

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



MUNZUR
ÜNİVERSİTESİ
2008

**SICAK PRESLEME İŞLEMİNDE SIVI FAZIN MATRİS ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Yusuf KAYGUSUZ**

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

**DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul ÇELİK
TUNCELİ – 2018**

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

**SICAK PRESLEME İŞLEMİNDE SIVI FAZIN MATRİS ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Yusuf KAYGUSUZ
(141107101)**

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

**DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul ÇELİK**

TUNCELİ – 2018

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SICAK PRESLEME İŞLEMİNDE SIVI FAZIN MATRİS ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİ

Yusuf KAYGUSUZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 11/07/ 2018 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

İmza:.....

Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul
ÇELİK
(Munzur Üniversitesi)

DANIŞMAN

İmza:.....

Dr. Öğr. Üyesi Yılmaz
KİSMET
(Munzur Üniversitesi)

ÜYE

İmza:.....

Dr. Öğr. Üyesi Soner
BUYTOZ
(Fırat Üniversitesi)

ÜYE

Bu tez, Enstitümüz Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç. Dr. Numan YILDIRIM
Enstitü Müdürü
İmza ve Mühür

Bu çalışma, Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

Proje No: YLMÜB016-26

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı "Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu"ndaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Toz metalurjisi günümüzde sıklıkla kullanılan bir imalat yöntemidir. İmalat endüstrisi açısından büyük bir öneme sahiptir. Özellikle küçük, karmaşık şekilli ve kompozit malzemelerin imalatı için imalat maliyetleri açısından en avantajlı yöntemdir. Toz metalurjisi imalat yöntemi kullanılarak sinterleme parametreleri ve teknikleri değiştirilerek malzemelerin mekanik ve mikroyapı özelliklerinde istenilen doğrultuda değişiklikler yapılmaktadır. Buda yöntemi endüstri açısından oldukça önemli kılmaktadır. Toz metalurjisi ile üretilen ürünlerde porozite miktarı ürünün yapısal özelliklerini ciddi oranda etkiler. Yapı içerisinde ki poroziteler sinterleme işleminin gerçekleşmesi ile azalmaktadır. Ayrıca artan sinterleme sıcaklığının yanı sıra ilave edilen AgCd katkısı da makro ve mikro porozite miktarını azaltmaktadır.

Yapılan bu tez çalışmasında malzemenin sertlik, yoğunluk, 3 noktalı eğilmesi, kırık yüzeyleri, MAP ve XRD incelemeleri ile mikro ve makro yapısal formları incelenmiştir. Yapılan bu çalışmada Co-Ni-Bz'dan oluşan matrise ilave edilen AgCd'un matris mukavemeti üzerinde artırıcı bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. Matris mukavemetinin artmasında rol oynayan AgCd oranının yanı sıra sinterleme sıcaklığının da matris mukavemetinde artırıcı bir faktör olduğu gözlemlenmiştir. Sinterleme sıcaklığının artması ile birlikte matris içerisindeki AgCd sıvı faz oluşturarak makro ve mikro poroziteleri doldurur ve böylece matrisin yoğunluğunda artış meydana gelir. Sıvı fazın oluşması sonucunda porozitelerin azaldığı SEM fotoğraflarında görülmüştür.

Sonuç olarak sinterleme sıcaklığının artması ve ilave edilen AgCd miktarına bağlı olarak oluşan sıvı fazın neticesinde malzemenin mekanik özelliklerinde artışlar gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Toz metalurjisi, sinterleme, sıvı faz sinterleme, sıcak presleme.

SUMMARY

Effect Of Liquid Phase Matrix Properties In Hot Pressing Process

Powder metallurgy is a frequently used manufacturing method today. The manufacturing industry has a great proposition in terms of the industry. It is the most advantageous method in terms of manufacturing costs especially for the production of small, complex shaped and composite materials. By changing the sintering parameters and techniques by using the powder metallurgy manufacturing method, the mechanical and microstructure properties of the materials are changed in the desired direction. This method is very important for the industry. The amount of porosity in products produced by powder metallurgy seriously affects the structural properties of the product.

In this thesis, hardness, density, 3 point bending, fracture surfaces, MAP and XRD studies and micro and macro structural forms of materials were investigated. In this study, it was observed that the AgCd added matrix of Co-Ni-Bz played an enhancing role on the matrix strength. In addition to the ratio of AgCd, which plays a role in increasing the strength of the matrix, it has been observed that the sintering temperature is also an increasing factor in the matrix strength. With the increase in sintering temperature, AgCd in the matrix forms a liquid phase to fill the macro and microporosities, thus increasing the density of the matrix.

As a result, the mechanical properties of the material have been observed to increase due to the increase of the sintering temperature and the resulting liquid phase depending on the amount of AgCd added.

Key words: Powder metallurgy, sintering, liquid phase sintering, hot pressing.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın, planlanmasından sonuçlanmasına kadar ki tüm sürecinde hiç bir zaman desteğini esirgemeyen tez çalışmamın her aşamasında yanımda olan ve bir an olsun bilgi ve birikimini paylaşmaktan kaçınmayan kıymetli büyüğüm, saygıdeğer tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi. Ertuğrul ÇELİK hocama gösterdiği ilgi, alaka ve desteğinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her zaman arkamda duran, manevi desteğini ve güvenini hissettirerek bana güç veren kıymetli eşime teşekkürlerimi sunarım.

Yusuf KAYGUSUZ

TUNCELİ-2018

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖZET	I
SUMMARY	II
TEŞEKKÜR	III
İÇİNDEKİLER	IV
ŞEKİLLER TABLOSU	VII
TABLOLAR LİSTESİ	IX
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	X
1. GİRİŞ	1
2. TOZ METALURJİSİ	3
2.1.Toz Metalurjisinin Tarihi Gelişimi.....	3
2.2. Toz Metalurjisinin Tanımı Ve Önemi	3
2.3. Toz Metalurjisi İle İmalatın Temel Basamakları.....	5
2.3.1 Tozların Üretimi	7
2.3.1.1. Mekanik Toz Üretim Yöntemi	7
2.3.1.2. Kimyasal Yöntem İle Toz Üretimi	8
2.3.1.3. Elektroliz Yöntem İle Toz Üretimi.....	9
2.3.1.4. Atomizasyon Yöntemleri İle Toz Üretimi.....	10
2.3.2. Toz Karışımının Hazırlanması.....	11
2.3.3 Tozların Preslenmesi	12
2.3.4. Tozların Sinterlenmesi.....	13
2.3.4.1. Katı Hal Sinterleme	14
2.3.4.2. Sıvı Faz Sinterleme.....	15
3. SIVI FAZ SİNERLEME	17
3.1. Sıvı Faz Sinterleme İşleminin Temel Özellikleri	19
3.1.1. Yoğunluk Artışı	19
3.1.2. Sıvı Faz Oluşumu	19

3.2. Sıvı Faz Sinterleme İşleminin Aşamaları	20
3.2.1. Birinci Aşama (Sıvının Dağılımı Ve Yeniden Düzenlenmesi)	22
3.2.2. İkinci Aşama (Çözelti – Çökelme)	25
3.2.3. Üçüncü Aşama (Mikroyapısal Büyüme)	28
3.3. Termodinamik ve Kinetik Etkenler	29
3.3.1. Sıvının Islatma Özelliği	29
3.3.2. Çözünürlük Etkisi	30
3.3.3. Kapiler Kuvvet	30
3.3.4. Gravite Etkisi	31
4. SICAK PRESLEME	32
4.1. Sıcak Presleme İşlemi.....	32
4.2. Sıcak Presleme Yönteminin Avantajları	35
5. TOZ ÖZELLİKLERİNİN SİENTERLEMeye ETKİSİ	36
5.1. Metalurjik Özellikler	36
5.2. Fiziksel (Geometrik) Özellikler.....	37
5.3. Tozların Mekanik Özellikleri	39
5.3.1. Görünür Yoğunluk.....	39
5.3.2. Sıkıştırılabilirlik Kabiliyeti.....	40
5.3.3. Ham Mukavemet (Kompakt Mukavemeti).....	40
5.3.4. Partikül Kompozisyonu	41
6. GÜMÜŞ- KADMİYUM ALAŞIMLARI	42
7. MATERYAL VE METOT	44
7.1. Kullanılan Malzemeler Ve Segmentlerin Üretimi.....	44
7.1.1. Kullanılan Malzemeler	44
7.2. Karakterizasyon	47
7.2.1. Yüzey parlatma.....	48
7.2.2. Yoğunluk Ölçümü	49
7.2.3. Sertlik Ölçümü.....	50
7.3.4. Üç nokta eğilme deneyi	51

7.3.5. Elektron mikroskobu	52
7.3.6. XRD Cihazı	53
8. BULGULAR	55
8.1. Makroyapı İncelemeleri.....	55
8.2. Mikro Yapı İncelemeleri	55
8.3. EDX İncelemeleri	59
8.4. Sertlik Ölçümü.....	62
8.5. Yoğunluk Ölçümü Sonuçları	64
8.6. Üç Nokta Eğilme Deneyi İncelemeleri.....	66
8.7. Kırık Yüzeyler İncelemeleri	70
8.8. XRD İncelemeleri.....	73
SONUÇLAR.....	76
ÖNERİLER.....	76
KAYNAKLAR.....	79
ÖZGEÇMİŞ	79

SEKİLLER LİSTESİ

Sıra No:

Şekil 2.1. T/M parçaların pazar payları.....	5
Şekil 2.2. T/M parça üretimi kademeleri.....	6
Şekil 2.3. Bilyeli değirmen.....	8
Şekil 2.4. Elektroliz ile toz üretim şeması.....	9
Şekil 2.5. Atomizasyon ile toz hazırlama ünitesi.....	10
Şekil 2.6. Karıştırma makineleri: (a) Dönen tambur (b) Dönen çift kol (c) Vidalı mikser (d) Bıçaklı mikser e) Açılı mikser.....	12
Şekil 2.7. Katı faz sinterleme ile sıvı faz sinterleme arasındaki farkın gösterimi	15
Şekil 3.1 Sıvı fazın gerçekleştiği örnekler.....	18
Şekil 3.2. Sıvı faz sinterleme ve bağıntılı mikroyapısal değişimler.....	20
Şekil 3.3. Sıvı faz sinterleme işlemi aşmaları	21
Şekil 3.4. a. Sıvının izole boyun bölgelerine dağılması b. Sıvının gözeneklere homojen olarak dağılması c.Heterojen olan sıvı dağılımı	23
Şekil 3.5. Çok kristalli parçacıkları parçalanması ve yeniden düzenlenmesi	24
Şekil 3.6. Yüzey teması ile yoğunlaşma modeli.....	25
Şekil 3.7. Büyük ve küçük tanelerin birleşme yoluyla büyümesi.....	26
Şekil 3.8. Temas bölgelerinde ergiyiğin tane sınırı boyunca ilerlemesi ve yumru oluşumunun gösterimi.....	27
Şekil 3.9. Katı ve sıvı arasındaki ısıtma davranışının gösterimi.....	29
Şekil 3.10. Eş iki küre modeli; sıvı köprüsü ile birbirinden ayrılmış	30
Şekil 4.1. İndüksiyon ile kalıbın ısıtılması 1. Grafit yan tutucular 2. Baskı grafitleri. 3. Preslenecek malzeme 4. İndüksiyon sargısı	33
Şekil 4.2. Endirekt ısıtma tekniği. 1. Grafit yan tutucular 2. Baskı grafitleri. 3.Preslenecek malzeme 4.Grafit ısıtıcı	34
Şekil 4.3. 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.....	35
Şekil 5.1. Bazı toz şekilleri.....	39
Şekil 7.1. Matris malzemeleri a)Nikel b) Kobalt c) Bronz alaşımı (CuSn15), d) AgCd...45	

Şekil 7.2. Turbula mikser (Celmak TB7, Türkiye).....	45
Şekil 7.3. Soğuk pres işleminin gerçekleştirildiği cihaz	46
Şekil 7.4. Sıcak presleme işleminden önce numunelerin grafit kalıba montajı	47
Şekil7.5. Epoxy reçine ile kaplanan numuneler.....	48
Şekil 7.6. a) Parlatma cihazı b) Kesme cihazı.....	49
Şekil 7.7. Yoğunluk ölçümlerinin yapıldığı hassas terazi.....	50
Şekil 7.8. Sertlik ölçüm cihazı.....	51
Şekil7.9. Eğilme deneylerinin gerçekleştirildiği cihaz.....	52
Şekil 7.10. Elektron mikroskobu.....	53
Şekil7.11. XRD cihazı	54
Şekil 8.1. Ag-Cd katkısız S1 numunesinin makroyapı SEM resimleri.....	55
Şekil 8.2. Cu-Sn ikili faz diyagramı	56
Şekil 8.3. Katkısız matrisin mikroyapısal fotoğrafları.....	57
Şekil 8.4. S2 S3 ve S4 numunelerinin mikro yapısal fotoğrafları.....	59
Şekil 8.5 S1 numunelerinin EDS -MAP analizleri	60
Şekil 8.6 S2 numunelerinin EDS -MAP analizleri	61
Şekil 8.7 S3 numunelerinin EDS -MAP analizleri	62
Şekil 8.8 S4 numunelerinin EDS -MAP analizleri	62
Şekil 8.9. Sinterleme sıcaklığının sertliğe etkisi.....	64
Şekil 8.10. Numunelerin sıcaklık-yoğunluk grafiği.....	65
Şekil 8.11. S1 Serisi 3 noktalı eğilme deneyi grafiği.....	68
Şekil 8.12. S2 Serisi 3 noktalı eğilme deneyi grafiği.....	68
Şekil 8.13. S3 Serisi 3 noktalı eğilme deneyi grafiği	69
Şekil 8.14. S4 Serisi 3 noktalı eğilme deneyi grafiği	70
Şekil 8.15. S1 numuneleri kırık yüzey SEM resimleri.....	71
Şekil 8.16. S2 numuneleri kırık yüzey SEM resimleri.....	72
Şekil 8.17. S3 numuneleri kırık yüzey SEM resimleri.....	72
Şekil 8.18. S4 numuneleri kırık yüzey SEM resimleri.....	73
Şekil 8.19. S1-S2-S3-S4 numunelerin XRD analiz grafiği	74
Şekil 8.20. S1 numunelerin XRD analiz grafiği.....	75
Şekil 8.21. %2 AgCd katkılı S2 numunelerinin XRD analiz grafiği.....	77

TABLolar LİSTESİ

Sayfa No

Tablo7.1 Numune üretimi için kullanılan malzemeler	44
Tablo 8.1. Farklı sıcaklıklarda sinterlenen AgCd katkılı ve katkısız numunelerin teorik ve deneysel yoğunlukları.....	65
Tablo 8.2. Bağlı yoğunluk.....	66



SEMBOLLER VE KISALTMALAR

Ag	: Gümüş
Bz	: Bronz
Cu	: Bakır
Cd	: Kadmiyum
Sn	: Kalay
Co	: Kobalt
MPa	: Mega Pascal
gr	: Gram
cm	: Santimetre
°C	: Sıcaklık Birimi
T/M	: Toz Metalurjisi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
XRD	: X-Ray Diffraction
Dev.	: Devir
Dak.	: Dakika
Mpa	: Basınç birimi

1. GİRİŞ

Toz metalurjisi ile imalat işlemleri geleneksel üretim teknolojileriyle kıyaslandığında, talaşlı imalat ihtiyacının gerekmemesi veya çok az gerek duyulması ve karmaşık şekillere sahip parçaların seri olarak tek seferde imal edilebilmesini sağlayan bir üretim metodudur. Çok geniş elementsel bileşim aralığına sahip parçaların, birçok kompozit malzemelerin imalatını mümkün kılar. İstenilen mekanik özelliklere sahip parçaların kolaylıkla üretilip, imal edilen parçadaki malzeme kayıplarının diğer üretim yöntemlerine göre oldukça az olmasından dolayı endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca toz metalurjisi imalat yöntemi yatırım maliyetlerinin düşük olması, kullanılan imalat makinelerinin farklı türde ürün üretebilmeye olanak sağlaması ve yüksek verimliliğe sahip olduğundan dolayı endüstri açısından gittikçe artan bir oranda tercih sebebi olmuştur. Toz metalurjisi ile üretilen ürünlerin büyük bir çoğunluğu otomotiv ve kesici takım gibi birçok endüstri alanında artan bir oran ile kullanılmaktadır. Toz metalurjisi üretim tekniği dünyanın her yerinde olduğu gibi ülkemizde de gün geçtikçe gelişim göstermekte ve tercih edilmektedir.

