vickers sertlik ölçüm ucu kullanılarak 100 g baskı kuvveti 10 s süre boyunca uygulanarak sertlik değerleri elde edilmiştir. Vickers sertlik ucu 136° lik elmas piramit uçtan oluşmaktadır. Homojen bir sertlik değerinin elde edilebilmesi için presleme yüzeyine dik gelecek şekilde, aynı doğrultuda 400 µm mesafeli 3 adet sertlik değerleri alınmış ve elde edilen bu değerlerin her bir numunenin ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 3.4. Mikrosertlik ölçüm cihazı



Şekil 3.5. Vickers sertlik ucu şematik gösterimi [29].

3.6. Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC)

Austenite-martensite faz dönüşümünü meydana getiren fiziksel etkenler alaşımın kinetik parametreleri üzerinde önemli bir değişime yol açar. Martensitik dönüşüm için tanımlanan faz geçiş sıcaklıkları deneysel termodinamik metodlar ile bulunabilmektedir. Faz geçiş sıcaklıklarından faydalanarak maddenin fiziksel özelliklerine ait bazı kinetik parametreleri de (entalpi, entropi, aktivasyon enerjisi gibi) teorik olarak hesaplanabilir.

DSC ölçümlerinden maddenin sıcaklık değişimine bağlı olarak ısı değişimi hesaplanır. Diferansiyel tarama kalorimetresinin çalışma prensibi, verilen sıcaklık aralıklarında örnek içinde oluşan enerji değişimini referans numunenin enerji değişimi ile karşılaştırıp, enerji farkının dış devrede pikler şeklinde gözlenmesidir. DSC yönteminde numune ve referans maddeye aynı sıcaklık uygulanırken, numunede değişiklik olması halinde, numune veya referansa bir elektriksel devre yardımıyla ısı eklenerek her ikisinin de aynı sıcaklıkta kalması sağlanır. Verilen ısının numune üzerinden akışı numunenin özgül ısı (C_p) ile doğrudan ilişkilidir. DSC eğrileri, eklenen ısının sıcaklığa karşı çizilen grafikleridir. Numunedeki enerji değişimi endotermik veya ekzotermik reaksiyon şeklinde olup, bu durum dış devrede pikler şeklinde görülür. Bu ölçümler, izotermal dönüşümler için çok düşük sıcaklık aralıklarında hassas sonuçlar verir. DSC ölçümlerinde ortaya çıkan ilk endotermik pik A_s ; austenite fazın başlangıç, A_f ; austenite fazın bitiş sıcaklığı, A_{maks} ise pik noktasıdır.

3.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Metal malzemelerin mikro yapısını incelemek için kullanılan en önemli cihazlardan biriside SEM'dir. SEM, mikroskobun elektron tabancasından çıkan elektron demetini hedefteki numunenin yüzeyinde küçük bir noktaya çarptırarak, numuneden çıkan elektronik sinyalleri toplayan ve çözümleyen bir alettir. Esas olarak, havası boşaltılmış bir kolon içindeki elektron tabancasının meydana getirdiği elektronlar yönlendirilerek kolonun alt kısmına yerleştirilmiş numunenin yüzeyinde küçük bir noktaya çarptırılır. Geri saçılan küçük açılı elektronlar yüzeydeki girinti ve çıkıntılarla girişime uğrayarak, elektron sinyallerini oluşturan ikincil geri saçılma elektronlarını meydana getirirler. SEM

yönteminde numunenin yüzey görüntüsü düşük enerjilere sahip ikincil elektronlarla elde edilir. Numuneden gelen elektron sayısı ne kadar fazla ise görüntü o kadar parlak olur.

Sıcak presleme işlemi sonucunda 22×20×10 mm boyutlarında elde edilen numuneler 5×5×4 mm ölçülerinde kesildi. Kesilen numuneler 200, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 ' lük zımparalarla sırasıyla zımparalandı. En son parlatma işlemi için çuha kullanıldı. Parlatılan numuneler kesim esnasında oluşan zor-zorlanma etkisinin kaldırılması ve martensit plakaların oluşumu için yüksek sıcaklığa dayanıklı seramik kaplar içerisine koyularak Nüve MF 120 marka sinterleme fırınında 850 °C ' de 1 saat süreyle ısıl işleme tabi tutularak tavlandı. Daha sonra numunelere tuzlu-buzlu suda ani soğutma işlemi uygulandı. Tavlanan numuneler tekrardan 1200 'lük zımpara ile temizlendi. Çalışmamızda kullandığımız numuneler parlatma işlemi sonrası yüzey temizliği için % 6 HF, % 9 NHO₃ ve % 85 H₂O çözeltisiyle yaklaşık 10 s süresince dağlanmıştır.

Görüntüler Harran Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan ZEISS EVO 50 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile alınmıştır.



Şekil 3.6. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDS analiz cihazı

4. ÖLÇÜM SONUÇLARI

4.1. Yoğunluk ve Gözeneklilik Ölçümü

N1, N2, N3 numuneleri için Arşimet prensibi kullanılarak yapılan ölçümler neticesinde hesaplanan yoğunluk değerleri Tablo 5.1'deki gibidir. Tablodaki verilerden de açık bir şekilde görüldüğü gibi, numunelerin yoğunluklarında yakın değişimler meydana gelmiştir.

Tablo 4.1. Yoğunluk ve gözeneklilik verileri

Numune	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Deneysel Yoğunluk (g/cm ³)	Gözeneklilik Oranı (%)
N1	6,7122	5,3702	19,993
N2	6,7174	5,4326	19,126
N3	6,7195	5,5635	17,203

4.2. Mikrosertlik Ölçümü

N1, N2, N3 numuneleri için Vickers sertlik ölçüm (HV) yöntemi kullanılarak bulunan sertlik değerleri Tablo 5.2'de verilmiştir. Tablodaki verilerden de anlaşılacağı gibi sertlik değerlerinde farklılıklar vardır.