İmal edilen parçaların endüstriyel alanda güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için, parçaların mekanik özellikleri ve parçanın sahip olduğu diğer özelliklerinin mutlaka bilinmesi gerekir. Malzemelerin mikro yapısındaki özellikler ile birlikte malzemenin sahip olduğu mekanik özellikler toz metalurjisi parametrelerinden doğrudan etkilenmektedir. Bu parametreler; sinterleme sıcaklığı, presleme basıncı,(var ise) süre, sinterleme işlemi sonrası yapılan ısıl işlemler ve ikincil olarak yapılan mekanik işlemlerdir. Fazların sahip olduğu kimyasal yapı, üretilmiş parça içerisinde varlık gösteren gözenek (porozite) miktarı ve gözenek geometrisine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Toz metalurjisinde malzemenin mekanik özellikleri, üretim parametreleri ile rahatlıkla kontrol edilebildiği için endüstri açısından önemli tercih sebeplerindedir. Sinterleme işlemi katı faz ve sıvı faz sinterleme olarak ikiye ayrılmaktadır. Her iki teknikte endüstri kuruluşları tarafından sıklıkla kullanılmaktadır. Katı faz sinterleme işleminde toz partiküllerinin birbirine temas eden noktalarından madde aktarımı (difüzyon) olmaktadır. Boyun oluşumu sağlanmakta ve sinterleme mekanizması gerçekleşmektedir. Sıvı faz varlığında ise yapıdaki porozitelerin sıvı tarafından doldurulması ile toz partikülleri arasında oluşan sıvı faz aracılığıyla madde taşınımı gibi mekanizmalar ile üretilecek olan üründe porozitelerin

dolması ve sıvı fazın partiküller etrafını sarması sayesinde yoğun ve mukavemetli bir yapı elde edilir. Sıvı faz sinterleme işlemi esnasında sıvı faz içerisinde meydana gelen reaksiyonlar neticesinde ürün içerisine katılmış tozların kimyasal reaktifliğine bağlı olarak birçok bileşik oluşabilir. Oluşan bileşiklerin türüne ve miktarına göre yapının kimyasal ve mekanik özellikleri de büyük oranda değişim gösterebilir. Bu nedenle yapılan araştırmalar neticesinde sıvı faz kullanılarak yapılan imalatların toz metalurjisi ile imalat işlemlerinde önemli faydalar sağladığı görülmüştür.

Yapılmış olan bu tez çalışmasında, bronz esaslı bir matris içerisine Co ve Ni eklenerek elde edilen alaşımın sıcak presleme karakteristikleri incelenmiştir. Sıvı faz oluşumu için karışımın içerisine sırası ile %2-4-6 oranında AgCd esaslı alaşım bir toz eklenmiştir. Sinterleme sıcaklığı 650, 700 ve 750 °C' de gerçekleştirilmiştir. Üretilen malzemelerin mekanik, mikroyapı ve kristal yapıları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre AgCd sıvı faz matrisinin sertliği ve yoğunluğu arttırdığı görülmüştür.

2. TOZ METALURJİSİ

2.1.Toz Metalurjisinin Tarihi Gelişimi

T/M' nin geçmişi yaklaşık olarak 5000 yıl öncesine dayanmaktadır. Geçmişte T/M teknolojisi ise silahlar süs eşyaları ve el aletleri gibi yeni parçaların üretimini gerçekleştirmek için kullanılmıştır (Aydın, 1997).

Toz metalurjisi teknolojisi, 19. Yüzyılda ilk defa karışık geometriye sahip parçalar üretilmiş ve sinterleme işlemi uygulanmıştır. 1830 yılında, Osann'ın parayı preslemek ve sinterlemek için geliştirdiği uygulama ile birlikte toz metalurjisinde tarihi bir gelişim gerçekleşmiştir. Osann ilerleyen yıllarda gümüş, kurşun ve bakırı yaptığı çalışmalarında kullanmaya başlamıştır. 1870 yılında Gwynn tarafından toz metal kullanılarak yataklama elemanlarının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Günümüzde bu elemanlar kendinden yağlamalı yataklar olarak isimlendirilmektedir (Mediha, 2007).

1940'lı ve 1950'li yıllarda bakır tozları kullanılarak üretilen kendinden yağlamalı yataklar, en temel toz metalurjisi ürünü olarak toz metalurjisinin doğuşunda yerlerini almışlardır. Toz metalurjisi ile imalat metodunda ki modern gelişmeler I. Dünya Savaşı yıllarında başlamıştır. Gözenekli yapıya sahip olan gereçler ile birlikte mıknatıslar ve yağ emdirilmiş demir esaslı T/M mamül parçalar ilk defa I. Dünya Savaşının devam ettiği yıllarda üretilmiştir. Toz metalurjisinde yaşanan bu ilerleme ile birlikte demir dünya çapında stratejik öneme sahip olmaya başlamıştır. 20. yüzyılın ortalarında toz metalurjisi ürünlerine yönelik yapılan yoğun çalışmaların sonucu olarak, üretim maliyeti düşük olan ve teknik yaşamı destekleyen sinterleme yöntemleri ortaya çıkmıştır (Sarıtış, 1994).

1980'li yılların başından itibaren birçok yeni toz üretim metotları bulunmuştur. Günümüzde bu teknikler kullanılmakta yeni teknikler geliştirilmeye devam etmektedir.

2.2. Toz Metalurjisinin Tanımı Ve Önemi

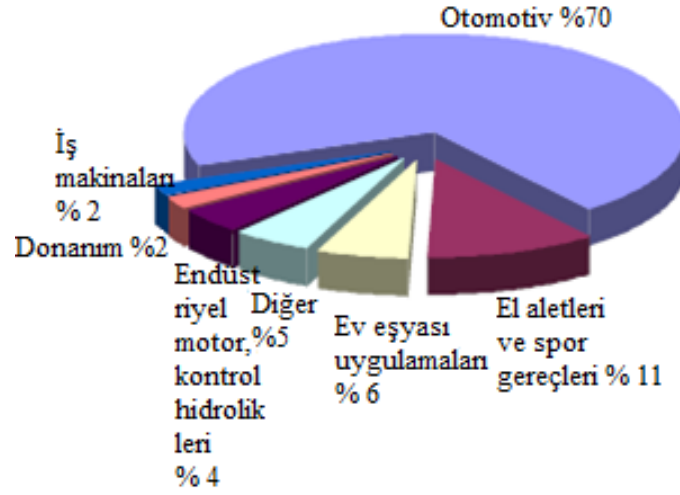
Toz metalurjisi ön şekillendirilmiş metal tozlarının veya metal olmayan seramik tozlarının basınç ile birlikte sıcaklık yardımı ile ergime sıcaklığının altında katı ve daha mukavemetli parçalar haline getirilmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntemde toz halindeki metaller saf, karışım ve alaşım olarak kullanılabilirdiği gibi karbon, seramik ve

plastik gibi metal olmayan malzemelerde yapıya eklenebilir. Karıştırıldıktan sonra sinterleme yönteminin türüne göre basınç altında preslenir ve daha sonra partiküllerin birbirleriyle temas ederek oluşturdukları temas alanları arasında güçlü bir bağ oluşturmak ve hedeflenen özellikleri sağlamak amacıyla, ergime sıcaklığının altında ısıtılarak "sinterleme" olarak bilinen işleme tabi tutulurlar (Yavuz ve Güner, 2002). Eğer toz sadece bir türden oluşmuyorsa yani toz karışım halinde ise, sinterleme işlemi; karışımın içerisinde ki mevcut tozlardan en yüksek ergime sıcaklığına sahip tozun ergime sıcaklık değerinin altındaki bir sıcaklıkta gerçekleştirilir (Anık ve ark., 1999). Presleme işleminin yapıldığı sıcaklık bazen oda sıcaklığı bazen de oda sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklardır. Ancak presleme işlemi, oda koşullarından daha yüksek sıcaklıklara sahip ortamlarda gerçekleştirilmek isteniyorsa bazı sınırlamalar dikkate alınır. Bu sınırlamalar, kalıbı oluşturan malzemenin presleme işlemi sıcaklığındaki mukavemet değerleridir.

T/M ifadesi genellikle metalik malzemeler ile çağrıştırılmaktadır. Fakat T/M tekniği, seramik ve metal olmayan diğer malzemelere de uygulanmaktadır. Kompozit malzemelerde toz metalurjisi tekniğiyle üretilmektedir.

Kaynak, döküm ve talaşlı imalat gibi yöntemlerde üretilmesi oldukça güç olan hatta bazı durumlarda imkansız olan çeşitli geometriye sahip parçalar ve alaşımlar toz metalurjisi tekniği ile rahatlıkla üretilebilmektedir. Geleneksel yöntemler ile yüksek ergime sıcaklığına sahip olan molibden(Wa), tungsten(W), platin(Pt) gibi metallerden parça üretimi pek tercih edilmemektedir. Toz metalurjisi tekniğinin kullanılması sayesinde bu özellikteki parçalar rahatlıkla şekillendirilebilmektedir. Döküm ile imalatta (yolluk ve besleyici gibi) oluşan malzeme kayıpları ve talaşlı imalatta ortaya çıkan işleme kayıpların önüne geçilebilmektedir. Toz metalurjisi tekniği, dökümde ve talaşlı imalatta meydana gelebilecek kayıpların önlenmesi ve işçiliğin az olması bakımından bu yöntemlere göre oldukça ekonomik bir üretim yöntemidir (Yavuz ve Güner, 2002).

Toz metalurjisinin bu gibi avantajlarından dolayı bu yöntem ile imal edilen malzemelerin pazar payları hızlı bir şekilde artmaktadır. Ayrıca toz metalurjisi yöntemi ile üretilen malzemeler birçok farklı imalat sektöründe kullanım alanı bulmaktadır. Şekil 2.1'de toz metalurjisi yöntemi ile üretilen malzemelerin kullanım alanları verilmektedir.



Şekil 2.1. T/M parçaların pazar payları

Toz metalurji teknolojisi, metal tozlarının üretilmesini, üretilen bu tozların karıştırılmasını, daha sonrada kalıpta preslenerek şekillendirilmesini, preslendikten sonra sinterlenmesi ve birtakım sinterleme sonrası gerçekleştirilen işlemleri kapsar. Metalin işlenmesinde kullanılan teknikler içerisinde en farklı olan üretim tekniği metal tozu ve metal tozundan özel matrisler veya kalıplar ile şekillendirilmiş malzemeler imal etme teknolojisidir. Türk Standartları Enstitüsü (TSE) T/M' yi "metalurjinin metalik toz ya da metalik tozların şekillendirilip sinterlenmesiyle ilgili bölümü" olarak ifade etmektedir.

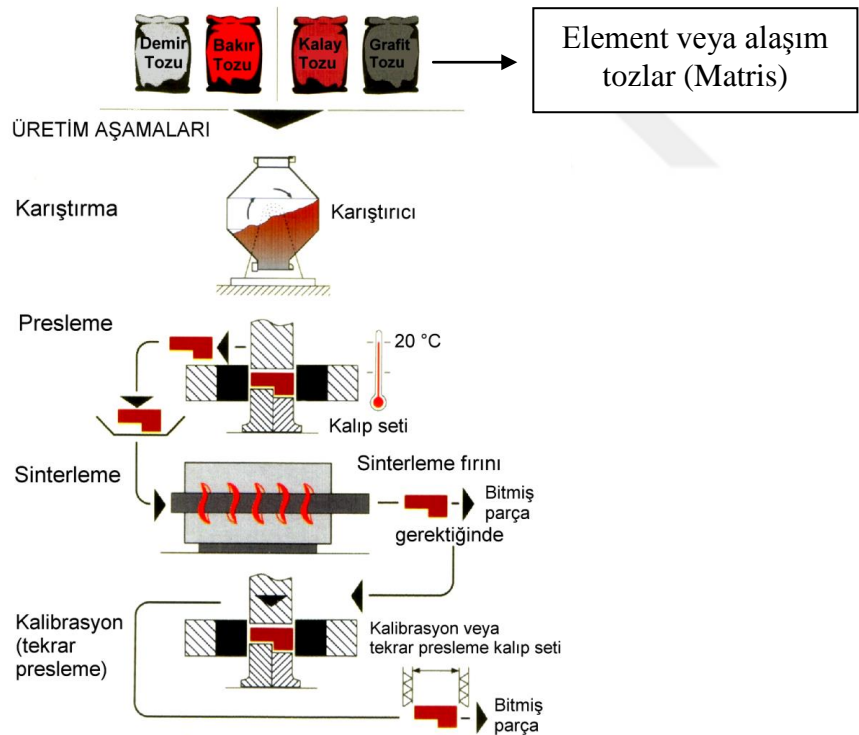
Toz metalurjisi sadece bir imalat yönteminden ibaret değildir. Aynı zamanda önemli bir malzeme ve yan mamul üretim yöntemidir. Periyodik cetvelde var olan elementlerden 86 tane metal elementi vardır. Bu metallere yaklaşık 8.000 kadar alaşım üretilmektedir. Ancak bu 86 elementten ikili, üçlü, dörtlü ve çoklu kombinasyonlar ile kurumsal olarak $7,7 \times 10^{25}$ tür malzeme üretmek mümkündür (Yılmaz, 1999).

Bu bilgiler ışığında T/M tekniği gelecekte stratejik ve teknolojik öneme sahip birçok ürünün hayatımıza girmesine katkı sağlayacaktır.

2.3. Toz Metalurjisi İle İmalatın Temel Basamakları

Geleneksel toz metalurjisi ile imalat yöntemindeki genel işlem basamakları Şekil 2.2' de ki akış şemasında gösterilmiştir. Öncelikle malzemeyi meydana getirecek olan partiküller üretilir. Üretim gerçekleştirildikten sonra bu partiküller karışımın içerisine

bırakılan yağlayıcı maddeler ile birbirleriyle homojen bir karışım oluşturuluncaya dek karıştırılır. Daha sonra oluşturulan bu homojen karışım kalıbın içerisindeki kalıp boşluğuna doldurulur ve kontrollü bir basınç altında sıkıştırılır. Bu sıkıştırma işleminden sonra malzemeye elle tutulabilecek kadar mukavemet kazandırılır. Karışıma uygulanan sıkıştırma işlemini imalat endüstrisinde kullanılan birbirinden farklı birçok metot ile gerçekleştirmek mümkündür. Kullanılan bu metotlar, haddeleme, ekstrüzyon, tek eksenli sıkıştırma, çift eksenli enjeksiyon kalıplama ve izoastik preslemedir. Uygulanan sıkıştırma metodu üretilecek parçanın sahip olduğu geometriye ve üretim miktarına göre seçilir. Sıkıştırma işlemi gerçekleştirildikten ve karışım kalıptaki şeklini aldıktan sonra malzeme sinterlenir. Sinterleme işlemi belirli sıcaklıkta ve koruyucu atmosfer altında yapılır. Sinterleme sıcaklığı, parçayı oluşturan farklı yapıdaki tozlardan ergime sıcaklığı en yüksek olan malzemenin ergime sıcaklığı ile ergime sıcaklığı en düşük olan malzemenin ergime sıcaklık değeri arasında seçilir (Kurgan, 2005).



Şekil 2.2. T/M parça üretimi kademeleri

Tozların presleme işlemine tabi tutulmadan önce yapılması gereken işlemler arasında; preslenecek tozların boyut analizinin yapılması, tozların akıcılık ve gerçek

yoğunluklarının hesaplanması, toz yüzeyinde oluşan oksitlerin yok edilmesi ve yağlayıcı gibi katkıları eklenerek tozun karıştırılması olduğu söylenebilir.

2.3.1 Tozların Üretimi

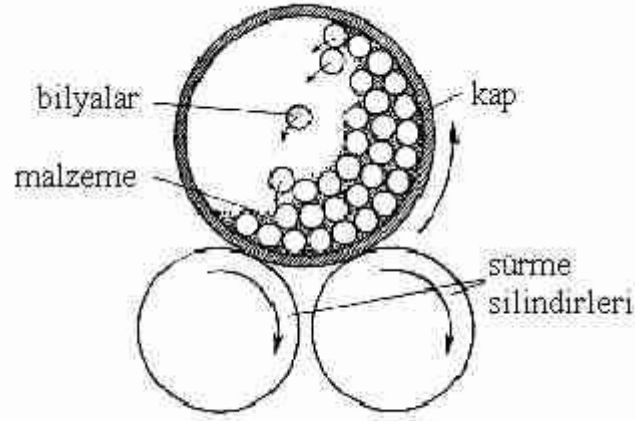
T/M' de kullanılan malzemeler, elementsel veya alaşım tozların karışımlarından ibarettir. Bu tozların oluşturulmasında kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Metal toz partiküllerinin üretiminde kullanılan yöntemin türü, üretim sonucunda oluşan toz partiküllerinin karakteristik özelliklerinin belirlenmesinde çok önemli bir rol oynar. Bu nedenden dolayı tozların karakteristik özelliklerinden söz ederken üretim tekniklerine değinilir. Tozların üretim yönteminin türüne göre üretilen tozun boyutu, şekli, mikroyapısı, kimyasal özellikleri arasında kesin bir ilişki bulunmaktadır. Bu durum ayrıca sinterleme işlemi sonrasında ürünün mekanik özelliklerini büyük oranda etkiler (Onur, 1996).

İmal edilen tozun boyutu, şekli ve yüzey yapısı üretiminde kullanılan metal veya alaşımın üretiminde hangi parametrelerin kontrol edildiğini yansıtır. Ayrıca toz boyutu; toz metalurjisinde son kullanıcı için önemli bir özelliktir (Lawley, 1992)

Toz üretiminde genel olarak mekanik, kimyasal, elektroliz ve atomizasyon ile toz üretim metotları tercih edilmektedir. Tüm toz metotları kullanılmasının yanı sıra endüstri alanının kullanılan metal tozlarının yaklaşık olarak yüzde % 60'dan fazlası atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir.