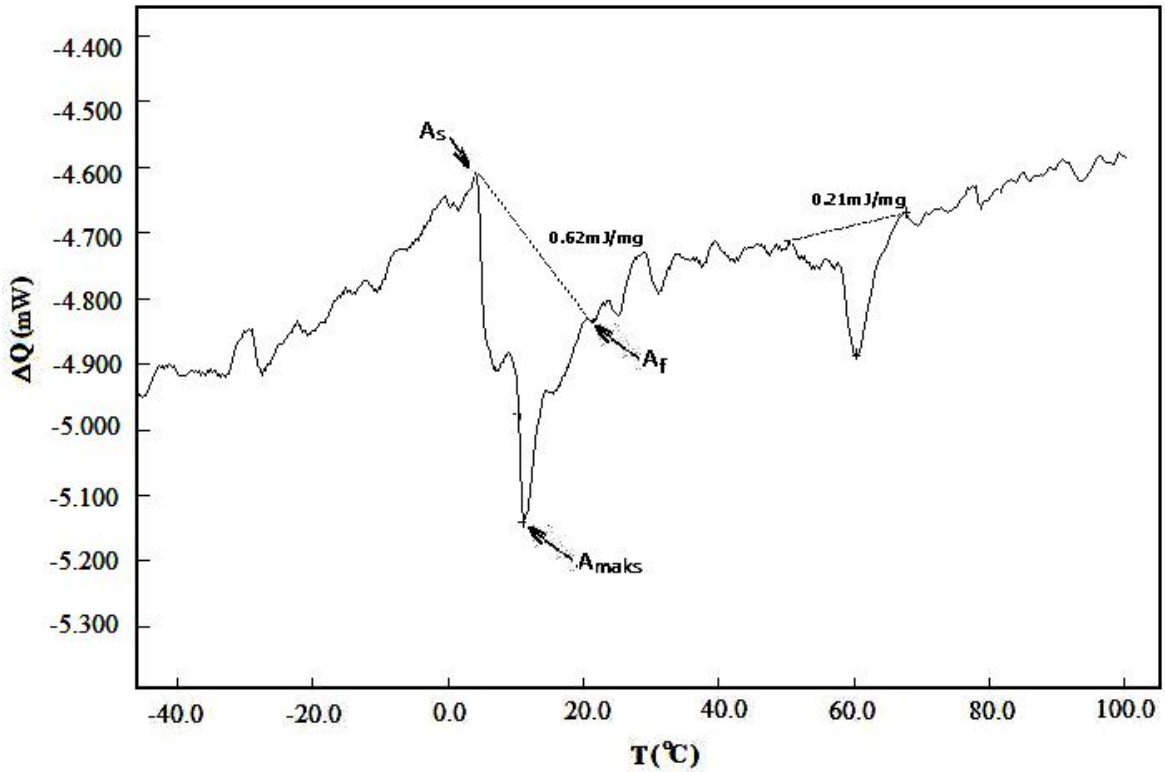
Tablo 4.2. Mikrosertlik değerleri

Numune	Sertlik Değerleri (HV)
N1	288,12
N2	273,24
N3	269,20

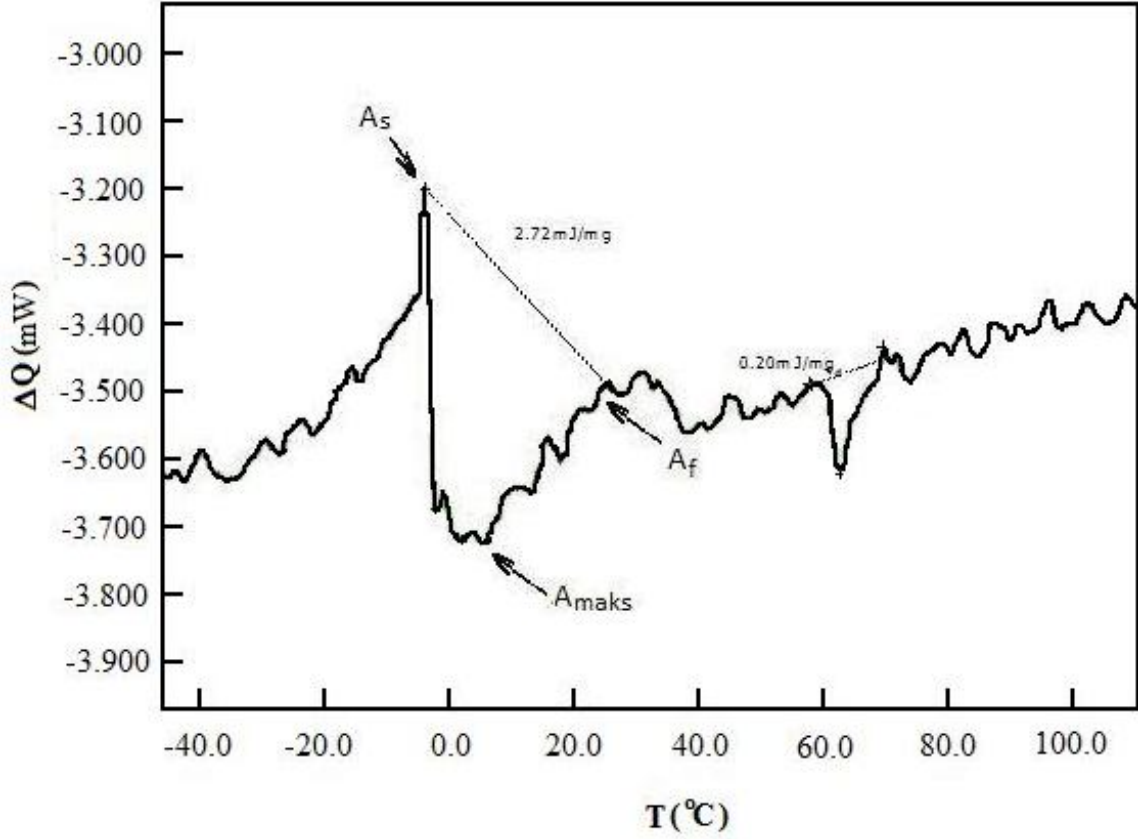
4.3. Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) Ölçümleri

İncelediğimiz numunelerin ters ve ileri dönüşüm sıcaklıklarının tayin edilmesi için bilgisayar kontrollü Perkin Emler Sapphire DSC analiz cihazı kullanılmıştır. 850 °C’de 60 dakika süreyle homojenleştirilip, tuzlu buzlu su içerisinde aniden soğutma işlemine tabi tutulan numunelerin dakikada 5 °C ısıtma hızı ile DSC ölçümleri alındı. Alınan DSC ölçümlerinde Austenite faz (A_s) başlama, Austenite faz (A_f) bitiş ve pik (A_{maks}) sıcaklıkları tayin edildi. DSC eğrileri üzerinde A_s , A_f ve A_{maks} sıcaklıkları belirtildi.

N1 numunesi ait 5 °C ısıtma hızı ile alınan DSC ölçüm eğrilerinden görüldüğü üzere numune 2 noktada faz dönüşümü gerçekleştirmiştir. 1. pik için faz dönüşüm sıcaklığı 4,2 °C’de başlamış ve 21,5 °C de sonlanmıştır. Tepe noktasının sıcaklığı ise 11,2 °C’dir. Dönüşümün entalpisi 0,62 mJ/mg olarak tespit edilmiştir. 2. pik için faz dönüşüm sıcaklığı 50,5 °C’de başlamış ve 67,8 °C de sonlanmıştır. Tepe noktasının sıcaklığı ise 60,4 °C’dir. Dönüşümün entalpisi 0,21 mJ/mg olarak tespit edilmiştir.

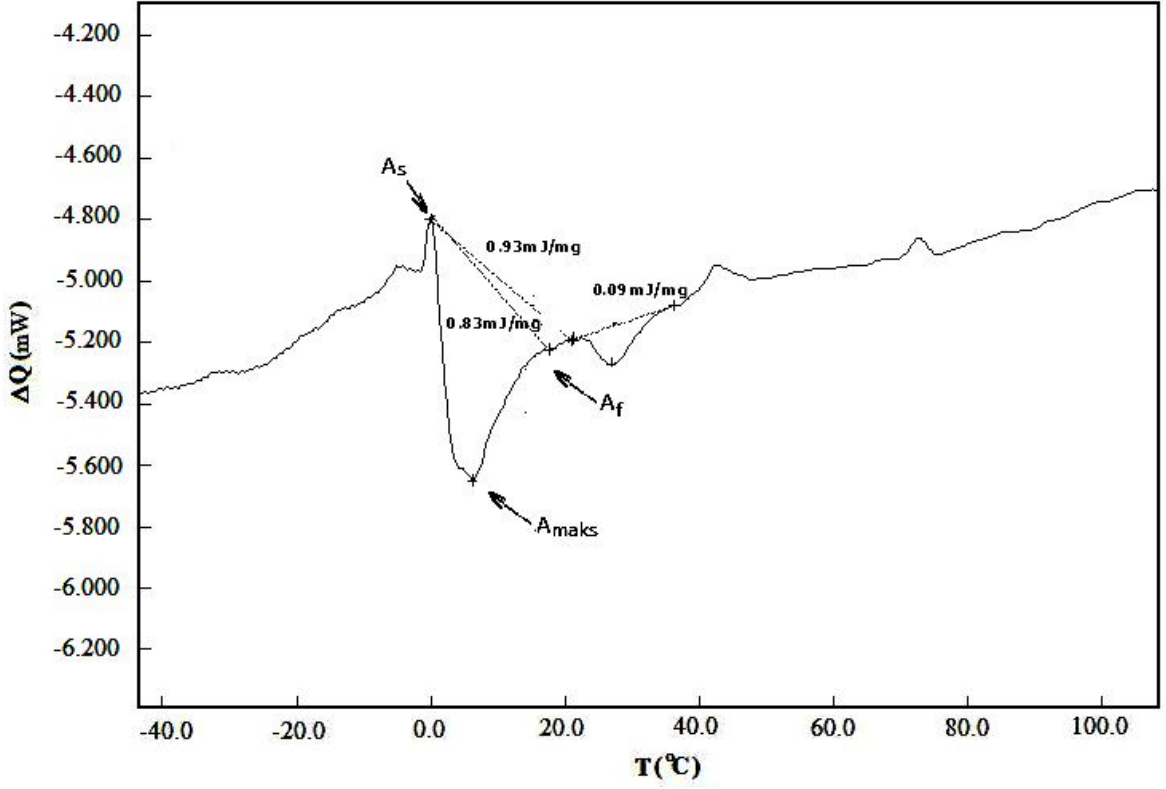


Şekil 4.1. N1 numunesine ait dakikada 5 °C ısıtma hızı ile alınan DSC ölçüm eğrileri



Şekil 4.2. N2 numunesine ait dakikada 5 °C ısıtma hızı ile alınan DSC ölçüm eğrileri

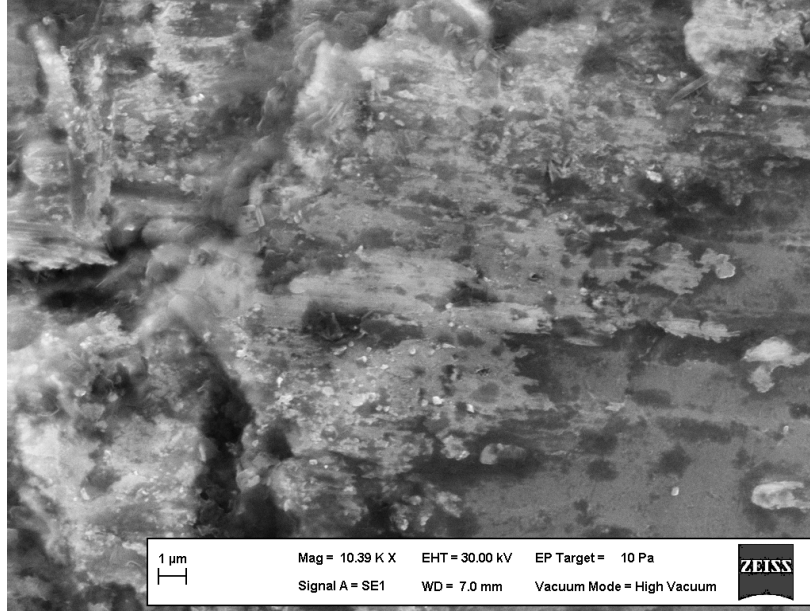
N2 numunesi ait 5 °C ısıtma hızı ile alınan DSC ölçüm eğrilerinden görüldüğü üzere numune 2 noktada faz dönüşümü gerçekleştirmiştir. 1. pik için faz dönüşüm sıcaklığı -0,3 °C’de başlamış ve 26 °C de sonlanmıştır. Tepe noktasının sıcaklığı ise 8,4 °C’dir. Dönüşümün entalpisi 2,72 mJ/mg olarak tespit edilmiştir. 2. pik için faz dönüşüm sıcaklığı 58 °C’de başlamış ve 69,7 °C de sonlanmıştır. Tepe noktasının sıcaklığı ise 62,8 °C’dir. Dönüşümün entalpisi 0,20 mJ/mg olarak tespit edilmiştir.