2.3.1.1. Mekanik Toz Üretim Yöntemi

Mekanik toz üretim yönteminde, katı halde bulunan malzemeye çeşitli teknikler ile öğütme işlemi uygulanarak toz elde edilir. Mekanik olarak toz üretilmesini sağlayan öğütme işlemi kırıcı, girdaplı, taraklı ve bilyeli değirmenlerle gerçekleştirilmektedir. Öğütme işlemi genellikle bilyeli silindirik değirmenler kullanılarak yapılmaktadır. Ayrıca bu değirmenlerin içerisinde büyük çaplı bilyeler bulunmaktadır. Bu bilyeler oldukça sert ve aşınmaya karşı dirençlidirler (German, 2005).



Şekil 2.3. Bilyeli değirmen (German, 2005).

Öğütme işleminin gerçekleştirildiği değirmenlerin içerisine bırakılacak malzemelerin miktarı, öğütücü içerisinde bulunan bilyalar dâhil değirmenin tüm hacminin yarısından fazla olmamalıdır. Öğütücü değirmen malzemeleri, dönerek ve aynı zamanda titreştirerek malzemeyle bilyaların çarpışmaları sonucu, parçalanmasına neden olan bilyalar arasında darbe, burulma, oğuşturma ve sıkıştırma gibi etkilerden biri ya da bazıları birlikte uygulanarak parçalara ayırır. Öğütme işleminin devamında öğütülen malzeme küçük partiküllü toz tanecikleri şekline gelir (German, 2005).

2.3.1.2. Kimyasal Yöntem İle Toz Üretimi

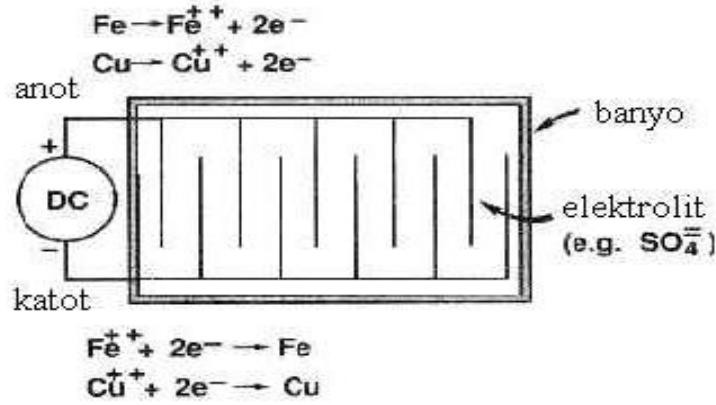
Bu toz üretim metodu özellikle demir tozlarının elde edilmesi için çok sık bir şekilde kullanılmaktadır. Kimyasal yöntem ile toz üretiminde, seçilen malzemeler önce öğütülüp kok ile karıştırılır daha sonra karışım indirgemenin olduğu sürekli fırınlardan geçirilirler ve sonuç olarak kek şeklinde oluşan sünger demir meydana gelir. Oluşan bu sünger demir daha sonra öğütme işlemine tabi tutulur bu öğütme işleminde metalik olmayan malzemeler ayrılır ve atılır. Düzensiz süngerimsi tanecikler yumuşaktır bu nedenle kolay bir şekilde preslenebilirler bu sayede de ham mukavemeti yeterli olan ürünlerin imalatı yapılabilir (Kurt, 2004).

Ayrıca toz üretimi katı, sıvı ya da buhar fazın tepkimeleri sayesinde sağlanmaktadır. Kimyasal toz üretim yöntemi ile üretilen toz partiküllerinin boyutları genellikle 5–10 µm ile 100–500 µm arasında değişkenlik göstermektedir. Kimyasal toz üretim yöntemi bazı avantajlara sahiptir. Bu avantajlardan bazıları;

- Redüktif olarak kullanımı tercih edilen karbonun ucuz olması ve dolayısıyla maliyeti düşürmesi,
- Yüzeylerinde gerçekleşen oksitlerin tespitinin kolay olması,
- Gözenekli yapıya sahip toz üretilebilmesi,
- Metal ve oksitlerin boyut kontrolünün yapılabilir olmasıdır.
- Oldukça küçük mikron boyuttaki tozlar imal edilebilir.

2.3.1.3. Elektroliz Yöntem İle Toz Üretimi

Genel olarak preslenme kabiliyeti ve sinterlenebilme kabiliyeti iyi olan yüksek saflıktaki metal tozlarının üretiminde kullanılan bir metottur. Elektroliz yöntemi ile üretilen tozlar % 99.99 ve üzerinde saflıktadır (Pavlovic ve ark., 2001).



Şekil 2.4. Elektroliz ile toz üretim şeması (German, 2005).

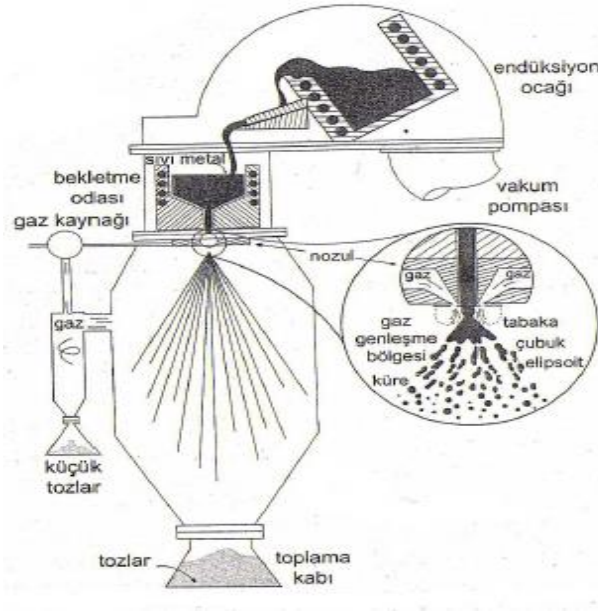
Elektroliz ile toz üretim yönteminde tozu üretilecek malzeme anot olarak, elektrolitik banyo içerisine konumlandırılır. Gerilim uygulandığında anot elektrolitik banyo içerisinde çözünür ve katot üzerinde toplanır. Daha sonra katot alınır ve temizlenir. Katot üzerindeki tozlar sıyrılarak alınır. Öğütülerek ince toz haline getirilir. Tozlar indirgeyici bir atmosfer altında tavlansak oksitten arındırılır ve bu işlem sayesinde tanelerin daha iyi sıkıştırılabilmesi sağlanır. Bu durum bazen sinterleme performansını da etkiler. Elektrolitik yöntemle elde edilen toz, dentritik, süngerimsi ve gözenekli bir yapıda olabilir (Hiçyılmaz, 1999).

Ancak elektroliz yöntemi ile toz üretimi diğer toz üretim yöntemlerinden daha pahalı olmasından dolayı pek tercih edilen toz üretim yöntemi değildir. Fakat günümüzde bu şekilde imalat yapan üreticiler bulunmaktadır.

2.3.1.4. Atomizasyon Yöntemleri İle Toz Üretimi

Atomizasyon ile toz üretim tekniğinde, sıvı haldeki ergimiş metalin bir katı yüzeye çarpmadan daha önce gaz ya da soğutucu akışkan ile ergimiş metal damlacıklarının oluşturularak bu küçük damlacıkların çabucak katılaşması prensibine göre toz üretilir. Bu yöntemde temel mantık ergiyerek sıvı hale gelen metali gaz ya da sıvı çarpmasına maruz bırakarak sıvı haldeki metali mevcut boyutundan daha küçük boyutlara getirmektir (Hatman, 1993).

Atomizasyon ile toz üretim tekniğinde yaygın olarak kullanılan gazlar; hava, azot ve argon gazlarıdır. En yaygın olarak kullanılan akışkan ise sudur. Şekil 2.5'te atomizasyon ile toz hazırlama ünitesi gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Atomizasyon ile toz hazırlama ünitesi

Nozulun tasarımını ve geometrisini, atomize eden akışkan sıvının basıncını ve akışkan hacmini, sıvı metalin akış çapı ve akış miktarı gibi parametrelerin değiştirilmesi ile tozların boyutunun kontrol edilmesi yolu ile farklı boyutlarda toz üretmek mümkündür.

Atomize tozun en önemli özelliği; ortalama toz boyut dağılımı, toz şekli, kimyasal bileşimi ve mikro yapının uygunluğu olarak belirtilebilir. Bu temel toz özellikleri; tozun görünen yoğunluk, akabilirlik ve sinterlenebilme gibi teknolojik özelliklerini etkiler.

Katılma hızı ile tanecik şekli ve boyutuna göre belirlenir. Atomizasyon toz üretim tekniği genellikle ergitilebilen tüm malzemelerden toz üretmek için uygulanabilmektedir.

Atomizasyon toz üretim tekniği ticari olarak demir ve bakırda kullanıldığı gibi bronz, alüminyum(Al), kalay(Sn), kurşun(Pb), takım çelikleri, alaşımli çelikler, pirinç, çinko ve kadmiyum tozlarının da elde edilmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

2.3.2. Toz Karışımının Hazırlanması

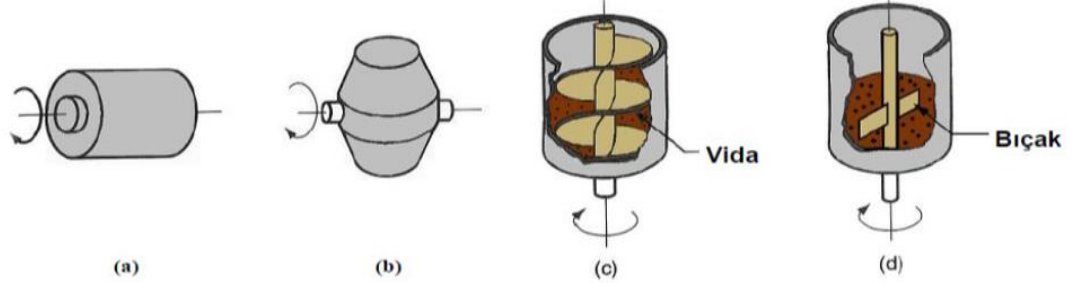
Malzemeler preslenmeden önce bir takım işlemlerden geçer. Bu işlemlerden biride toz karıştırma prosesidir. Hazırlanan toz karışımı içerisinde belirli miktarlarda yağlayıcı maddeler ilave edilir. Bu yağlayıcı maddeler sinterlemenin ilk aşamalarında parçadan buharlaşarak uzaklaşır. Bu işlem ile yapıdaki segregasyonlar engellenerek homojen bir toz-yağlayıcı karışımını elde etmek mümkün olur. Toz karıştırma işlemi ile hedeflenen amaç farklı boyutlarda ve özgül ağırlığı olan toz taneciklerinin karışım içerisinde homojen olarak dağılmasını sağlamaktadır. İnce taneli tozlar kaba taneli tozlar arasında bulunan boşlukları doldurarak yoğunluk farkını minimuma indirir (Fatih, 2011).

Toz karışımları hazırlanırken içerisinde belli oranlarda yağlayıcı maddeler ilave edilir. Yağlayıcı miktarları genellikle %0,5 – 3 arası oranlarda değişmektedir. En yaygın olarak kullanılan yağlayıcılar; metal stearatlar, parafin, sterik asit, polipropilen, polietilen glikol (PEG), çinko ve lityum sterat ve akravaks, politetrafloroetilen (PTFE) gibi sentetik mumlardır (Zhang, 2012).

Sıvı yağlayıcılar tozun akma özelliğini bozduğu için karışıma ilave edilen yağlayıcılar genellikle kuru toz şeklindedir (Anık, 1999). Fakat ürünün sinterleme işlemi öncesi çalışma performansının geliştirilmesi ve çalışma kolaylığı için sıvı yağlayıcılar kullanılmaktadır (Çelik, 2009).

Yağlayıcıların kullanılmadığı durumda toz karışımıyla rijit kalıp yüzeyi arasında oluşan sürtünmeden dolayı basıncın dağılımındaki homojensizlikte artış gözlemlenir ve bu nedenle preslenen kompakt yapıdaki gerilmelerde değişiklikler meydana gelir. Kompakt yapıda meydana gelen gerilmedeki farklılıklar ise sinterleme işlemi sırasında distorsiyonlara neden olur ve malzemeyi kalıptan çıkarmak güçleşir. Toz karışıma ilave edilen yağlayıcı miktarını arttırdıkça parçayı kalıptan kurtarmak için gereken kuvvet azalacaktır. Ayrıca kullanılan şekillendirme kalıbının da ömrü artacaktır. Yağlayıcı madde fazla miktarlarda kullanılır ise sinterlemenin gerçekleştiği sırada malzeme yüzeylerinde kabarcıklar hatta kırılmalar meydana gelir. Oluşan bu kabarcıklara bağlı olarak da yüzey kalitesinde bozulma olur. Ayrıca yüksek yağlayıcı miktarı sinterleme işleminde yapı

içerisinde kalarak inklüzyonlara neden olur. Bu durum ürünün mekanik özelliklerinde düşüğe neden olur. Şekil 2.6’da karıştırma işleminin yapıldığı makineler gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Karıştırma makineleri: (a) Dönen tambur (b) Dönen çift kol (c) Vidalı mikser (d) Bıçaklı mikser (e) Açılı mikser

Toz karıştırma işlemi çeşitli mekanizmalar ile gerçekleştirilmektedir bu mekanizmalar; yayınma, konveksiyon ve kesmeden oluşur. Yayınmayla yapılan karıştırma işlemi döner silindir içerisinde, konveksiyonla yapılan karıştırma işlemi vidalı karıştırıcı içerisinde ve kesmeyle yapılan karıştırma işlemi ise bıçaklı karıştırıcılarda yapılmaktadır.

Karıştırmanın esas amacı taşıma esnasında titreşimler ile oluşabilecek ayrışmanın engellenmesidir (Sarıtaş, Türker ve Durlu, 2007).

2.3.3 Tozların Preslenmesi

Tozların basınçla deforme edilerek toz tanecikleri arasında bağ oluşturulmasına toz presleme işlemi denilmektedir. Toz karışımındaki birincil yoğunlaşma işlemi, basıncın yüksek değerlere ulaşması ve toz parçacıkların preslenmesi ile elde edilmektedir. Tozlar preslendikten sonra üretilen kalıp şekilli parçanın en az kendi ağırlığını taşıyabilecek kadar bir yoğunluğa sahip olması gerekir. Ancak parçadan istenilen asıl yoğunluk sinterleme işleminin gerçekleşmesinden sonrası elde edilir (German, 2007).

Tozlar basınç altında tutulduklarında öncelikle toz parçacıklar birbirleri üzerinde kayarlar ve daha sonra parçacıklar yüksek basınçlarda plastik deformasyonla şekil değiştirmeye uğrayarak yoğunlaşırlar. Sıkıştırma işlemine başlarken sıkıştırmanın ilk sürecinde yoğunluk artışı hızlı bir şekilde gerçekleşir.

Toz partikülleri sıkıştırma işlemi sırasında öncelikle uygulanan basınç kuvveti yönünde hareketi gerçekleştirirler. Tozlar sıvılar gibi akma davranışı sergilemezler bu

nedenle kalıp yüzeyi ile toz parçacıkları arasında meydana gelen sürtünme neticesinde tepki kuvveti oluşur. Oluşan bu (Tepkisel) kuvvet uygulanan kuvvete denk bir değere ulaşıncaya kadar sıkışma eksenel yönde devam eder. Daha sonrasında ise parçacıkların hareketi yatay yönde devam eder. Sıkıştırma işleminde iki adet mekanizma vardır. Bunlar;

Eksenel sıkıştırma: Sert bir metal kalıp içerisinde bulunan tozların tek eksenli olarak basınç kuvvetiyle sıkıştırılması işlemidir. Eğer basınç tek bir zımbadan uygulanırsa tek etkili sıkıştırma işlemi olarak tanımlanır eğer basınç alt ve üst zımbalar olmak üzere her iki zımbada aynı anda uygulanır ise çift etkili sıkıştırma olarak adlandırılır.

İzostatik sıkıştırma: Bu sıkıştırma yöntemi genellikle karmaşık geometriye sahip parçalar ile boy- çap oranının büyük olduğu parçalarda kullanılmaktadır. Gaz ya da sıvı basıncı parçanın her yerine aynı miktarda kuvvet etki etmektedir (Ünlü ve Çavuşoğlu, 1995).

2.3.4. Tozların Sinterlenmesi

Malzemelerin kontrollü bir atmosfer altında ana bileşenin ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta tutulması işlemidir. Bu sıcaklıkta tutulan toz tanecikleri arasında oluşan bağın yanı sıra bu bağlanma ile birlikte yeniden kristalleşme ve aynı zamanda parçacıklarda tane irileşmesi de görülmektedir. Sinterlemede kullanılan koruyucu atmosfer parçada oluşan yüzey oksitlerinden kurtulmayı sağlar aynı zamanda parça ile çevre arasındaki istenmeyen reaksiyonların meydana gelmesini engeller. Bu sayede parçanın mukavemeti önemli ölçüde artar(James, 1985). Sinterleme işlemine tabi tutulan malzemenin ürün özellikleri; sinterleme sıcaklığına çıkış hızı, sinterleme sıcaklığında kalma süresi ve soğuma hızı gibi faktörlerle doğrudan ilişkilidir (Stosuy, 1993; Crawson, 1993).