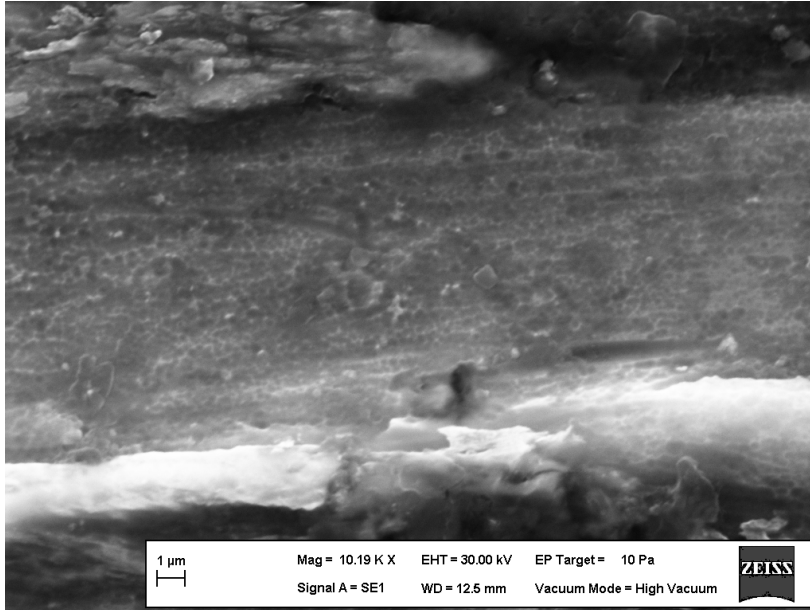
Şekil 4.3. N3 numunesine ait dakikada 5 °C ısıtma hızı ile alınan DSC ölçüm eğrileri

N3 numunesi ait 5 °C ısıtma hızı ile alınan DSC ölçüm eğrilerinden görüldüğü üzere numune 2 noktada faz dönüşümü gerçekleştirmiştir. 1. pik için faz dönüşüm sıcaklığı -3,3 °C’de başlamış ve 17,5 °C de sonlanmıştır. Tepe noktasının sıcaklığı ise 6,2 °C’dir. Dönüşümün entalpisi 0,83 mJ/mg olarak tespit edilmiştir. 2. pik için faz dönüşüm sıcaklığı 21,3 °C’de başlamış ve 36,2 °C de sonlanmıştır. Tepe noktasının sıcaklığı ise 26,9 °C’dir. Dönüşümün entalpisi 0,09 mJ/mg olarak tespit edilmiştir.

4.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntülemeleri ve Enerji Dağılımlı X-Işını (EDS) Analizleri

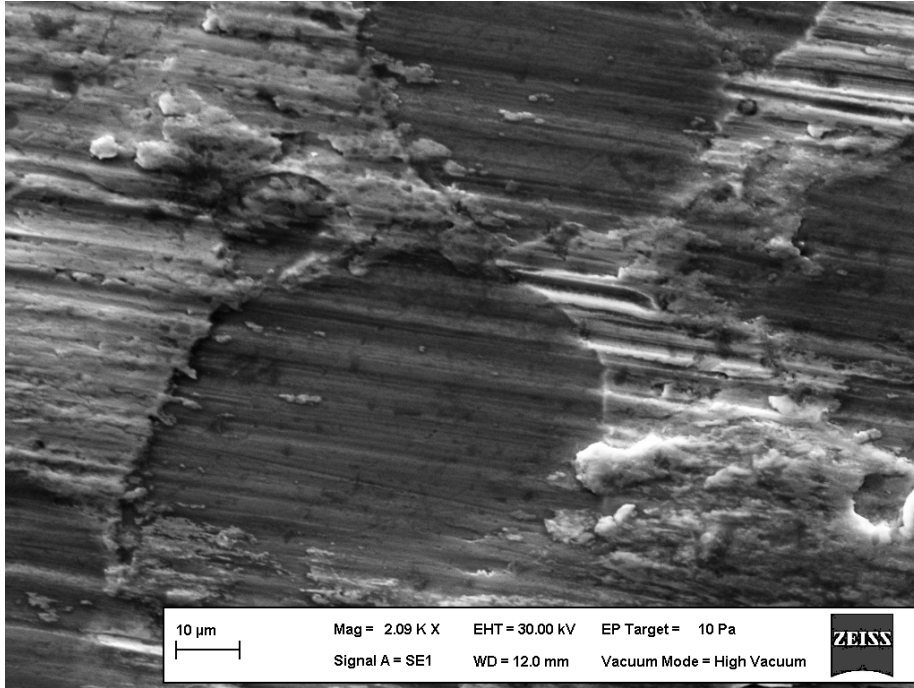
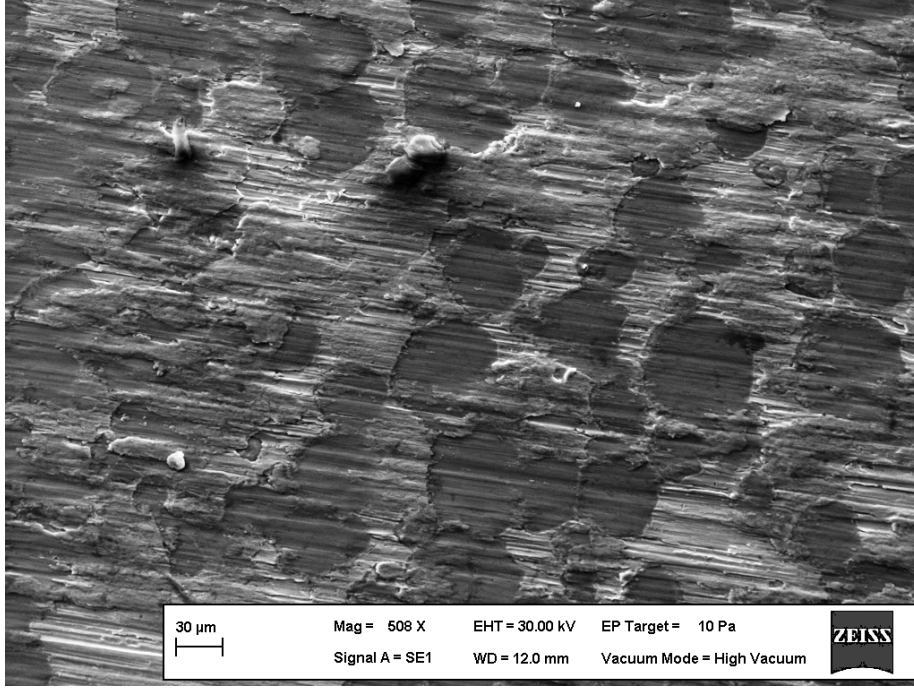


Şekil 4.4. Isıl işlem uygulanmayan N1 numunesinin SEM görüntüsü



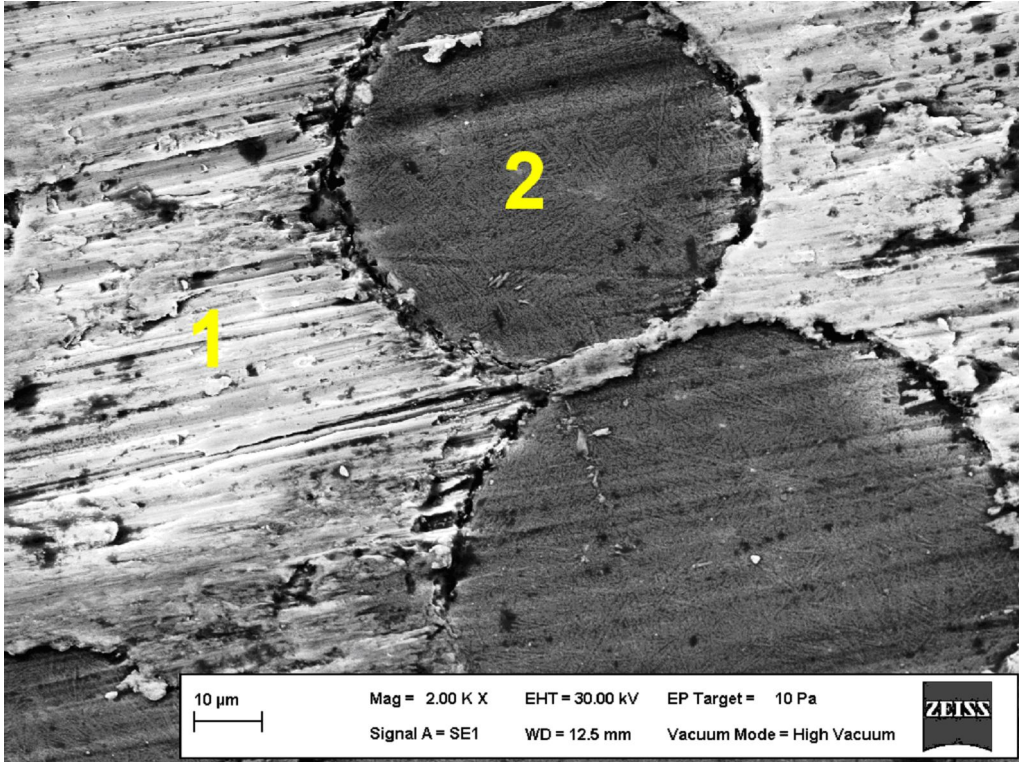
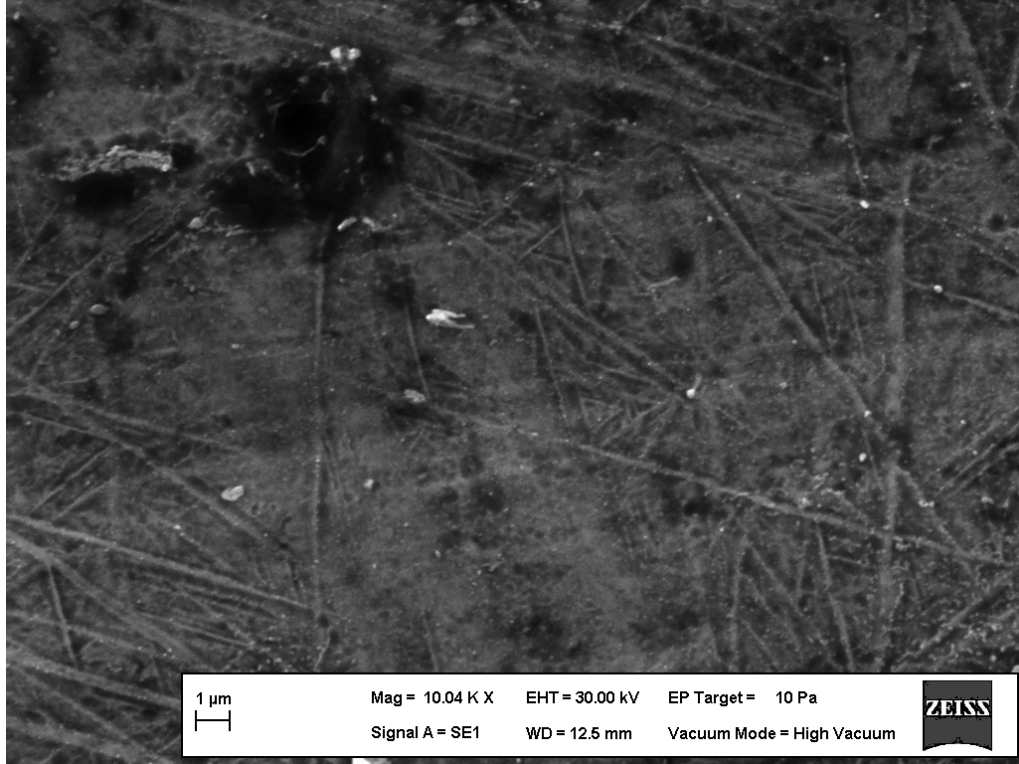
Şekil 4.5. Isıl işlem uygulanmayan N2 numunesinin SEM görüntüsü

Isıl işlem uygulanmayan N1 ve N2 numunelerinde gözenekli yapılara rastlanmıştır [10]. Şekil 4.4’de kısmı topaklanmalara rastlanırken, Şekil 4.5’de nikel matrisi ve matris çevresindeki gözenekler görülmektedir.

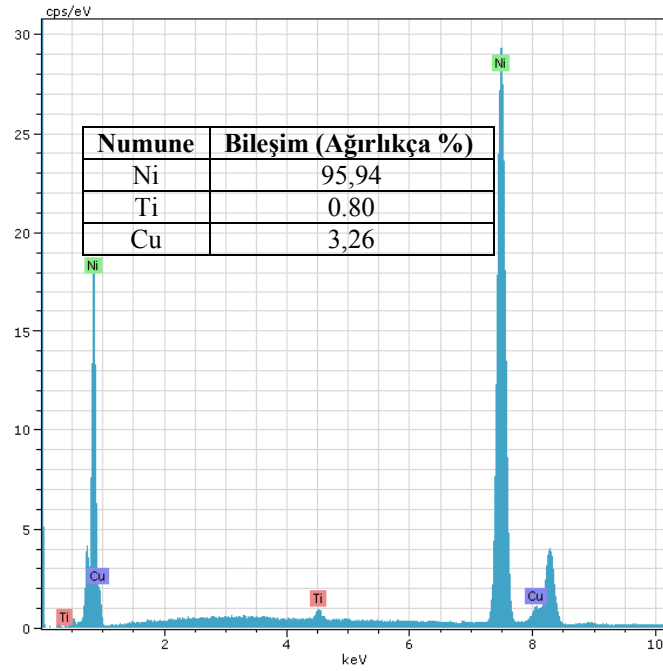


Şekil 4.6. Isıl işlem uygulanmayan N3 numunesinin SEM görüntüleri

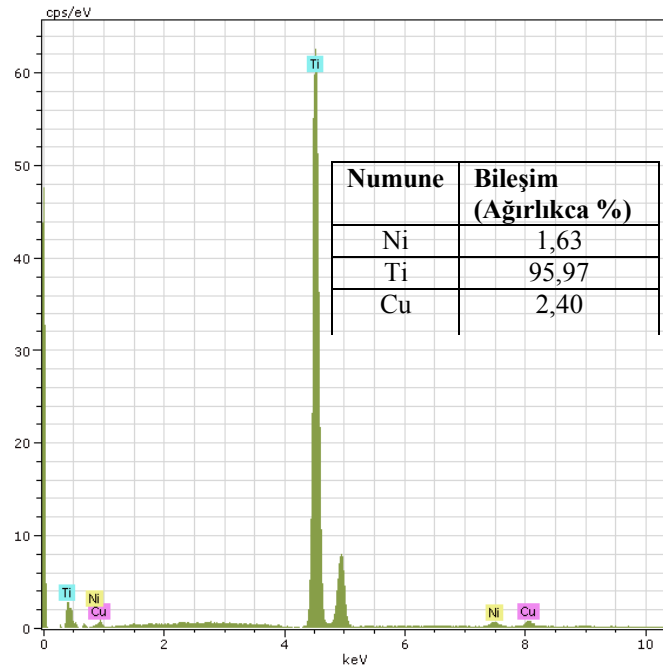
Isıl işlem uygulanmayan N3 numunesinin 500 ve 2000 büyütmedeki görüntüleri çekilmiştir. Numune yüzeyinde farklı büyüklükteki taneler görülmektedir. Bu tanelerin farklı büyüklüklerde olmasının nedeni presleme sırasında oluşan deformasyondan kaynaklanır [55].