Sinterleme işlemini başka bir ifade ile açıklamak gerekirse daha önce preste sıkıştırma işlemine tabi tutularak şekillendirilen gözenekli bir yapı şeklinde üretilen ham parçadan, gözeneklerin büyük bir oranda giderildiği daha az gözenekli yapıya sahip bir parça üretmek için uygulanan ısı işlem olduğu söylenebilir. Sinterleme işlemi ile presleme sırasında şekillenen birbirleriyle temas halinde olan toz partiküllerinin yüksek sıcaklıklarda difüzyon yolu ile birbirlerine bağlanmasını sağlar. Yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen bu bağlanma, ergime sıcaklığının altında katı halde atom hareketleriyle meydana gelebildiği gibi bazı durumlarda sıvı faz oluşumu ile de meydana

gelebilir. Ayrıca bu bağlanma, temas eden parçacıklar arasında boyun oluşumunun gerçekleşmesi ile oluşur (Okuyama, 2007).

Sinterlemenin oluşmasını sağlayan en etkin mekanizma sistemin iç enerjisinde meydana gelen azalmadır. İç enerjide ki bu azalmayı tetikleyen faktörler ise; parçacıkların birbirleriyle olan temas alanlarının büyümesinden dolayı yüzey alanının azalması, porozite miktarındaki azalma yada porozitelerin küreselleşmesi, çok bileşenli sistemlerde katı fazın sıvı faz içerisindeki çözünmesi ile oluşan konsantrasyon farklılığının giderilmesi gibi faktörlerdir (Gülsoy, 1999).

Sinterleme işleminin gerçekleşmesi ile birlikte malzemenin morfolojisinde bazı değişimler meydana gelir. Bu değişimler; seramiklerde mukavemet, ısıl iletkenlik, yoğunluk, saydamlık ve yarı saydamlığın artışı şeklinde olur. Polimerde yoğunluk ve mukavemet artışı, metal malzemelerde ise iletkenlik, mukavemet ve sünekliğin artışı şeklinde olur (Aydın, 1997). Aynı zamanda sinterleme işlemi ile birlikte boşluk morfolojisinde de değişimler meydana gelir (Boz, 2003).

Sinterleme işlemi ikiye ayrılır. Bunlar; Katı faz sinterlemesi ve sıvı faz sinterlemesidir. Katı faz sinterleme işlemi, tozların sıkıştırıldıktan sonra sinterleşme sıcaklığında tamamen katı faz içinde yoğunlaşması olarak ifade edilebilir. Sıvı faz sinterleme işlemi ise, şekillendirilmiş tozun içerisinde en az bir malzemenin sinterleme işlemi esnasında sıvı hale geçmesi ile meydana gelen yoğunlaşma olarak tanımlanabilir.

2.3.4.1. Katı Hal Sinterleme

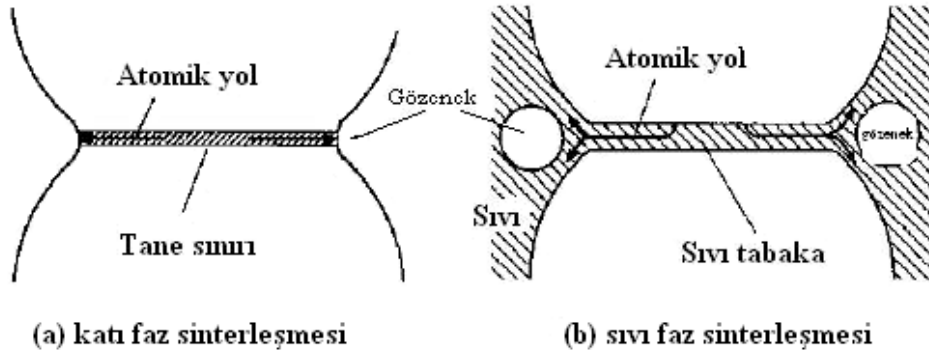
Elementel, karışım ve alaşım tozdan oluşan toz kümesinin sinterlenmesinin de bu yöntem kullanılmaktadır. Tek fazlı partiküllerden meydana gelen kompaktların sinterlenmesi esnasında mikroyapıda görülen değişimler, parçanın boyutu ile birlikte fiziksel ve mekanik özelliklerinde de değişimlere neden olmaktadır. Sinterleme işleminin gerçekleşmesi için gerekli itici güç sistemde var olan serbest enerjinin azaltılmasıdır. Sinterleme için seçilen sıcaklıklarda mikroyapıda birçok değişiklik meydana gelmektedir. Bu değişiklikler birbirlerini takip eden aşamalar halinde meydana gelse de bu aşamalar genellikle iç içe geçmişlerdir. Yapı içerisinde bulunan hiçbir eleman sıvı faza geçmez (Ünlü, 2014).

2.3.4.2. Sıvı Faz Sinterleme

Sıvı faz sinterleme işlemi; birden fazla bileşenden oluşan bir yapıda ön şekillendirme işleminden geçmiş toz karışımı bileşenlerinin en az bir ya da birden fazlasının ergime sıcaklığının üzerinde ki bir sıcaklıkta sıvı fazın oluşmasıyla sinterlenmesi olayıdır.

Sıvı faz sinterleme işlemi sırasında, oluşan sıvı faz ile katı bir toz kümesi birlikte bulunmaktadır. Sıvı faz sinterleme işleminde genellikle tanecikler arasında bağ oluşumu artış göstermekte ve bu artış da sinterleme hızına artırıcı etki yapmaktadır (Özgür, 2007).

Sıvı faz sinterleme, kılcal çekim kuvvetleri oluşturur. Bu çekim kuvvetleri sayesinde partiküller aynı kutuplu mıknatıslar gibi birbirlerini çekerler. Herhangi bir basınç uygulanmadan yapıda hızlı bir yoğunlaşma meydana gelir. Şekil 2.7’ de bu durum gösterilmiştir. Meydana gelen bu sıvı faz, tanecikler arasındaki sürtünmeyi azaltır dolayısıyla sürtünmenin azalması sayesinde toz partiküllerinin yerleşme hızı artar. Sinterleme işlemi esnasında oluşan gözeneklerin yapısında ve parçanın özelliklerinde; parçacıklar arası bağlanmaya, süneklığe, manyetik geçirgenliğe, mukavemete, iletkenliğe korozyon direncine ve benzeri parça özelliklerinde önemli değişikliklere neden olur.



Şekil 2.7. Katı faz sinterleme ile sıvı faz sinterleme arasındaki farkın gösterimi (Rahaman, 2003).

Sıvı faz sinterlemesi için temel gereksinim ıslatma kabiliyetidir. Katı taneler oluşacak sıvı faz ile ıslatılabilirdir. Islatan bir sıvı, katı yüzeyi ile küçük temas açısına sahip bu temas açısı yüzey enerjilerinin dengesi olarak ifade edilmektedir. Islatan bir sıvı filmi yoğunlaşmaya yardımcı olan ve kılcal kuvvet olarak tanımlanan yüzey gerilmesi

sağlar. Genellikle ıslatma katının sıvı içinde çözüldüğü durumlarda gerçekleşir ve ayrıca bu çözünürlük katının sıvı içinden yayınabilmesini sağlar (Rahaman, 2003).



3. SIVI FAZ SİNERLEME

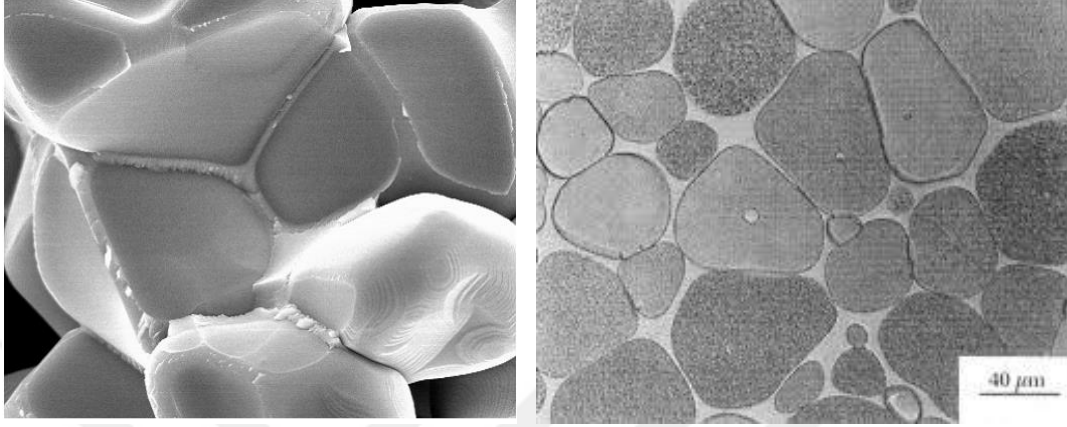
Sıvı faz sinterleme; işlemi en az iki veya daha fazla tozdan meydana gelen ön şekillendirilmiş tozun bileşenlerinden birinin ya da birkaçının ergime noktasının üzerinde ki bir sıcaklık noktasında sıvı fazın oluşmasıyla yoğunlaştırma işlemidir. Sıvı faz sinterleme işleminin yapılmasında üç esas amaç söz konusudur. Bunlar; yoğunlaşma hızını arttırmak, partiküller arası bağlanma hızını arttırmak ve özellikli tane sınırına sahip ürünler üretmektir. Sinterleme işleminden sonra başlayan soğuma esnasında oluşan katı fazlar ve sıvı fazın dağılımı sinterlenmiş malzemenin istenilen özelliklere ve yoğunluğa ulaşabilmesi için büyük bir önem teşkil eder.

Ön şekillendirilmiş toz karışımı mutlak ergime sıcaklıklarının yarısı üzerindeki sıcaklıklara kadar ısıtıldıklarında, toz taneleri arasında sıkı bir bağ meydana gelir. Sinterleme yöntemlerinin hepsinde olduğu gibi sıvı faz sinterlemede de tane yüzey alanında meydana gelen azalma ve bu azalmayı takiben parça mukavemeti artar. Bu mukavemet artışı sinterleme sıcaklığındaki atomik hareketlerin sebep olduğu parçacıklar arası difüzyon bağlarının oluşumu ile meydana gelmektedir. Sıvı fazın oluşturduğu kılcal çekim kuvvetleri partikülleri birbirlerine doğru çeker ve dışarıdan bir basınç olmaksızın hızlı bir yoğunlaşma meydana getirir. Ayrıca sıvı faz katı parçacıklar arasındaki sürtünmeyi azaltarak yapının yeniden düzenlenmesini hızlandırır. Sıvı faz oluşumu sinterleme hızını ciddi oranda arttırmaktadır. Toz partiküllerini birbirine bağlayan ve yapı içinde hızlı yayılımının olduğu lehimleme işlemi gibi hareket eder (Erdoğan, 2011).

Sıvı faz sinterleme işleminin gerçekleşmesi için ıslatma temel gereksinimdir. Islatan bir sıvı filimi yoğunlaşmaya yardımcı olan ve kılcal kuvvet olarak tanımlanan yüzey gerilmesini oluşturur. Genellikle bu ıslatma olayı katının sıvı içinde çözüldüğü durumlarda meydana gelmektedir. Sıvı fazın oluşmasıyla birlikte oluşan kılcal çekim kuvvetleri, toz partiküllerin birbirlerini çekmelerini sağlar ve herhangi bir basınç olmadan yapıda yoğunlaşma meydana gelir. Sıvı faz oluşumu parçacıklarda oluşan gözeneklerin yapısında ve ürün özelliklerinde olumlu bir şekilde değişikliklere neden olur (Ünlü, 2014).

Sıvı faz sinterleme işleminde; sinterleme işleminin başlangıcında toz karışımının içerdiği elementlerden biri veya bir kaç sıvı halde bulunmaktadır. Sıvı faz, bileşimin içerisinde daha az miktarlarda bulunan elementin erimesiyle oluşur. Ancak sinterlenen toz, ötektik olmayan alaşım tozu ise solidüs sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta

ısıtıldığında içyapıda sıvı faz meydana gelir. Şekil 3.1’ de sıvı fazın olduğu iki örnek gösterilmiştir. Ön şekillendirilmiş malzemenin şeklini koruması için sıvı fazın hacimsel olarak %40 oranını aşmaması gerekmektedir (Yılmaz, 1999).



Şekil 3.1. Sıvı fazın gerçekleştiği örnekler

Sıvı faz sinterleme işlemiyle imalatı yapılan parçaların, mekanik özelliklerinde oluşabilecek düşüş telafi edilebilecek seviyede ise sıvı fazı oluşturan katkılar ile ürünün sinterlenmesi esnasında yoğunlaşma hızı yükseltilebilir. Sinterlenen malzemenin türüne göre sıvı faz sinterleme işleminin en önemli dezavantajı soğuma sonrası tanecikler arasında oluşan intermetalik bir fazın meydana gelme olasılığıdır. Tanecikler arasında oluşan bu faz yüksek sıcaklıklarda malzemenin mekanik özelliklerinin azalmasına neden olmaktadır. Birçok sistemde aktifleşmiş sinterleme işlemi ve sıvı faz sinterleme işlemi arasında çok belirgin bir fark bulunmamaktadır. Fakat katkı maddeleri aktifleşmiş sistemlerde çok az oranlarda kullanılır. Ayrıca sıvı tane sınır bölgesinin varlığının tespit edilmesi oldukça güçtür. Eğer sıvı faz sistemde yeteri kadar (% 25–30) var olursa sıvı akışının yardımıyla şekillendirilmiş malzeme yeniden düzenlenerek tam yoğunlukta ürün elde edilmesi sağlanabilir.

Sinterleme işlemi sırasında sıvı fazın oluşması için farklı kimyasal yapılara sahip tozlar kullanılmaktadır. Sıvı fazı oluşturabilmek için kullanılan diğer bir yöntemde, ön alaşımlandırılmış bir metal tozunu sıvılaştırma ve katılaşma eğrileri arasındaki bir sıcaklık değerine kadar ısıtmaktır.

Sinterleme işleminde düşük yoğunluklarda tane büyümesi pek mümkün değildir. Sinterleme işleminde tane büyümesi çoğunlukla temas halindeki partiküllerin arasındaki boşlukların tamamının kaybolması ve tane irileşmesi ile birlikte gerçekleşmektedir

(Erdoğan, 2011). Sıvı faz sinterleme işleminde bu aşamaya gelinmeden önce yardımcı sinterleme katkı elemanları (yağlayıcı vb.) ya da toz üretim proseslerinden gelen safsızlıklar tane irileşmesini engeller (Erol, 2009; Ersümer, 1970).

3.1. Sıvı Faz Sinterleme İşleminin Temel Özellikleri

3.1.1. Yoğunluk Artışı

Sıvı faz sinterleme ile katı faz sinterleme işlemi kıyaslama yapıldığında, sıvı faz iki şekilde yoğunluğun artmasına neden olur;

- 1) Katı parçacıkların yeniden düzenlenmesi ile
- 2) Sıvıya doğru madde taşınımı ile

Sıvı faz sinterleme işleminde meydana gelen sıvı fazın karışımında katı halde bulunan tanecikleri ıslattığı ve bu tanecikleri tamamen çevrelediği ayrıca taneciklerin birbirlerinden bir sıvı köprüsü vasıtasıyla ayrıldığı kabul edilir. Sıvı fazın oluşması ile birlikte tanecikler arası sürtünme azalacak ve bu fazın neden olduğu basınç altındaki tanelerin yeniden düzenlenmesi daha kolay hale gelecektir. Örnek verilecek olursa; tane sınırı atom taşınımı mekanizması ile meydana gelecek olan katı faz sinterleme işleminde atomların yayılım hızını kontrol eden önemli parametre, tane sınırı difüzyon katsayısı ile tane sınırı kalınlığının çarpımıdır. Ancak sıvı faz sinterleme işlemindeyse göz önünde bulundurulacak parametre, sıvıda çözünen atomların difüzyon katsayısı ile sıvı köprünün kalınlığının çarpımıdır (Rahaman, 2003).