Şekil 4.7. Isıl işlem uygulanan N1 numunesinin SEM görüntüleri

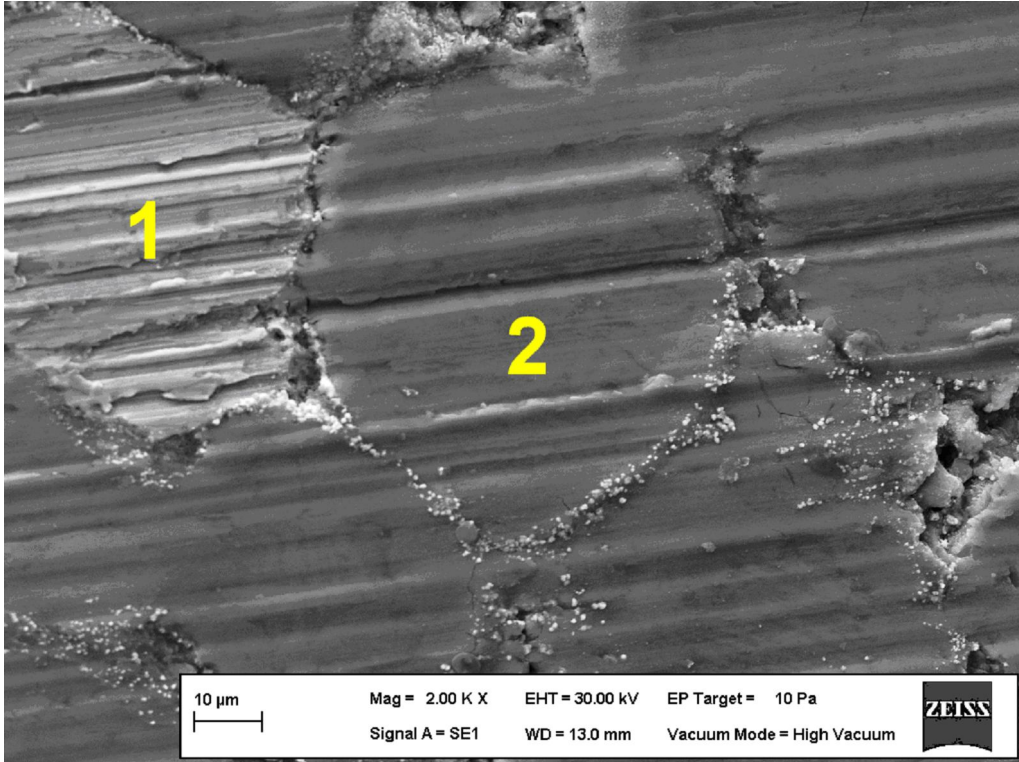
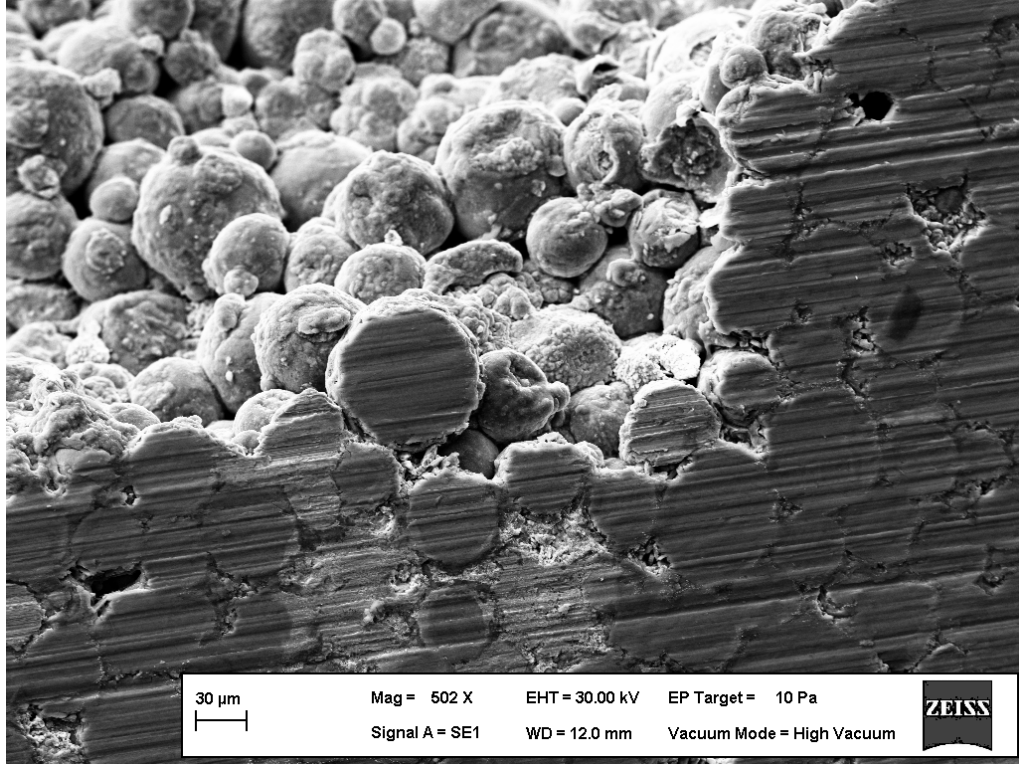


Şekil 4.8. Isıl işlem uygulanan N1 numunesinin 1. bölgedeki EDS analizi

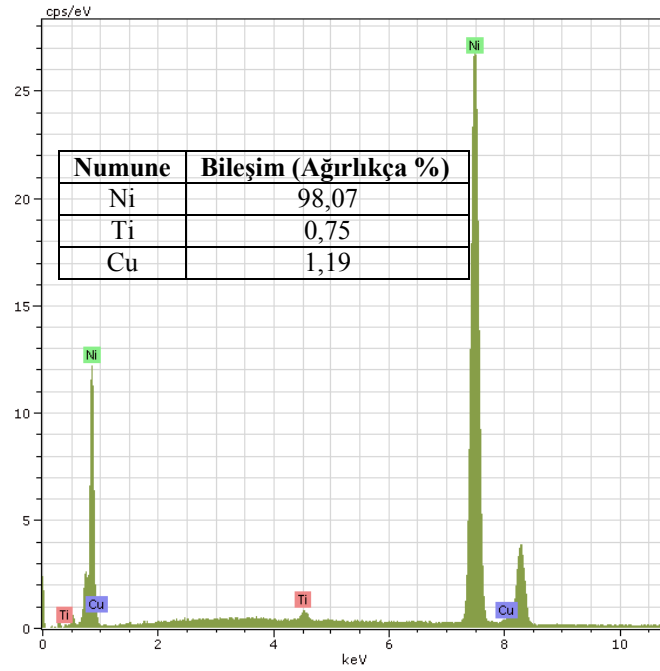


Şekil 4.9. Isıl işlem uygulanan N1 numunesinin 2. bölgedeki EDS analiz

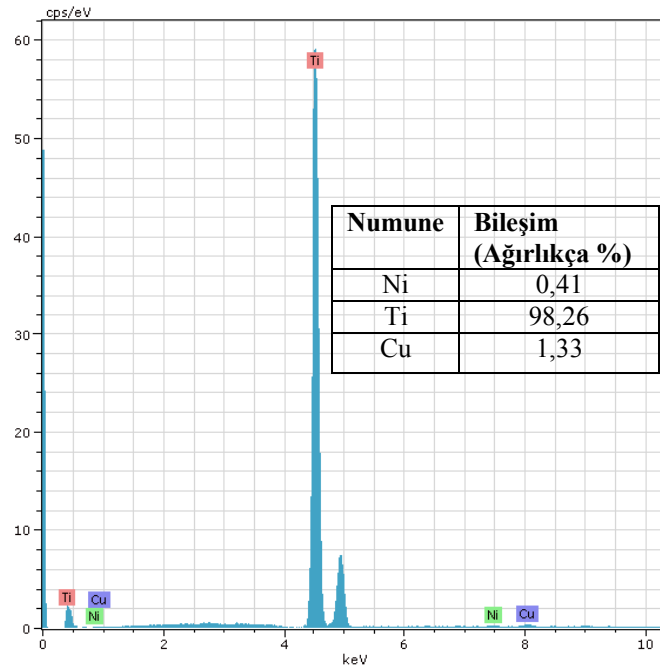
Isıl işlem uygulanan N1 numunesinde titanyum tanecikleri üzerinde oluşmuş iğne tarzı martensit plakalar görülmektedir [58]. Şekil 4.7'den açıkça görüldüğü gibi nikel matrisi içerisinde düzgün ve homojen dağılmış titanyum taneleri görülmektedir. Bu numuneler üzerinden alınan EDS analizlerinden siyah renkli taneciklerin titanyum, kısmen açık renkte olan matris kısmın ise nikel olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.10. Isıl işlem uygulanan N2 numunesinin SEM görüntüleri

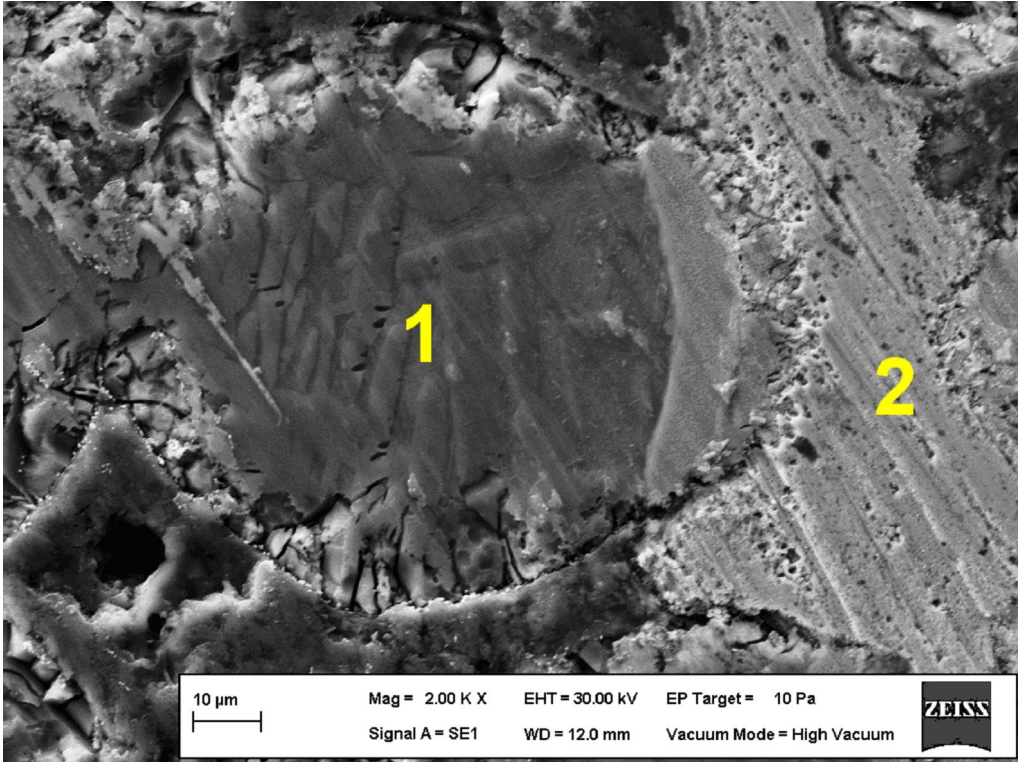
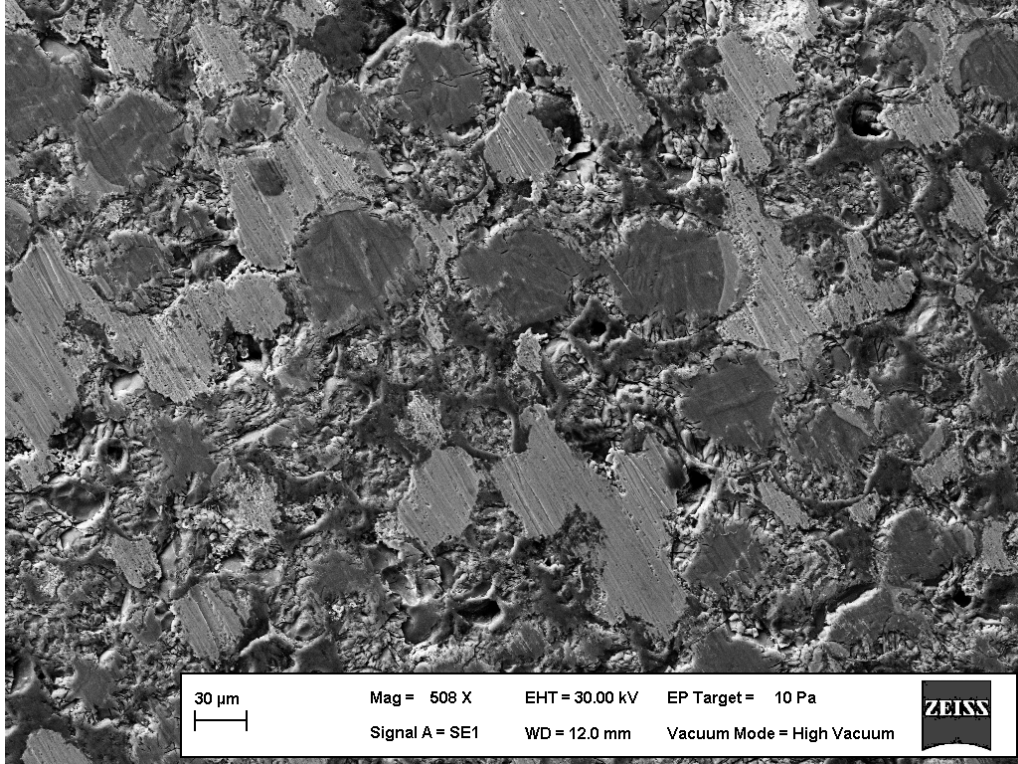


Şekil 4.11. Isıl işlem uygulanan N2 numunesinin 1. bölgedeki EDS analizi

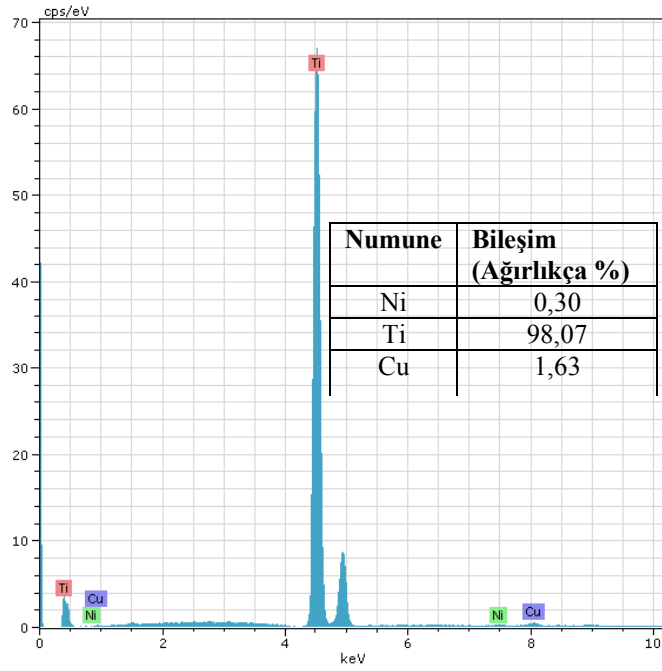


Şekil 4.12. Isıl işlem uygulanan N2 numunesinin 2. bölgedeki EDS analizi

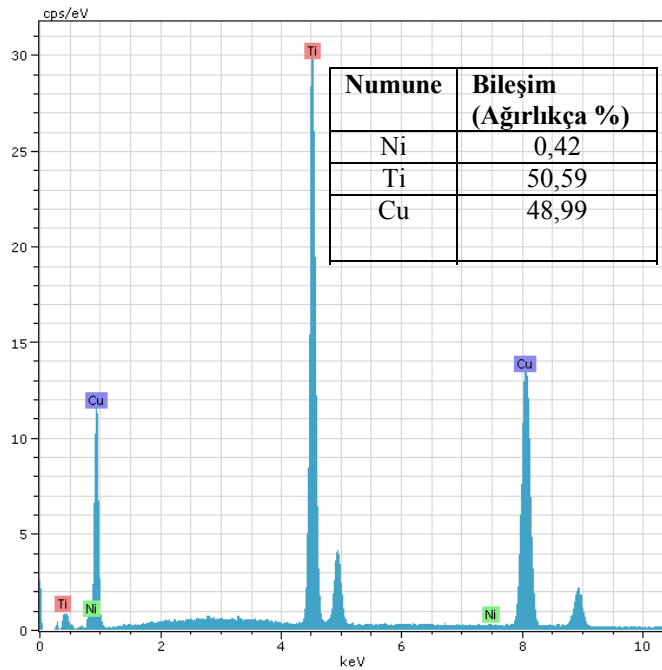
Isıl işlem uygulanmış N2 numunelerinde farklı büyüklükteki tanelerin kaynaşmaya başladığı ve oluşmaya başlamış olan tane sınırları gösterilmiştir. Kırık yüzey üzerinden alınan SEM görüntülerinde boşluklar görülmektedir. EDS analizlerinde nikel matrisi içerisinde titanyum tanelerinin dağılımı anlaşılmıştır.



Şekil 4.13. Isıl işlem uygulanan N3 numunesinin SEM görüntüleri



Şekil 4.14. Isıl işlem uygulanan N3 numunesinin 1. bölgedeki EDS analizi



Şekil .15. Isıl işlem uygulanan N3 numunesinin 2. bölgedeki EDS analizi

Isıl işlem uygulanmış N3 numunelerinde yapının daha homojen bir hale geldiği ve nikel matrisine uygun olarak matris takviye ara yüzeylerinde bakırın yer aldığı gözlenmiştir. Ayrıca çatlaklar görülmektedir. EDS analizlerinde artan bakır oranına bağlı olarak matris içerisindeki bakır dağılımındaki artış kaydedilmiştir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

- Yoğunluk ve gözeneklilik ölçüm sonuçları için; alaşımlarda kullanılan elementlerin yoğunlukları sırasıyla: bakır için $8,94 \text{ g/cm}^3$, titanyum için $4,51 \text{ g/cm}^3$ ve nikel için $8,90 \text{ g/cm}^3$ 'dür [59]. Beklenildiği üzere bakır katkısı artıkça ölçülen yoğunluk değerleri de artmaktadır. Ölçülen yoğunluk değerleri, teorik yoğunluk değerlerinin altında çıkmıştır. Bu durumun, numunelerde meydana gelen gözeneklilikler sebebi ile oluştuğu anlaşılmaktadır. Buna bağlı olarak numunelerde % 17-20 arasında gözenekliliklerin meydana geldiği tespit edilmiştir. Teorik yoğunluğa en yakın ve en az gözenekliliğe sahip alaşım N3 alaşımıdır.