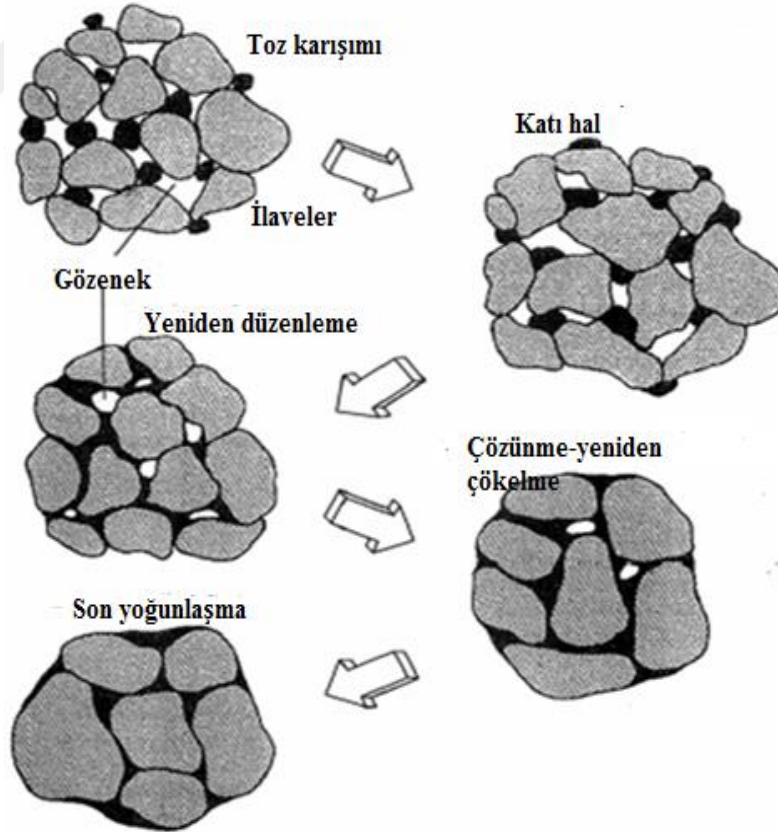
3.1.2. Sıvı Faz Oluşumu

Sıvı faz sinterleme işlemi için oluşturulan bileşim birden fazla tozun karıştırılmasından meydana gelmektedir; bunlar ana bileşen ve katkı maddeleridir. Isıtmanın gerçekleştiği esnada katkı erir ya da ana bileşenin küçük bir bölümüyle tepkime oluşturarak ötektik sıvıyı meydana getirir. Metalik sistemlerde ergimeyle sıvı faz oluşumu oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Örnek verilecek olursa; Fe(Cu) ve W(Ni) karışımları (Cu, Ni katkı bileşenini ifade eder). Ötektik sıvı oluşumu için katkı sıcaklıkları ile sinterleme sıcaklıklarının seçilmesinde kullanılan faz diyagramları büyük bir önem teşkil eder. Birçok sistemde sıvı faz sinterleme işlemi süresince hacim değişimi yeterince büyük

miktarlarda oluşmaz. Bu olay “kalıcı sıvı faz sinterleşmesi” olarak ifade edilir. Soğumanın başlaması ile sıvı faz çoğunlukla camsı fazı meydana getirir oluşacak olan bu faz yüksek sıcaklıklarda malzemenin mekanik özelliklerinin azalmasına sebep olur.

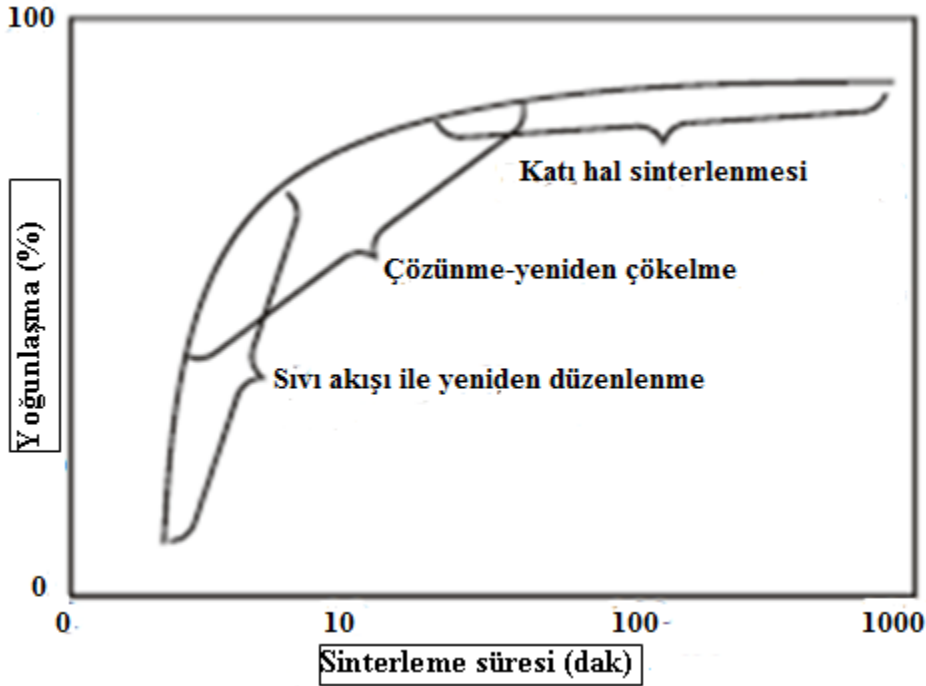
3.2. Sıvı Faz Sinterleme İşleminin Aşamaları

Sıvı faz sinterleme işlemi içerisinde oluşan süreçler birbirini takip eden üç aşama ile açıklanabilir. Şekil 3.2’ de gösterilen bu aşamalar; sıvının dağılımı ve yeniden düzenlenmesi (birinci aşama), çözelti-çökme (ikinci aşama) mikro yapısal büyümedir(üçüncü aşama). Herhangi bir ısıl işleme tabi tutulmamış karışım halindeki yapı sıcaklık artışı ile ısıtmaya başlandığında sıvı faz oluşumu başlamadan bir süre önce çok az miktarlarda da olsa katı faz sinterleşmesi meydana gelir. Toz karışımını meydana getiren elemanların özelliklerine göre bazı sistemlerde büyük oranlarda yoğunlaşma oluşmaktadır. Sıvı faz sinterleme işleminde gerçekleşen aşamalar şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Sıvı faz sinterleme ve bağıntılı mikroyapısal değişimler (Gülsoy, 2003).

Sinterleme işleminin ilk aşamasında toz karışımı alaşım elamanlarından birinin eridiği sıcaklığa kadar ısıtılır. Sıcaklığın artışı ile oluşan sıvı, toz ile birlikte katı parçacıklar üzerinde çok hızlı bir şekilde başlangıç yoğunlaşması meydana getirir. Sistem yüzey enerjisini en düşük duruma indirmeye çalışırken porozitelerin giderilmesi sağlanır. Yeni düzenlenme boyunca mikroyapı kılcal hareketler doğrultusunda viskoz bir katı olarak davranır. Birbirleriyle temas halinde olan parçacıkların arasındaki porozitelerin giderilmesi sinterlenen malzemedeki sıvı fazın viskozitesi ile artar. Sonuç olarak yoğunlaşma hızı sürekli olarak azalır. Sıvı faz sinterleme işleminin üç aşaması ve zamana bağlı olarak değişkenlik gösteren yoğunlaşma değişimi Şekil 3.3'te grafiklendirilmiştir (Kayış, 2005).



Şekil 3.3. Sıvı faz sinterleme işlemi aşmaları (Gülsoy, 2003).

Madde taşınımı, karışımın içerisine katılan toz partiküllerinin tane boyunda farklılıkların olduğu yapılarda, küçük tanelerden büyük tanelere doğru difüzyon ile gerçekleşir ve bu olay “Ostwald Ripening” olarak ifade edilir. Sıvı faz sinterlemenin tüm aşamalarında gerçekleşen tüm bu değişimlerin sonucunda varılacak sonuç tanelerin irileşmesidir.

Sıvı faz sinterleme işleminde gerçekleşen son aşama ise katı parçacıklar tarafından oluşturulan ana yapının yoğunlaşmasının olduğu prosesdir. Bu iskelet yapı katı toz partiküllerinin birbirine bağlanması ile oluşur. Büyüyen yapı içindeki difüzyon mesafesi

ilk aşamaya göre arttığından ötürü sinterleme işlemi ilk aşamalara kıyasla daha yavaş gerçekleşir. Sinterlemenin son aşamasında gerçekleşen tane irileşmesi taneciklerin şekillerinin değişmesi sonucunda meydana gelen tane paketlenmesi ile birlikte gerçekleşir. Tane paketlenmesinin gereğinden çok sağlandığı noktalarda akışkan haldeki sıvı faz tanecikler arasındaki mevcut gözeneklere doğru akıp bu gözenekleri doldurarak yoğunluğun artmasına katkıda bulunur (German, 1996).

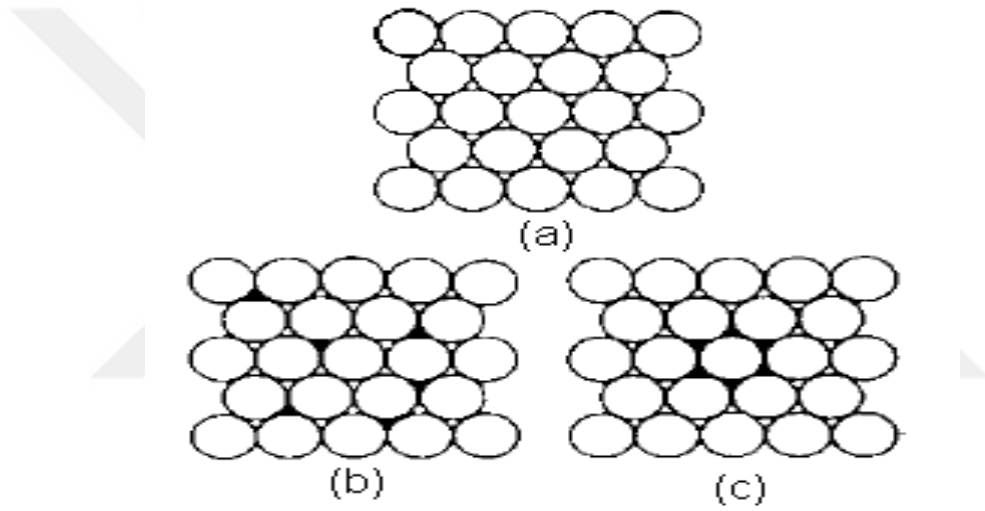
3.2.1. Birinci Aşama (Sıvının Dağılımı Ve Yeniden Düzenlenmesi)

Sinterleme işleminin başlangıcında düşük sıcaklıklarda sıvı viskozitesinin düşük olduğu anda iç gerilimden dolayı basınç meydana gelerek ince tanecikler arasında sinterleme işleminin oluşmasını sağlar. Bu olayın gerçekleşmesi ile parçacıklardaki yeniden düzenlenme hızlı bir şekilde oluşmaktadır. Oluşan basınç, sıvı akışının büyük yapıya sahip porozitelerin küçük yapıli porozitelere doğru gerçekleşmesini sağlayarak sıvının parçacıklar arasında dağılmasını sağlar. Sıvı faz sinterlemede öncelikle akışkan haldeki sıvı küçük gözenekleri daha sonra ise büyük gözenekleri doldurduğu görülmüştür.

Küresel bir geometriye sahip toz partiküllerinin düzenli bir şekilde sıralandığı ve tane küçülmesinin gerçekleşmediği bir sistemde sıvı fazın yapı içerisinde dağılımının iki farklı şekilde gerçekleşmesi mümkündür. Sıvı miktarının yeterince olmadığı koşullarda ise sıvı, taneciklerin birbirleri ile temas halinde olduğu noktalarda oluşan boyun bölgelerinin etrafına dolar. Giderek artıp kritik miktara ulaşıncaya dek sıvı hacmi boyun bölgelerinde toplanmaya devam eder. Sistemdeki her bir gözeneğin sıvı tarafından doldurulması beklenir. Fakat yüzey alanının azaltılması için gözeneklerin sadece bazıları tamamen sıvı ile doldurulur. Artan sıvı ise boyun bölgelerinde izole olur. Sıvı miktarında değişme gerçekleşse dahi boyunlarda biriken sıvı miktarında değişme meydana gelmez. Ancak doldurulan gözenek miktarında değişiklik olabilir. Sıvı başlangıçta homojen olarak dağılmamıştır, sıvı kendiliğinden iki boyutlu sıra şeklinde dağılmaya başlar. Sıvının boyunlara yayıldığı yeterince sıvı içermeyen sistemlerde, sıvının homojen olarak dağılmasını sağlayan bir itici güç bulunur (Shaw, 1986).

Değişik boyutlarda gözenekler barındıran karmaşık yapılarda, sıvı ile doldurulan gözeneklerden ilk olarak küçük boyutlu gözenekler doldurulur. Küçük boyutlu gözeneklerin ilk olarak doldurulmasının nedeni, yüzey/hacim oranı büyük olduğundan sıvı daha çok katı-gaz ara yüzey alanını elimine eder. Küçük boyutlu gözenekler

doldurulduktan sonra eğer halen yeteri kadar sıvı faz bulunursa büyük boyutlu gözenekler doldurulmaya başlanır. Sıvıların gözenekleri tamamen doldurması sıvı süzülmesinin engellenmeye başlaması problemine neden olduğu için küçük yapılı gözeneklere sıvı geçişini durdurur. Eğer sıvının gözeneklere dolması büyük gözeneklerden başlar ise bu seferde gözeneklerden bazıları dolmaz ve boş kalır. Heterojen bir sıvı faz dağılımı istenmiyorsa, karışım homojen olarak hazırlanmalıdır. Sıvı fazın dağılım durumları şekil 3.4'te gösterilmiştir. Bu gözeneklerin ardışık olarak dolmasında, sinterleme işleminin gerçekleştiği esnada büyük gözenekler daha geç sıvı ile dolar. Bu durumda sıvı bileşence zengin bölgeler oluşumunun sebebidir.

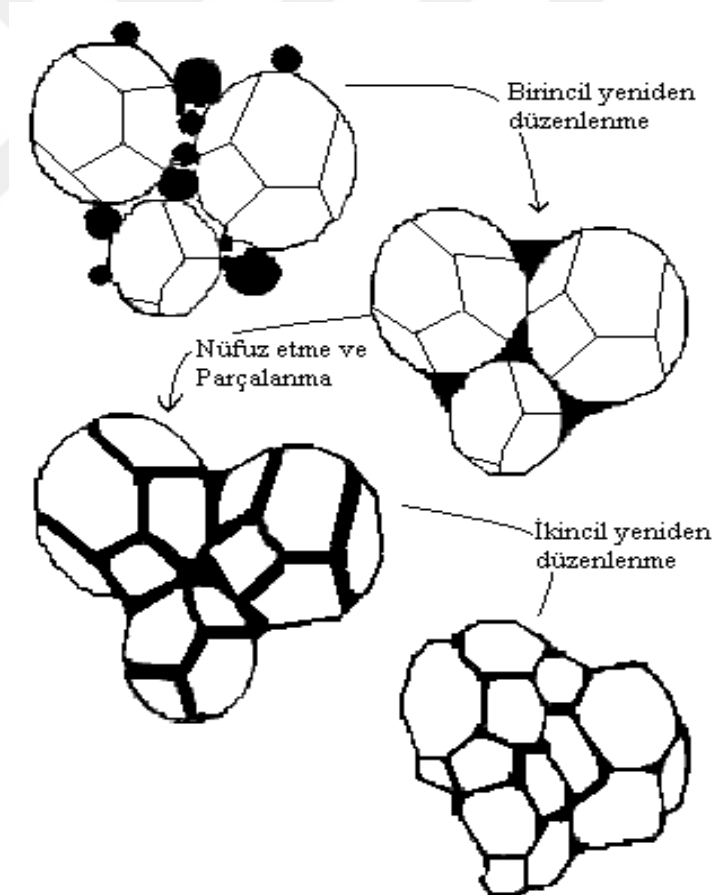


Şekil 3.4. a) Sıvının izole boyun bölgelerine dağılması, b) Sıvının gözeneklere homojen olarak dağılması, c) Heterojen olan sıvı dağılımı (Shaw, 1986).

Sıvı faz sinterleme işlemi esnasında homojen olmayan bir sıvı dağılımı gerçekleşmiş ise bu durum sıvının gözeneklere yeniden dağılımının gerçekleşmesi için gerekli itici gücün oluşmamasına sebep olur. Sıvı fazı meydana getirecek olan parçalar büyük olduğunda, bu parçacıklar eridiği zaman oluşan boşluklarda büyük olur. Sıvı oluşumu sağlandıktan sonra taneciklerin yeniden düzenlenmesi ile başlayan ağ yapısının oluşması birkaç dakika gibi çok kısa sürelerde gerçekleşebilecek kadar hızlıdır. Yapıyı meydana getiren taneciklerin yeniden düzenlenmesiyle yoğunlaşma ve mikro yapı oluşur. Sinterlemenin bu aşamasında gerçekleşen oluşumlar ileride gerçekleşecek yoğunlaşma ve mikro yapı üzerinde etkili olurlar. Düzenli bir şekilde yerleşmeyen taneciklerin yeniden düzenlenmesini analiz etmek hiçte kolay değildir. Bu güçlükten dolayı gerçekte olan süreci

anlayıp analiz etmek zorlaşır. Bu nedenle de bilgisayar modelleri kullanılarak araştırmalar gerçekleştirilmektedir (Lee ve ark., 1999).

Çok kristalli parçacıkların yeniden düzenlenmesi için gerekli toplam zaman birincil yeniden düzenlenme ve ikincil yeniden düzenlenme olmak üzere iki kısıma ayrılmaktadır. Birincil yeniden düzenlenme süreci oldukça hızlı Şekilde gerçekleşen bir süreçtir. Yeniden düzenlenmenin sıvı faz oluşumunu takiben tanecikler arasında oluşan sıvı köprüsüyle yüzey gerilimi altında bulunan çok kristalli parçacıkların hızlı bir Şekilde bu olayı gerçekleştirmesidir. Çoklu kristal yapıya sahip tanecikler arasındaki tane sınır noktalarına sıvı dolarak çok kristalli yapıyı bölmeye başlar. İkincil yeniden düzenlenmede ise birincil yeniden düzenlemede parçalanan tanecikler yeni bir Şekilde düzenlenir. Bu durum birincil yeniden düzenleme sürecine göre nispeten daha yavaş gerçekleşen bir aşamadır. Şekil 3.5’te parçacıkların yeniden düzenlenmesi Şematik olarak gösterilmiştir (Rahaman, 2003).



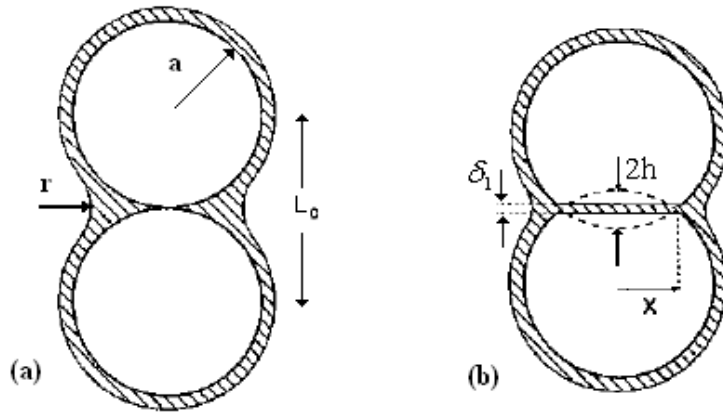
Şekil 3.5. Çok kristalli parçacıkların parçalanması ve yeniden düzenlenmesi (Rahaman, 2003).

Sıvı fazın hacimce % 30-35 oranlarında gerçekleştiği durumlarda tam yoğunlaşma yeniden düzenlenme aşamasında sağlanabilir. Sıvı faz içeriği azaldıkça çözünme-yeniden çökme gibi diğer sıvı faz sinterleme süreçleri devreye girer (Şulan, 1993; Özkal, 1993).

3.2.2. İkinci Aşama (Çözelti – Çökme)

Sıvı faz sinterleme işleminin yoğunlaşma ve tane büyümesi süreçlerini barındıran aşamasıdır. Sinterleme sırasında yoğunlaşma ile tane büyümesi birlikte meydana gelir fakat sıvının hacmi yeterli büyüklükte değilse tane şekil değişimi sonrası yerleşme süreci de bu iki süreç ile beraber gerçekleşir.

Yoğunlaşmanın gerçekleşmesi için iki model tipi vardır bu modeller; Yüzey teması ile yoğunlaşma ve Ostwald Büyümesi modelidir. Taneciklerin yüzey teması ile yoğunlaşma modelinde katı haldeki partikülün diğer partiküller ile temas halinde olan noktadaki çözünürlüğü ve ıslatıcı akışkanın basınç kuvveti, toz partikülünün temas olmayan yüzeylerdeki basınç kuvvetinden daha büyüktür. Çözünürlüklerde oluşan farklılıklar, parçacıkların temas noktaları dışından malzeme taşınmasına sebep olur. Bu sayede taneciklerin merkezleri yüzeylerin gerilim kuvvetleri altında birbirlerine yaklaşır ve temas alanın düz olmasını sağlar. Şekil 3.6' da yüzey teması ile yoğunlaşma şematik olarak gösterilmiştir.



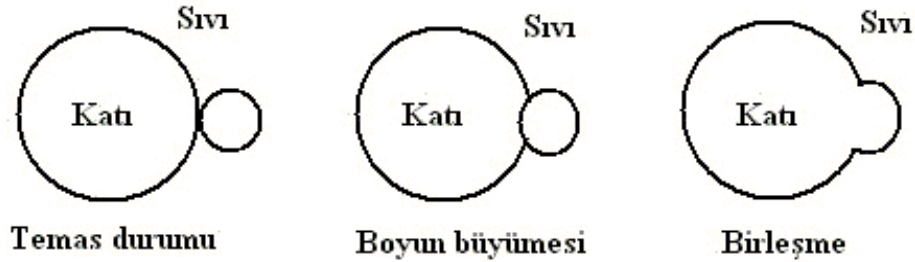
Şekil 3.6. Yüzey teması ile yoğunlaşma modeli

Yüzey teması ile yoğunlaşma modelinde taneciklerin temas halinde olduğu bölgelerin yarıçapı büyürken ara yüzey boyunca oluşan gerilim ile yoğunlaşma hızı azalır.

Madde taşınım hızı iki mekanizma ile yürür bu mekanizmalar; sıvıya difüzyon ve sıvı içinde çözünme ya da parçacık yüzeylerine çökme ile oluşan ara yüzey reaksiyonudur.

Ostwald büyümesi ile yoğunlaşma modeli W(Ni) toz karışımına uygulanan sıvı faz sinterleme işleminin oluşumunu gözleyerek yola çıkılan bir tekniktir. Bu yoğunlaşma modeli temas noktalarından uzak olan küçük tanelerin sıvı içerisinde çözünerek sıvıda yayılması ve daha sonra daha büyük yapıları tanelerin üzerine çökmesiyle ifade edilmektedir. Bu şekilde oluşacak olan büyüme Ostwald büyümesi ile gerçekleşir. Bu teknikte parçacık boyut ve dağılımı önemli bir unsurdur.

Sıvı faz sinterleme işlemi sırasında tane şekilleri sinterlemenin başlangıç aşamasındaki şekillerine göre değişerek parçanın yeni oluşan şekline göre yerleşim gösterir. Sinterleme işlemi esnasında meydana gelen sıvı fazın, tane şeklinin belirlenmesinde en önemli etken olduğunu söylemek mümkündür. Sinterleme işlemi esnasında oluşan sıvı ile ıslanarak temas haline gelen tanecikler birleşerek büyürler.



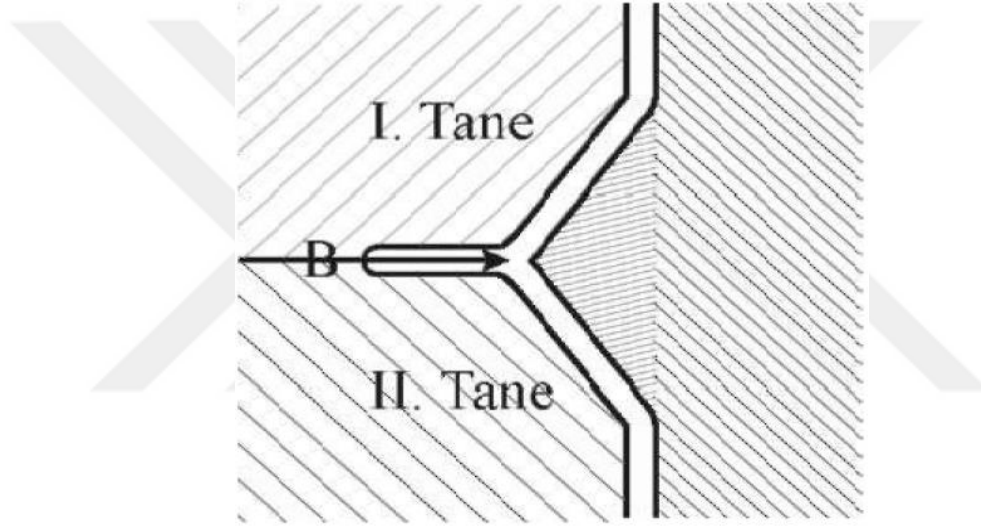
Şekil 3.7. Büyük ve küçük tanelerin birleşme yoluyla büyümesi

Şekil 3.7'de de gösterildiği gibi ilk olarak taneler arasında noktasal bir temas oluşur daha sonra bu temas noktalarında boyunlar oluşarak boyun büyümesi başlar ve sonuç olarak tane sınırı göçü ile birleşme gerçekleşir.

Enerjideki artış tane büyümesindeki gelişimi engellese de bu enerji bariyeri küçük tanelerin büyük tanelere doğru çözelti- çökme prensibine göre madde aktarımı yoluyla aşılması mümkün olabilir. Dihedral açısının büyük olması durumunda sıvının sınıra nüfuzunda kayda değer bir düşüş yaşanır. Parçacık boyutları arasındaki fark arttıkça süreçte hızlanır. Birleşmenin gerçekleşmesi için çözelti-çökmenin başlangıç bölümleri en uygun kısımlardır. Katı tanecikler arasında temasın gerçekleşmediği sistemlerde birleşme

sıvı filmin hareketi ile oluşur. Sıvı filmle oluşmaya başlayan birleşme ara yüzey enerjilerini düşürmez iken kimyasal enerjide bir kısım azalmaya sebep olur.

Sıvı faz sinterlemesinin ikinci aşaması olan çözünme-yeniden çökme aşamasında mikroyapısal gelişimde etkili olan bir başka mekanizmada çoğu sistemlerde gözlenen ve çözünme-yeniden çökme aşamasını hızlandırdığı düşünülen "toz tanesi parçalanması" yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda sıvı faz, sinterleme sıcaklığındaki toz tanesi içerisindeki tane sınırlarına sızar. Sıvı faz tane sınırlarında ilerlerken katı faz atomlarını çözeltilmeye alır ve ilerleyen sıvı faz sonunda toz tanesinin parçalanmasına neden olur. Böylece çözünme-yeniden çökme mekanizmasına katkıda bulunur.



Şekil 3.8. Temas bölgelerinde ergiyiğin tane sınırı boyunca ilerlemesi ve yumru oluşumu (Gülsoy, 2003).

Şekil 3.8'de çözünme-yeniden çökme süreci olarak tane sınırlarında sıvı faz ilerlemesi şematik olarak gösterilmiştir. %99,9 saflıktaki demir ilerleyen ergiyiğin ucundan çözeltilmeye alınır. Sıvı boyunca taşınır ve tane sınırının karşısındaki parçacığın üzerine katı ergiyiği (B) olarak çökler. Bu süreç malzemenin parçacık içerisinden alınması ve ergiyik aracılığıyla yer değiştirmesinden dolayı medya gelir. Malzeme temas alanlarında parçacık ayrışmasına neden olacak şekilde ve yeniden düzenlenmenin olmadığı durumlarda sayısal olarak hesaplanabilecek şekilde mikroskobik büyümelere neden olur. Sıvı faz ilerledikçe demir parçacıkları parçalanır ve çözünme-yeniden çökmeyle yoğunlaşma gerçekleşir (Gülsoy, 2003).

3.2.3. Üçüncü Aşama (Mikroyapısal Büyüme)

Sıvı faz sinterleme işleminin son aşaması olan katı hal sinterlemesi ara aşamasında aktif olan çözünme ve yeniden çökelme işleminin bir uzantısı şeklindedir. Bu aşamada mikroyapı dengeye ulaşmaya çalışmaktadır. Minimum enerjiye sahip katı - sıvı ara yüzey şeklinde davranır. Sıvı faz sinterlemesinin devamı sırasında mikroyapısal irileşme devam eder ve yoğunlaşma hızı giderek azalır. Sinterlemenin son aşamasında ulaşılan maksimum yoğunluk gözeneklerin ya da gözenek içerisinde hapsolmuş olan gazların karakteristiğine büyük oranda bağlıdır. Son aşamanın başlaması ile ön şekil verilmiş numune içerisinde tane büyümesi oluşmaya başlar ve sinterlemenin devamı ile çözünme ve çökelme işlemi ile tane büyümesi gerçekleşir. Tane büyümesi süresince tane boyutu dağılımında, gözenek boyutunda, taneler arası boyun boyutunda anında değişimler olur (Kayış, 2005).

Son aşamada tane şekli ve sıvı fazın konumu, yüzey enerjisine ve sıvı hacim fonksiyonuna bağlı olacaktır. Gerçekleşen yoğunlaşma miktarı dihedral açı ile ters orantılıdır. Sonuç olarak 60° 'nin üzerindeki dihedral açı ve az miktardaki sıvı son yoğunlaşmayı yavaşlatır. Bu durum tane kenarlarında süreklilik göstermeyen sıvı dağılımına neden olur (Bakan, 1999).

Sıvı faz sinterlemesinin başlangıç aşamasındaki hızlı yoğunlaşma süresi boyunca katı parçacıkların birbiriyle teması oldukça zayıftır. Son aşamaya geçişle birlikte hızlı yoğunlaşmayı engelleyen rijit bir iskelet yapısı meydana gelir. Oluşan rijit iskelet yapısına rağmen tane büyümesi, tanelerin yeniden şekillenmesi ve son gözeneklerinde giderilmesini sağlayan çözünme, yeniden çökelme işlemi ile devam eder. Son aşamada gözenekler birbirleri ile teması olmayan kapalı gözenekler şeklindedir. Toplam gözenek miktarı % 8'den azdır (Bakan, 1999; German, 1985; Gessinger, 1973).

Pek çok sıvı faz sinterlemesi örneğinde çok kısa sinterleme süresinde teorik yoğunluğun % 99'na ulaşmak mümkün olabilir. Yüksek yoğunluğa ulaşmak için gerekli olan süre bazı değişkenlere bağlıdır (Bakan, 1999). Gözenek boyutu, sinterleme atmosferi yüzey enerjisi ve gözenek yoğunluğu kriterleri ile maksimum yoğunluk belirlenir. Uzatılmış ısıtma süresince hem tane büyümesi hem de gözenek büyümesi gözlemlenir. Gereğinden daha fazla olan sinterleme yoğunluğunun azalmasına neden olur (German, 1985).

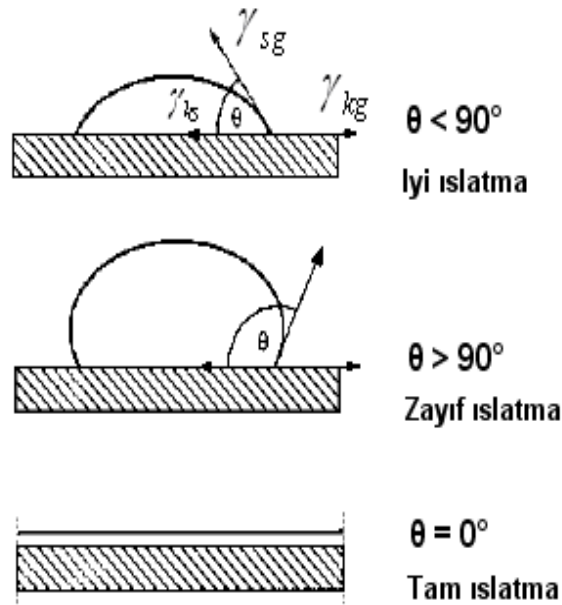
Sıvı faz sinterlemesinin etkisindeki pek çok sistemler için mikroyapısal irileşme yoğunlaşma ile paralel olarak gerçekleşir. Sinterlemenin son aşamasında irileşme

mekanizması daha baskın haldedir. İrileşme için itici kuvvetler; katı-matris ara yüzeyi kavisliğinin ve miktarının azalması süresince olan ara yüzey enerjisindeki azalmadır. Küçük boyutlu taneler daha küçük kavislik yarıçapına ve büyük boyutlu tanelere göre sıvı içerisinde daha fazla çözünürlüğe sahiptir. Kimyasal potansiyeldeki azalma, kavisliğin azalması ile mümkündür (Bakan, 1999). Mikroyapı irileşmesinin ölçülmesinin en kolay yolu tane boyutunun ölçülmesidir. Zamanla ortalama tane boyutu artar. Çünkü katı hacim fonksiyonu sabit kalmasına karşın, küçük taneler yok olur ve büyük taneler daha da büyür ve bu durum ara yüzey alanının azalmasına neden olur (Niemi, 1981).

3.3. Termodinamik ve Kinetik Etkenler

3.3.1. Sıvının İslatma Özelliği

Bir katı parçacığının bir sıvı tarafından ıslatılabilir olma özelliği sıvı faz sinterleme işleminin temelini oluşturmaktadır. Sıvının katıyı iyi bir şekilde ıslatması, sıvı ile yüzey arasındaki temas açısının küçük olmasıyla orantılıdır. Akışkan molekülleri arasındaki kohezyon kuvvetinin büyüklüğü, sıvı ile katı arasında oluşan Adhezyon kuvvetinin büyüklüğünden daha büyük ise ıslatma gerçekleşmez. Şekil 3.9'da katı ile sıvı arasındaki ıslatma davranışı gösterilmiştir (Rahaman, 2003).