- Mikrosertlik ölçüm sonuçları için; alaşımlarda kullanılan elementlerin mikrosertlik değerleri sırasıyla: bakır için 369 HV, titanyum için 970 HV ve nikel için 638 HV' dir [60]. Numune içerisindeki bakır miktarı artıkça ölçülen sertlik değerlerinde belirgin bir azalma meydana gelmektedir. Bu durum ise; nikel ve titanyuma kıyasla çok daha düşük mikrosertlik değerine sahip olan bakır elementinin numune sertliğini azaltıcı etkisine bağlanabilir. En sert alaşım olarak N1 alaşımı ölçülmüştür.

- Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 de görülen DSC eğrilerinde ısıtma sonucunda tek yönlü bir dönüşüm görülmüştür. NiTiCu alaşımlarında dönüşüm sıcaklıkları genelde $15 \text{ }^\circ\text{C}$ civarlarında başlayıp $40 \text{ }^\circ\text{C}$ sınırlarında bitmektedir [61]. N1, N2 ve N3 numunelerinin DSC grafiklerinden görüldüğü gibi dönüşüm tam olarak keskin bir şekilde sağlanmamaktadır. Bunun sebebi sinterleme ve presleme şartlarının tam olarak elde edilememesinden kaynaklanabilir. Numunelerin austenite başlama, austenite bitiş sıcaklıkları ve entalpi değerleri aşağıdaki Tablo 5.1'de verilmiştir. Her üç numunede de ısıtma sırasında iki farklı faz dönüşüm piki açık bir şekilde görülmüştür. Isıtma sırasında biri keskin biri yumuşak şekilde oluşan iki faz dönüşüm pikinin görülmesi bu tür alaşımların tipik özelliklerinden biridir [62]. Ayrıca NiTiCu alaşımlarında bakır oranı arttıkça dönüşümün başlangıç ve bitiş sıcaklıkları arasında bir düşüş gözlenir. Bu tür alaşımlarda artan bakır oranına bağlı olarak faz dönüşüm başlangıç sıcaklığının sola kayması beklenen bir durumdur [63]. Numunelerin DSC piklerine bakıldığında austenite

başlangıç sıcaklığının sola doğru kaydığı görülmektedir. Buda literatürle uyum içinde olduğunun açık bir kanıtıdır.

Tablo 5.1. Üretilen numunelerin dönüşüm sıcaklıkları ve entalpi değerleri

Numuneler	1. Pik			2. Pik		
	A _s (°C)	A _f (°C)	ΔH (mJ/mg)	A _s (°C)	A _f (°C)	ΔH (mJ/mg)
N1	4,2	21,5	0,62	50,5	67,8	0,21
N2	-0,3	26	2,72	58	69,7	0,20
N3	-3,3	17,5	0,83	21,3	36,2	0,09

- Isıl işlem uygulanmayan numunelerde tipik gözenekli yapılara rastlanmıştır [10]. N3 numunesinde başlangıçta kullanılan ortalama 40 μm' lik parçacık büyüklüğüne sahip elementlerin kaynaştığı gözlenmiştir. Isıl işlem uygulanmış numunelerin enerji dağılımlı X-ışını (EDS) sonuçlarına bakılacak olursa; beklenildiği gibi Ni, Ti ve Cu elementleri dışında herhangi bir element tespit edilmemiştir. Bu ise numunelerde herhangi bir safsızlık veya kirlilik oluşmadığının göstergesidir. N1 ve N2 numunesi için iki farklı bölgede alınan EDS sonuçlarında Ni ve Ti' un yüzdelерinin yüksek olduğu ve Cu elementinin ağırlıkça yüzdesinin düşük olduğu tespit edilmiştir. N3 numunesinde ise matris takviye ara yüzeyinde bakırın yer aldığı gözlenmiştir.

5.1. İleri Çalışmalar için Öneriler

- 1- Sıcak presleme tekniği ile üretilen NiTiCu alaşımları uygun pres ve sinterleme sıcaklıkları sağlandığı zaman çift yönlü şekil hafıza gösterebilir.
- 2- Numunelerimiz sonradan 800 °C' sinterlenmesine rağmen düşük sertlikte kalmıştır. Sinterleme sıcaklığı arttırılarak daha sert bir malzeme elde edilebilir.
- 3- Bakır oranı arttığı zaman yoğunluk artmaktadır. Ama çalışmamızda ısıl işlem gözeneklikleri % 20' ye varan değerlerde oluşturmuştur. Bunun için ısıl işlem sıcaklığı arttırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Ozan, S., Çalgülü, U., Taşkın, M., Gür, A.K, Dikbaş, H., Çay, V.V.,** (2006), Sıcak Presleme Yöntemiyle İmal Edilmiş SiCp Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Difüzyon Kaynağında Sıcaklığın Birleşme Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. 11. Uluslar arası Denizli Malzeme Sempozyumu, 233-236, Denizli.
- [2] **German, R. M.,** (1998), “Powder Metallurgy of Iron and Steel”, Jhon Willey and Sons, U.S.A.
- [3] **Metals Handbook,** (1990), vol 1.”Properties and Selection: Iron, Steels and High Performance Alloys”,10th Edition, American society of Metals, Materials Park.
- [4] **Bocchini, G. F., and Lindskog, P. F.,** (1991),“Applications and Developments of Sintered Ferrous Materials” Powder Metallurgy-An overview”, The Institute of Metals Series on Powder Metallurgy, 287.
- [5] **Upadhyaya, G. S.,** (2000), “Sintered Metallic and Ceramic Materials-Sintered Low-Alloy Ferrous Materials”, John Wiley & Sons LTD, West Sussex, England.
- [6] **Söyler, M.,** (2007), Toz Metalurjisi ve Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze.
- [7] **Kaya, G.,** (1999), Mechanical Properties of Pm Al-SiC Compozites Produced By Conventional Hot Pressing Method. Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Y.Lisans Tezi, Ankara.
- [8] **Shugo Y, Shimizu T, Morii K, Yamada T, Kusaka K.,** (1993), Effects of heat treatment and thermal cycle on helical spring properties in NiTiCu alloy. Proc Inter Conf Martensitic Trans, Monterrey, p 1259.
- [9] **Mazzolai, F.M., Biscarini, A., Campanella, R., Coluzzi, B., Mazzolai, G., Rotini , A., Tuissi, A.,** (2003), Internal friction spectra of the Ni₄₀Ti₅₀Cu₁₀ shape memory alloy charged with hydrogen, Acta Materialia 51, 573–583.
- [10] **Gryczka, T., Humbeeck, J.V.,** (2008), Characterization of A NiTiCu SMA Produced by Powder Technology, Journal of Alloys and Compounds, 456, 194-200.

- [11] **Şükürov, R.İ.**, (2002), Metal Şünaslıq, Çaşıoğlu Yayınevi, Bakü.
- [12] **Hiçyılmaz, N.**, (1999) Toz Metalurjisi Yöntemi İle Elde Edilen Seramik Tanecik Destekli Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerin Aşınma Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [13] **Yavuz, N., Güner, R.**, (2002), Demir Esaslı Toz Metal Parçalarının Elektrik Direnç Kaynağından Optimum Kaynak Şartlarının Belirlenmesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 7, Sayı 1, sayfa 221-228.
- [14] **Babayev, Y.**, (2007), Bir Kompresör Gövdesi İmalatının Toz Metalurjisi ve Difüzyon Kaynağı Yöntemleri Uygulanarak Optimizasyonu, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [15] **Onur, A.**, (1996), Yağ Atomizasyonu Yöntemiyle Metal Tozu Üretiminin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- [16] **Lawley, A.**, (1996), A Study of Compaction of Metal Powders, 1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [17] **Kayış, V.**, (2005), Kimsi ve Ön Alaşımli Demir Tozları İçerisine Katılan B ve Fe İlavelerinin Sinterlenme Davranışları ve Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- [18] **Baksan, B., Gürler, R.**, Toz Metalurjisinin Savunma Sanayisinde Uygulanması, Metalurji Enstitüsü, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 26480.
- [19] **Aydın, M., Yetkin, H.**, (2006), MMK Üretiminde Farklı Tasarımlardaki Karıştırıcıların Etkisinin Araştırılması, Teknoloji Dergisi, Cilt 9, Sayı 1, 39-46.
- [20] **Sarıtaş, S.**, (1996), Bir Titreşimli Öğütücü İmalatı ve Metal Tozlarının Öğütmeye Bağlı Özelliklerinin Araştırılması, 1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, S. 387-395, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [21] **Turan, P.**, (2002), W-Ni-B ve W-Ni Ağır Alaşımlarının Karşılaştırmalı Sinterlenme Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [22] **Pavlovic, M., G., Pavlovic, L., J., Ivanovic, E., R., Radmilovic, V., Popov, K., I.**, (2001), The Effect of Particle Structure on Apparent Density of Electrolytic Copper Powder, J. Serb. Chem. Soc. 66 (11-12) 923.
- [23] **Hatman, A., Karagöz, Ş.**, (1993), Su Atomize CuZn42 Alaşımı Tozu Üretimi ve Su Basıncının Toz Özelliklerine Etkileri, 7. Uluslar arası Metalurji ve Malzeme Kongresi, Ankara.