Şekil 3.9. Katı ve sıvı arasındaki ıslatma davranışının gösterimi

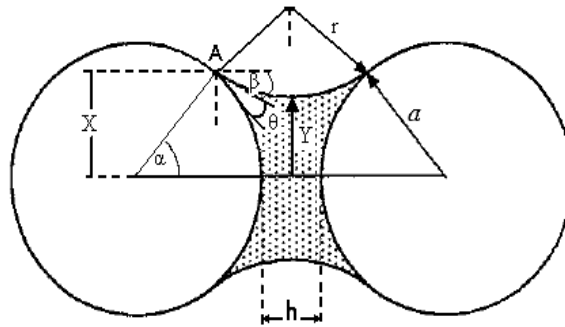
Sıvının katı parçacığı kaplamak üzere dağılmasına yayılım denir. Sıvı yayılımı gerçekleşebilmesi için toplam ara yüzey enerjisinin düşmesi gerekmektedir.

3.3.2. Çözünürlük Etkisi

Sıvı faz sinterleme sisteminde, akışkan sıvıdaki katı taneciklerin çözünürlüğü ve katıdaki sıvı çözünürlüğüdür. İki çözünme (çözünürlük) türü vardır. Bunlar; Katı taneciklerin akışkan sıvı içerisinde yüksek çözünürlüğü, yoğunlaşmanın gerçekleşmesine neden olur. Bu yoğunlaşma da sıvı faz sinterleme işleminin temelini teşkil eder. Diğer yandan katıda gerçekleşen yüksek sıvı çözünürlüğü istenilen bir olay olmayıp geçici bir sıvı faz oluşumuna muhtemel olan bu geçici faz ise yapı içerisinde şişme, kabarmaya ve şekil değişikliğine yol açacaktır. Bazı sistemlerde geçici sıvı faz sinterleme işlemi başarılı olmuş olsa da kontrolü güç bir prosedir (German, 1996).

3.3.3. Kapiler Kuvvet

Akışkan sıvının katıyı tamamen ıslatması durumu dikkate alındığında, sıvının içerisinde oluşacak olan farklı basınçlar tanecikler üzerinde büyük basınç gerilimlerini oluşturur. Taneciklerin üzerinde oluşacak olan basıncın büyüklüğü parçacıkların temas açısına, sıvı fazda var olan sıvı miktarına, parçacıkların boyut, dağılım özellikleri gibi bir takım durumlara karşı hassastır. Sıvı faz sinterlemede oluşan sıvının meydana getirdiği kapiler kuvvete tesir eden etkenleri belirleyebilmek için sıvının katı parçacık ile yaptığı temas açısı θ olan ve birbirinden h uzaklığında olan ve de parçacık yarıçapı a olan eş boyutlu iki küre, model olarak seçilir. Eş iki küre modeli şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Eş iki küre modeli; sıvı köprüsü ile birbirinden ayrılmış (Rahaman,2003).

3.3.4. Gravite Etkisi

Sıvı faz barındıran yapının düşük viskozitesinden dolayı yapının mevcut ağırlığı bazı noktalarda şekil değişimine neden olabilir. Bu edeğişimler genellikle sıvı fazın % 5-10'dan fazla olduğu yapılar için geçerli bir durumdur. Gravitenin oluşturduğu bir diğer etki ise sıvının yeniden dağılımı sırasında, sıvı içerisinde yayılmış halde olan katı parçacıkların katı yüzeylere çökmesi ya da sıvının boşaltılmasıdır. Katı-sıvı ayrımının veya yer değiştirmesinin olduğu esnada yapı içinde yoğunluk farklılıklarının olduğu bölgeler meydana gelir. Öz ağırlı fazla olan parçacıklar aşağı doğru çökme eylemi sergilerken ağırlığı hafif olan sıvı faz yukarı doğru çıkma eylemi sergiler (Rahaman, 2003).



4. SICAK PRESLEME

Alan kontrollü yeni nesil sinterleme tekniklerinden olan sıcak presleme işlemi, ısı ve basıncın bir araya gelip sinterlenen mamülün neredeyse tamamının iç gözeneklilikten arınmış bir ürün üretilmesi işlemidir. Presleme, tek hareketli zımba ya da çift hareketli zımbayla yapılabilen bir işlemdir.

Oksidasyon veya hava tarafından nitridasyona uğrayan sıcak tozların korunması amacıyla kontrollü bir atmosfere gereksinim vardır. Baskı altındaki kalıp içinde ki toz metalin sıcak preslenmesi toz metalin eski sıkıştırma uygulamalarından biridir. Sıcak Preslemeyle yüksek kaliteli ürün elde edilmesine karşın, kalıbın aşınması, zımba yüzleşmelerinde kalıp duvarlarına sıvı metalin kaynamasından dolayı da sıkıştırılmış yüzeylerin bozulması, kutu duvarlarıyla ve hareketli burçlar arasındaki boşluk, numune kaybı ve alet aşınması gibi sakıncaları vardır (ASM, 1998).

Sıcak preste özen gösterilmesi gereken en önemli detaylardan birisi uygun kalıp malzemesinin seçimidir. Yüksek sıcaklıklarda kalıbın, tozla herhangi bir reaksiyona girmemesi ve presleme esnasında uygulanan basıncın kalıbı herhangi bir plastik deformasyona uğratmaması gerekmektedir. Genellikle kalıp malzemesi olarak grafit kullanılmaktadır ancak sement karpürler, berilyum nikel ve kobalt esaslı süper alaşımlar sıcak preslemede kullanılan diğer kalıp malzemeleridir (Peelen, 1979).

Geleneksel soğuk pres-sinterleme işlemleri ile kıyaslandığında sıcak presleme yöntemi daha az güce ihtiyaç duyar ve 10-15 gibi daha kısa süre ile daha düşük sıcaklıklar gereklidir. Ayrıca bu teknikte yüksek yoğunluklara ulaşmak soğuk presleme-sinterleme işlemine kıyasla daha olasıdır.

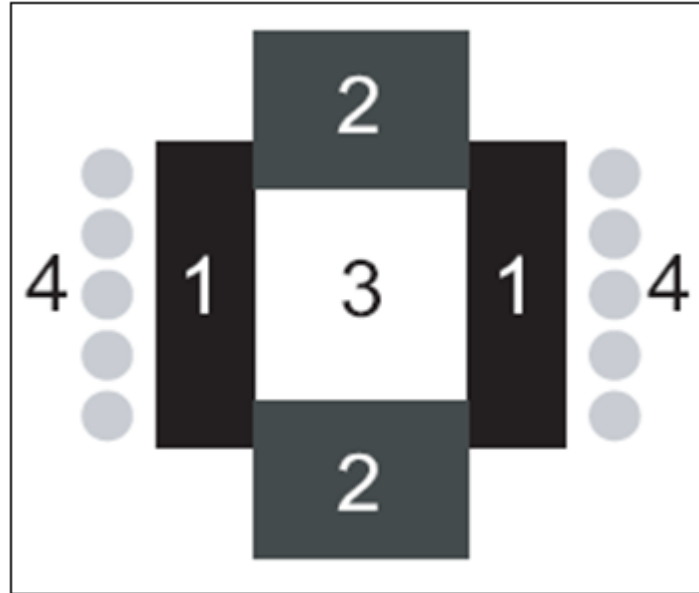
4.1. Sıcak Presleme İşlemi

Sıcak Presleme için çeşitli teknikler ortaya konulmaktadır. Bu yöntemin tercih edilmesi metalin fiziksel özelliklerine bağlıdır. Bütün Sıcak Presleme teknikleri çeşitli ortak özelliklere sahiptir (Kaya, 1999).

Bu yöntemde, kalıp duvarıyla toz parçacıkları arasındaki sürtünme kuvveti, kalıp tabanında bulunan yay gibi esnek elemanın yay kuvvetini yenip kalıbın aşağıya doğru yönelmesini sağlayıp, tozun taban yüzeyine alt zımbanın, üst zımbayla eşit şiddetle basınç

uygulamasını sağlamaktadır. Sıkıştırma işlemi bittikten sonra TM parçası alt zımbanın yukarı hareketiyle kalıptan çıkarılır. Yoğunluk dağılımı tek yönlü preslemeyle üretilen parçalara oranla daha homojen olmaktadır. Sıkıştırılmış parçanın orta noktasında en düşük yoğunluk bulunur. Orta noktadan geçen yatay ve dikey eksenlere göre yoğunluk dağılımı simetrik olmaktadır. Basınç, statik ya da dinamik olarak ısıtılan toza bir ya da iki yerden zıt yönlerde tek bir eksen yönünde uygulanmaktadır (Hiçyılmaz, 1999).

Sıcak presleme işlemi birbirinden farklı üç ısıtma tekniği kullanılarak yapılmaktadır. Bu teknikler indüksiyon ile ısıtma, endirekt dirençli ısıtma ve direkt dirençli ısıtma teknikleridir. Isıtmanın indüksiyon ile yapıldığı işlemi de, yüksek (düzenle) frekanslı indüksiyon akımı ile kalıp içindeki tozların ısıtılması esasına dayanır. Metal ya da grafitten yapılan kalıplara basınç uygulanarak tozların sıkıştırılması sağlanır ve kalıp indüksiyon sargısı içerisine bırakılır. Sinterleşme süresi boyunca yüksek frekans jeneratörü ve indüksiyon sargısıyla kalıbın ısıtılması sağlanmaktadır. Bu yöntemin avantajı basınç ve indüklenme gücünün tamamen birbirinden bağımsız olmasıdır. Düşük basınçlarda sıvı faz sinterleme işlemi gerçekleştirilebilir. Şekil 4.1’de şematik olarak indüksiyon ile ısıtma gösterilmiştir.

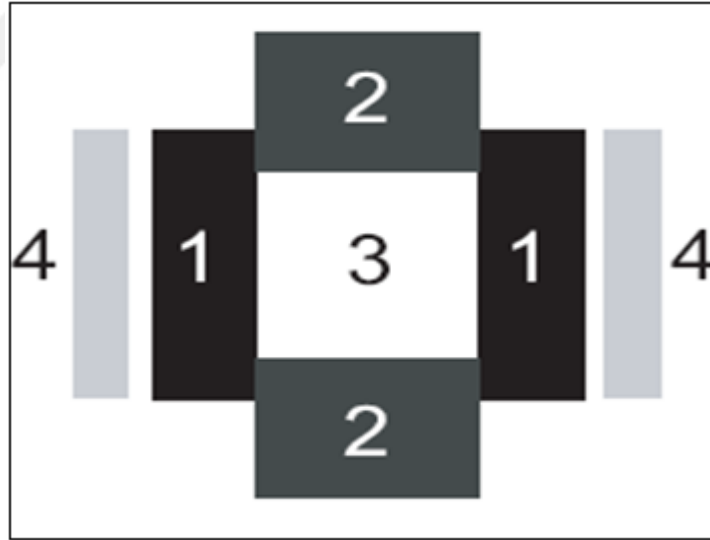


Şekil 4.1. İndüksiyon ile kalıbın ısıtılması 1. Grafit yan tutucular 2. Baskı grafitleri. 3. Preslenecek malzeme 4. İndüksiyon sargısı (Çelik, 2009).

Yöntemin dezavantajları ise yüksek frekans jeneratörünün pahalı ve kalıbın yerleşiminin çok düzenli olması gerekmektedir. Kalıp düzenli olarak yerleştirilemez ise ısı

yayılımı düzgün bir şekilde gerçekleşmez. Sistemin temel dezavantajı sıcaklık dağılımının tam olarak sağlayabilmenin güç olmasıdır. Manyetik alan kalıbın içerisine sadece 0.5 ile 3 mm arasında nüfuz etmektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi sıcaklık kalıbın ısıl iletkenliği ile yayılmaktadır. Kalıbın merkezinin ısıtılması oldukça güçtür. Bu nedenle başka yöntemin başka bir sorunu ise çok yüksek ısıtma oranlarında yüksek sıcaklık farklarından dolayı kalıbın tahrip olması riskidir.

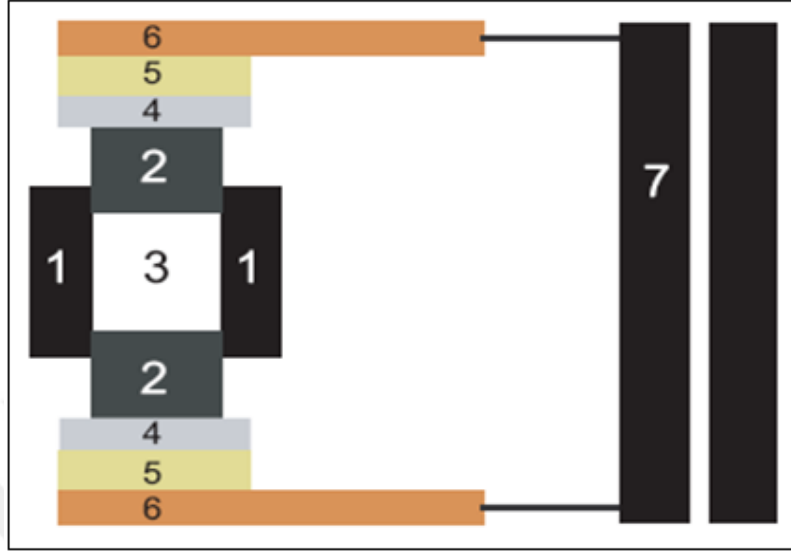
Isıtmanın endirekt dirençli ısıtma tekniğiyle yapıldığı durumlarda kalıp ısı bölmesinin içine yerleştirilir. Isı bölmesi elektrik akımı ile ısıtılan resistans şeklinde ısıtma elemanlarıyla ısıtılır. Isınan resistanslar kalıpla temas halinde olduğundan ikincil olarak kalıbı ısıtırlar bu nedenle işlem endirekt dirençli ısıtma olarak ifade edilir. Yöntemin avantajı, sıcaklık ve basıncın birbirine bağımlı olmadan kullanılabilmesidir. Yöntemin temel dezavantajı ise kalıbın ısıtılmasının uzun bir süre alması ve kalıbın dıştan içe doğru ısınması ile ısının eşit olarak dağılmasının uzun zaman almasıdır. Şekil 4.2’de şematik olarak endirekt ısıtma tekniği gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Endirekt ısıtma tekniği. 1. Grafit yan tutucular 2. Baskı grafitleri. 3.Preslenecek malzeme 4. Grafit ısıtıcı (Çelik, 2009).

Direkt dirençli ısıtma teknolojisinde ise kalıp doğrudan elektrik gücü ile ısıtılmaktadır. Kalıp ve toz parçanın direnci ile ısı tam olarak kalıbın ortasında oluşur. Bu ısıtma tekniğinde ısıtma hızı çok yüksek seviyelerdedir. Önceki iki teknik ısı

iletimi ile ilgili iken direkt dirençli ısıtma tekniği ısı gereksinim olan yerlerde üretilmektedir. Şekil 4.3'te direkt ısıtma tekniği şematik olarak ifade edilmiştir.



Şekil 4.3. 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 (Çelik, 2009).

4.2. Sıcak Presleme Yönteminin Avantajları

Sıcak Presleme ile düzgün içyapılı malzemeler imal edilmektedir. Maliyeti düşüktür. Oksitlenmeyen seramiklerin üretimi mümkündür. Bu yöntemle saptanan fiziksel özellikler daha iyidir. Yüksek yoğunluklara bağlı olarak yapıda sağlamlaşma sağlanmaktadır (Kaya, 1999).

Sıcak presleme ile toz malzemeler şekillendirilirken ayrıca sinterleme işlemine gerek yoktur. Çünkü sinterleme işlemini gerçekleştirecek ekipmanlar sıcak presleme makinesi içerisinde mevcuttur. Malzemeye basınç uygulanırken, kademeli olarak artan basınç altında aynı zamanda sinterleme işlemi de yapılmaktadır. Sıcak preslemenin bir avantajı olarak sinterleme işlemi diğer geleneksel sinterleme yöntemlerinde olduğu gibi soğuk pres işlemlerinde uzun süreli bekleme gerektirmez; çünkü basınç ve sıcaklık aynı anda uygulandığı için 10- 15 dakikalık kısa bir sürede sinterleme işlemi de presleme işlemi yapılabilmektedir.

5. TOZ ÖZELLİKLERİNİN SİNERLEMEYE ETKİSİ

Sinterlenmiş parçaların üretiminde kullanılan tozlar, metal tozların tamamına yakınında olduğu gibi üç temel faktör vasıtasıyla karakterize edilir (Höganäs, 2004b).

1. Metalurjik özellikler

- Mikroyapı
- Kimyasal kompozisyon
- Mikrosertlik

2. Geometrik Özellikler

- Partikül boyut dağılımı
- Spesifik yüzey alanı
- Dış partikül şekli
- İç partikül yapısı (partikül porozitesi)

3. Mekanik Özellikler

- Sıkıştırılabilirlik, ham mukavemet ve boyut değişimi
- Kütle yoğunluğu
- Akış hızı

5.1. Metalurjik Özellikler

Malzemenin sahip olduğu metalurjik özellikler kimyasal analiz ve metalografik inceleme gibi bir takım işlemler sonucunda tespit edilir. Demir tozlarının sahip olduğu kimyasal kompozisyonunun; parçanın sinterleme işlemi sonucunda son olarak belirlenen mukavemet özellikleri üzerinde büyük etkisi söz konusudur. Ancak metalik olmayan impüriteler, kompaktlama ve sıkıştırılabilirlik takımlarının ömrünü azaltır (Höganäs, 2004b).

Demir esaslı tozların kimyasal yapıları göz önüne alındığında iki grupta incelenmesi mümkündür. Oldukça yüksek saflığa sahip olan elementel tozlar, kimyasal analiz impürite konsantrasyonu üzerine yoğunlaşır. Ön alaşımlı tozlar daha önceden kararlaştırılmış oranda çoklu elementler ile birlikte mikro düzeylerde bileşik oluştururlar (German, 1984). Elementel yapıdaki tozlar genellikle cevherden ya da belirli bir takım

işlemler sonucunda meydana gelen metal atıklardan üretilir. Yığından yığına atık bazlı tozlardaki kimyasal değişimin cevher bazlı elementel tozlara nazaran daha yüksek olduğu gözlenir. Ancak cevher bazlı tozlar daha düşük kimyasal değişime karşın inert ya da oksit inklüzyon içeriğine yatkındırlar. Füzyon esaslı teknikler ile üretimi sağlanan tozlar kimyasal saflaştırma için çok daha avantajlıdır. Aynı zamanda çok daha yüksek saflıkta olması beklenir. X-ray floresans, renkölçüm (colorimetry), ve nötron aktivasyon analizi kullanılarak tozların kütle karakterizasyonu tayin edilir (German, 1984).

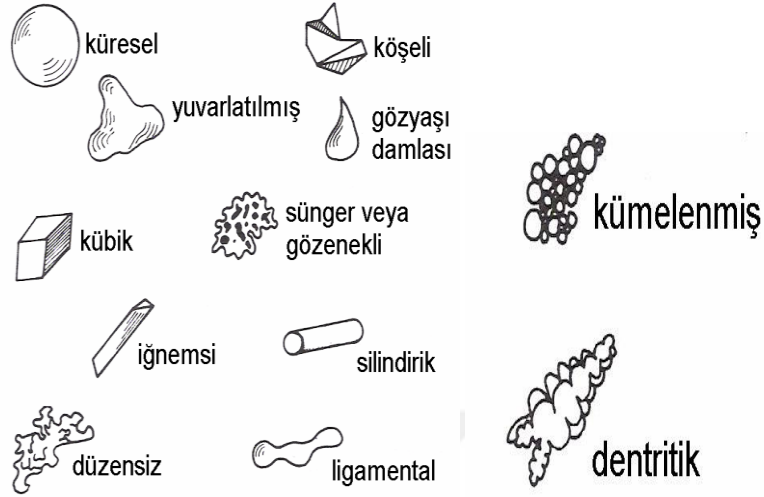
5.2. Fiziksel (Geometrik) Özellikler

Tozların sahip oldukları geometrik özellikleri yani fiziksel özellikleri, tanecik şekli, tanecik boyut dağılımı ve tanecik porozitesi ile sınıflandırılabilir. Ayrıca bu özellikler sinterleme işleminin temel etkenini oluşturur. Bu etkenin ile tozun spesifik yüzey alanının belirlenmesi sağlanır (Höganäs, 2004a).

Tanecik boyutu terimini açıklamak kolay olsa da tanımlamak oldukça güçtür. Çünkü toz partiküllerinden sadece küresel şekle sahip olanları, sadece çap ifadesi kullanılarak tanımlanabilir. Endüstri alanında kullanılan tozların büyük bir kısmı küresel şekilli değildir. Yaşanan bu güçlükten dolayı, partikül boyutunu karakterize etmek için toz partiküllerinin nicel özellikleri yani, uzunluk, yüzey ya da izdüşüm alanı, hacim ya da kütle, yerleşme hızı ya da elektrik alanıyla etkileşim gibi belirli fiziksel özelliklerinin tamamı yada büyük bir çoğunluğunun bilinmesi gerekir (Schatt, 1997).

Bir toz partikülünün boyutu genellikle ölçüm tekniğine, ölçülebilen spesifik parametrelere ve toz partikülünün sahip olduğu toz şekline göre şekillenir. Toz tanecik boyut analizinde kullanılan teknikler, genellikle ölçüm için kullanılan parametrelerde farklılıkların olmasından dolayı çoğunlukla eşit yanı eşdeğer değerler vermeyen çeşitli tekniklerdir. Tanecik boyut saptama metotlarının büyük bir çoğunluğu, geometrik parametrelerden herhangi bir tanesini kullanma prensibine dayanır. Partikül boyut belirleme metodu aynı zamanda küresel bir tanecik şekil için kabul yapar. Bilim insanları tarafından toz karakteristiklerinin en önemlilerinden biri partikül boyutu olarak belirlenmiştir (German, 1984). Partikül boyutu sadece sayısal bir değerden ibaret değildir. Aynı zamanda partikül boyutu örnekleme yığnında ki aynı olmayan boyutlara sahip tozların boyut dağılımının yüzdesi olarak da açıklanabilir. Toz partikül boyutunu belirlemek için birbirinden farklı ölçüm metotları üç gruba ayrılabilir (Schatt, 1997). Toz

partikül boyutunu belirlemek için birbirinden farklı ölçüm metotları üç gruba ayrılabilir (Schatt, 1997). Bu ölçüm yöntemleri; çökeltme, ayırma ve sayım metotlarıdır.



Şekil 5.1. Bazı toz şekilleri

Geometrik özelliklerden bir diğeri de partikül şeklidir. Şekil 5.1’de bazı partikül şekilleri gösterilmiştir. Partikül şekli doldurma, akış ve tozun sıkıştırılabilirliği üzerinde olumlu ve olumsuz etki oluşturan bir parametredir. Partikül şekli tozun üretim yöntemi hakkında birçok datanın bilinmesini sağlar. Partikül şeklinin tam olarak kesin bir değer şeklinde saptanması oldukça zor olduğundan, yaklaşık ifadeler kullanılarak tanımlanır. Partikül şeklini etkileyen en önemli unsur tozun üretim yöntemidir. Ancak toz boyutu da toz üretim yöntemi kadar partikül şeklinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar (German, 1984).

Partiküllerin bir diğeri önemli bir geometrik karakterizasyonu ise spesifik yüzey alanıdır. Spesifik yüzey alanı sinterleme işlemi boyunca toz kompaktlarının yüzey aktivitesi olarak adlandırılan özelliğini etkiler. Yüzey aktivitesini etkilemesi ile sinterleme işlemi boyunca malzeme taşınımı için ciddi bir sürücü kuvvet meydana getirir (Scatt, 1997). Başka bir ifade ile doğrudan ürünün sinterlenme kabiliyeti üzerinde etkili olur. Yüzey pürüzlülüğü ve düzensiz şeklin fazla olduğu partiküllerin spesifik yüzey alanı fazla olur. Bu nedenle spesifik yüzey alanı fazla olduğu içinde sinterlenebilme kabiliyeti oldukça artar (Upadhyaya, 1996).

5.3. Tozların Mekanik Özellikleri

5.3.1. Görünür Yoğunluk

Gevşek ve birbirleriyle bitişik halde olmayan ve miktarı belirli metal esaslı toz, belirli hacimli bir kaba doldurulup daha sonra bu toz kütesinin ölçülmesiyle saptanan yoğunluğa görünür yoğunluk denilmektedir. Metalik tozun sahip olduğu görünür yoğunluk, gevşek yapıdaki toz kütesinin kapladığı hacme oranı olarak da ifade edilebilir.

Görünür yoğunluk toz için çok önemli bir özelliktir. Görünür yoğunluğun bu kadar önemli olmasındaki bazı unsurlar aşağıda belirtilmektedir. Bunlar;

1. Sıkıştırma işleminin gerçekleştiği kalıbın ebatları ile gevşek toz kümesinin yoğunlaşması ve şekillendirilmesi için ihtiyaç duyulan pres kuvvetini belirler,
2. Başlangıç aşamasındaki tozların işlenmesi için faydalanılacak ekipmanlar ile taşınmasında kullanılacak ekipmanların seçimini belirler,
3. Sinterleme işlemi boyunca tozların sergilediği performansa etki eder (Upadhyaya, 1996).

Metalik bir tozun görünür yoğunluğu, partikülün yüzey alanı, partikül boyut dağılımı, tanecik boyutu, katı malzemenin yoğunluğu, her bir taneciğin pürüzlülüğü ve partikül düzenlemesi gibi faktörler tarafından doğrudan etkilenir. Görünür yoğunluğa tanecik (partikül) boyutunun önemli bir etkisi söz konusudur (ASM, 1998).

Farklı boyutlara sahip partiküllerin birbirleri ile karıştırılmasıyla kontrol edilir. Bu karıştırma sayesinde daha küçük boyutlara sahip partiküller daha büyük boyutlara sahip partiküllerin arasındaki boşluklara yerleşirler ya da görünür yoğunluğu artırmak için, optimum görünür yoğunluktaki partikül kısmı farklı oranlarda karıştırılır. Eğer karışım içerisinde kullanılacak olan yağlayıcının miktarı uygun oranlarda ise eklenecek olan yağlayıcı özelliğine sahip maddelerin ilavesi de sürtünmeyi azaltacağından dolayı görünür yoğunluk üzerinde önemli bir etki oluşturur (ASM, 1998). Yüksek basınca gereksinim duyulan yüksek yoğunluklu parçalarda mevcut görünür yoğunluğun yüksek olması önemli bir avantaj teşkil eder. Mevcut görünür yoğunluğun yüksek olması ile birlikte tozlar kaba tanelere sahip olacağından dolayı sinterleme kabiliyeti iyi olmaz.

5.3.2. Sıkıştırılabilme Kabiliyeti

Sinterleme işleminde doğrudan bir etkiye sahip olan tozun sıkıştırılabilirliği, en önemli işlem özelliklerinden bir tanesidir. Parçanın yoğunluğunu ve parçanın sonuç özelliklerini belirleyen unsur şekillendirme basıncıdır. Sıkıştırılabilirliği başka bir ifade ile açıklamak gerekirse uygulanan basınç altında bir sıkışma ya da yoğunlaşma miktarıdır. Tozun sıkıştırılabilirliği tanecik sertliği, sıcaklık ve tanecik şeklinin bir fonksiyonu olarak nitelendirilebildiği gibi partikül yoğunluğu, kimyasal kompozisyonu, partikül elastisitesinin de bir fonksiyonu olarak da adlandırılabilir. Toz yüzeyleri sıkıştırılabilmede doğrudan etkilidir bu nedenle düzgün yüzeye sahip tozların daha yüksek bir sıkıştırılabilme kabiliyeti vardır. Partikül iç boşluğunu yani poroziteyi harici basınç vasıtasıyla ortadan kaldırmak, partiküller arası poroziteden çok daha kolay değildir. Yoğunluğu daha fazla olan tanecik daha yüksek sıkıştırılabilirliğe sahip olmaktadır. Toz partiküllerde olması muhtemel herhangi bir iç porozitenin varlığı ham yoğunluğun azalmasına neden olur. Yumuşaklığı daha fazla olan bir toz partikülü daha yüksek sıkıştırılabilirliğe sahiptir. Metal toz içinde çözülen impüriteler tozun sertliğinde artırıcı bir rol oynadığı için ürünün düşük sıkıştırılabilirlik eğiliminde olmasını sağlar. Tozun sünekliğinin artması ile birlikte tozun sıkıştırılabilirliği de artış gösterir artar. Tozun sünekliğini azaltan bazı kriterler tozun sıkıştırılabilirliğini de azaltır. Sünekliği azaltan bu kriterler mikro yapı kirleticiler, sertleştirme, yüksek dislokasyon yoğunluğu, alaşım ilaveleri ve demir tozunun yüksek nitrojen içeriği gibi faktörlerdir. Tozun süneklik özellikleri sürtünmenin oldukça önem taşıdığı yüksek sıkıştırma basıncında oldukça önemlidir (Şalak, 1995).

5.3.3. Ham Mukavemet (Kompakt Mukavemeti)

Ham mukavemet, sinterlenme işleminin henüz gerçekleşmediği ancak soğuk preslemenin gerçekleştiği toz kompaktın mekanik mukavemetidir. Ham mukavemet demir esaslı malzemelerin sinterlenmesinde oldukça önemlidir. Çünkü ham mukavemet, sinterlenmenin gerçekleşmesinden hemen öncesinde ki soğuk presleme işleminden sonraki kalıptan sıyırma ve taşınma gibi birtakım prosesler esnasında ham kompaktın boyutunun ve şeklinin bozulmamasında belirgin bir şekilde rol alır. Malzemenin sahip olduğu ham mukavemet iki temel nedene bağlıdır. Bu nedenlerden biri her bir tanecik üzerindeki metal

yüzeyleri arasındaki soğuk kaynağın genişlemesi diğeri ise dış kuvvetin uygulanması ile birbirleriyle karşılaşan tanecikler arasındaki mekanik kilitlemenin genişlemesidir (Upadhyaya, 1996).

Metal toz kompaktlar nadiren ham koşullarda kullanılmasına karşın (ham işleme vb.) kompaktlama presinin gerçekleşmesi sonucunda sinterleme işleminin gerçekleştirileceği fırına taşınırken, ham kompakt yıpratıcı ve kırıcı etkilere karşı direnç göstermek için yeteri kadar dayanıklılık göstermelidir. Bu ham mukavemet durumu bilhassa ince yapıdaki parçalar başta olmak üzere büyük parçaların ince kesitleri ve düşük yoğunluklu yapıya sahip parçalar için büyük önem arz eder. Tüm bu nedenlerden dolayı ham mukavemet, tozların sıkıştırılabilirliğini doğrudan belirlenmesine neden olan temel faktördür (ASM, 1998).

5.3.4. Partikül Kompozisyonu

Alaşım ilaveleri ve metal içindeki impüriteler, sinterleme kinetiğini etkiler. Bu etki, dağılım ve impürite reaksiyonuna bağlı olarak faydalı veya zararlı olabilir. Oksidasyon gibi yüzey kirlenmeleri genellikle istenmez. Matriste dağıntık fazlar tane sınır hareketine engel olarak sinterlenme kabiliyetini arttırabilir. Yüksek sinterleme sıcaklığında, impüritelerle baz metal ya da alaşım ilaveleri arasındaki reaksiyonlar istenmez.

6. GÜMÜŞ- KADMIYUM (AgCd) ALAŞIMLARI

Gümüşe katılan ilave metallere özellikle kadmiyum ilave metali çalışma sıcaklığını 600 °C kadar düşürebilmektedir. Kadmiyumun buharlaşma noktası düşüktür. Kadmiyumun sahip olduğu buharlaşma sıcaklığı 770 °C'dir. Kadmiyumun sahip olduğu bu düşük buharlaşma sıcaklığından dolayı aşırı ısınma durumlarında oluşan kadmiyum buharları lehimleme bölgelerinde gözeneklerin oluşmasına neden olur. Bu nedenden ötürü kadmiyumlu gümüş lehimlerinde lehimleme sıcaklığının çalışma sıcaklığının üzerine çıkılmasına müsaade edilmez.

Kadmiyumlu gümüş lehim tellerinin yayılma özelliği, elektrik iletkenliği ve boşluk doldurma özelliği mükemmel denecek kadar iyidir. Gümüşe ilave edilen kadmiyum lehimlemenin mümkün olan en düşük sıcaklıkta gerçekleşmesini sağlar. Kadmiyumlu gümüş lehim tellerinin kapiler özelliği ile akıcılığı mükemmeldir.

Kadmiyumlu gümüş lehim telleri; Çeliklerin, dökme demirlerin, paslanmaz çeliklerin, nikel, bakır ve alaşımlarının ve kesici sert metallere birbirlerine sert lehim ile birleştirilmesinde kullanılır. Kadmiyumlu gümüş lehim telleri, elektrik iletkenliği özelliğinden dolayı elektrik tesisatı, bobin, transformatör, pano ve ölçü aletleri bağlantılarında yaygın bir kullanım ağına sahiptir. Ayrıca torna kalemi gibi sert metallere birleştirilmesinde çok iyi sonuçlar verir.

Sert lehim tanımlamak gerekirse; sert lehim, ergime sıcaklığı 450 °C 'in üstünde ve etkileşimde ki ana metalin ergime sıcaklığının altında olan ilave metalleri kullanarak ve ısıdan yararlanarak metalleri birleştirmektedir. Bu noktada endüstri de çok yoğun bir şekilde kullanılan ve literatüre yerleşmiş bulunan Gümüş Kaynağı ifadesinin de bu tanım ışığında gümüş alaşım ilave metallere faydalanılarak yapılan sert lehimleme türü olduğu aşikardır.

Aşağıda sıralan nedenlerden dolayı sert lehimleme tercih edilmektedir. Sert lehimleme ile gerçekleştirilen birleşimler güçlüdür. Demir hariç diğer metaller ya da çelikler üzerinde yapılmış birleşmelerin çekme dayanımları, sıhhatli bir şekilde gerçekleştirilirse esas metallere çekme dayanımlarını aşabilir.

- Sert lehimlemeden yararlanılarak oluşturulan birleşimler dikkate değer şoklara ve titreşimlere karşı dayanıklı bir tutum sergileyebilir.

- Sert lehim yapmak kolay ve diğer birleştirme yöntemlerine nazaran daha hızlıdır.
- Farklı metaller sert lehimleme ile birleştirebilmektedir. Demir ve demir