- [24] www.turktoz.gazi.edu.tr/makale.htm. (30 Mayıs 2011)
- [25] **Kurgan, N.**, (2004), T/M Paslanmaz Çelik İmplantların Üretimi ve Teknolojik Özellikleri Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- [26] **Chawla, N., Murphy, T.F., Narasimhan, K.S., Koopman, M., Chawla, K.K.**, (2001), Axial Fatigue Behavior of Binder-Treated Versus Diffusion Alloyed Powder Metallurgy Steels, Materials Science and Engineering, A308, 180-188.
- [27] **Lee, D.V., Bang, K.J., Kim, M.W., Park, P.Y., Jung, K.D., Kim, C.J.**, (2004), Processing Condition For The Development of Cube Texture in Ni and Ni Alloy Tapes Fabricated by Powder Metallurgy Process, Physica, 412-414, 853-858.
- [28] **Aydın, Ş.**, (1997), Toz Metalurjisi Yöntemleri İle Elde Edilen Seramik Tanecik Destekli Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [29] **Balın, A.**, (2011), Sıcak Presleme Tekniğiyle Üretilen Cocrmo Toz Alaşımının Sinterleme Sıcaklığının Mikroyapı Üzerine Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [30] **Lenel, F., V.**, (1980), Powder Metallurgy Principles and Application.
- [31] **Çelik, E.**, (2009), "Elmaslı kesici takımlarda alternatif bağlayıcılar", Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Elazığ.
- [32] **Pilliar, R. M.**, (1998), "P/M Processing Of Surgical Implants: Sintered Porous Surfaces For Tissue-To-Implant Fixation", The International Journal Of Powder Metallurgy, Volume 34, No.8, pp. 33-45, APMI International.
- [33] **Kurt, A., O., Davies, T., J.**, (1996), A Study of Compaction of Metal Powders, 1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [34] **Boz, M.**, (2003), Seramik Takviyeli Bronz Esaslı Toz Metal Fren Balata Üretimi ve Sürtünme-Aşınma Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Ankara.
- [35] www.me.gatect.edu/jonathan.colton/me4210/powder.pdf. (2 Haziran 2010)

- [36] **Yang, L., Bin, L., Xiao-yu, H., Ping, T.H., Fang, C.L.,** (2008), Low Cycle Fatigue Improvement of Powder Metallurgy Titanium Alloy Through Thermomechanical Treatment, *Trans. Nonferrous Met. Soc China*, 18, 227-232.
- [37] **Uygur, M., E.,** (1996), *Toz Metalurjisi: Ekonomik Bir Üretim Tekniği*, 1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, s.485, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [38] **Lawley, A., Apelian, D.,** (1991) *Process Control in Powder Metallurgy*, Department of Materials Engineering, , Drexel University, Philadelphia, USA, 3-21.
- [39] **Sarıtaş, S., Ünal, İ.,** (1996), *Piroteknik Uygulamalarda Toz Metalurjisi*, 1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, s. 315- 333, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [40] **Li, Z., Pan, Z.Y., Tang, N., Jiang, Y.B., Liu, N., Fang, M., Zheng, F.,** (2006), Cu–Al-Ni-Mn Shape Memory Alloy Processed by Mechanical Alloying and Powder Metallurgy, *Materials Science and Engineering A* 417, 225–229
- [41] **Nam, T.H., Saburi, T., Nakata Y. and Shimizu, K.,** (1990), Shape memory characteristic and lattice deformation In Ti-Ni-Cu alloys, *Materials Transactions JIM* 31 1050-1056.
- [42] **Fukuda, F., Kakeshita, T., Kitayama M. and Saburi, K.,** (1995), Effect of ageing on martensitic transformation in a shape memory Ti40.5Ni10Cu alloy, *Journal de Physique IV* 5, C8-717.
- [43] **Otsuka K, Ren X.,** (2005), Physical metallurgy of Ti-Ni- based shape memory alloys. *Progr Mater Sci*, 5: 511-678.
- [44] **Tang W, Sandstrom R, Wei Z G, Miyazaki S.,** (2003), Experimental investigation and thermodynamic calculation of the Ti-Ni-Cu shape memory alloys. *Metall Mater Trans*, A31: 2423-30.
- [45] **Grossmann Ch, Frenzel J, Samphath V, Depka T, Eggeler G.,** (2009), Elementary transformation and deformation processes and the cyclic stability of NiTi and NiTiCu shape memory spring actuators. *Metal Mater Trans A* 40: 2531-44.
- [46] **Gil F J, Solano E, Penal J, Engel E, Mendoza A, Planell J A.,** (2004), Microstructural, mechanical and cytotoxicity evaluation of different NiTi and NiTiCu shape memory alloys. *J Mater Sci: Mater Medicine*, 15: 1181-5.

- [47] **Colombo S, Cannizzo C, Gariboldi F, Airoidi G.,** (2006), Electrical resistance and deformation during the stress-assisted two-way memory effect in Ni₄₅Ti₅₀Cu₅ alloy. *J Alloys Compd*, 422: 313-20.
- [48] **Kennedy, J. B.,** (1984), *Shape Memory Alloys*, H. Funakubo, Ed., New York: Gordon and Breach.
- [49] **Perkins, J. and Hodgson, D.,** (1990), ‘The Two-way Shape Memory Effect,’ in *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, London, U.K.: Butterworth-Heinemann, pp. 195-206.
- [50] **Wei, Z.G., Tang, C.Y., Lee, W.B., Cui, L.S., Yang, D.Z.,** (1997), Preparation of a smart composite material with TiNiCu shape memory particulates in an aluminium matrix, *Materials Letters*, 313-317.
- [51] **Drensler, S., Neelakantan, L., Somsen, C., Eggeler, G., Hassel, A.W.,** (2009), Electropolishing of a NiTiCu shape memory alloy in methanolic sulfuric acid, *Electrochemical and Solid-State Letters*, 12 (2) C1-C4.
- [52] **Es-Souni, M., Es-Souni, M. and Brandies, H.F.,** (2001), *Biomaterials*, 22, 2153.
- [53] **Ming H. Wu and L. McD. Schetky,** (2000), Industrial applications for shape memory alloys, *Proceedings of the International Conference*, P.171-182, California.
- [54] **Wu, M.H. and Ewing, W.A.,** (1994), *Proceedings, SMST-94*, Pacific Grove, California, p.311.
- [55] **Morakabati, M. Aboutalebi, Sh. Kheirandish, A. Karimi Taheri, S.M.,** (2010), Hot tensile properties and microstructural evolution of as cast NiTi and NiTiCu shape memory alloys, *Materials and Design*, S0261-3069(10)00341-9
- [56] **Mabe, J. H., Calkins, F., Butler, G.,** (2006) Boeing’s variable geometry chevron, morphing aerostructure for jet noise reduction, in: 47th AIAA/ ASME / ASCE / AHS / ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Newport, Rhode Island, 2006, pp. 1–19.
- [57] **Kotil, T., Şehitoglu, H., Maier, H.J., Chumlyakov, Y.I.,** (2003), Transformation and detwinning induced electrical resistance variations in NiTiCu, *Materials and Engineering A359* (2003) 280- 289
- [59] **Callister, W.D.,** (2005) *Fundamentals of Materials Science and Engineering an Integrated Approach*, John Wiley and Sons, INC, Newyork

- [60] **Gryczka, T., Humbeeck, J.V.**, (2008), Microstructure and Martensitic Transformation in Sintered NiTiCu alloy, *International Journal of Materials and Product Technology*, Volume 33, Number 3/ 252-264
- [61] **Harikrishnan, K., Chandra, K., Misra, P.S., Agarwala, S.**, (2009), B19 Orthorhombic Martensitic Transformations in Aged TiNiCu Shape Memory Alloys, *Esomat*, DOI:10.1051
- [62] **Castillo, C.L., Mellor, B.G., Blazquez, M.L., Gomez, C.**, (1987), *Scripta Metal.*, 21, 1711
- [63] **Besseghini, S., Villa, E.**, (2008), Characterization of Phase Evolution Under Load by Means of Phase Contrast Imaging Using Synchrotron Radiation, Dept. Of Lecco, Corso Promessi Sposi 29, 23900, Lecce, Italy

ÖZGEÇMİŞ

İbrahim Halil KAHKECİ, 01.02.1984 tarihinde Şanlıurfa'da doğdu. İlkokul, ortaokul ve lise eğitimini Şanlıurfa'da tamamladı. 2009 yılında İnönü Üniversitesi Fizik Bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Genel Fizik Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı.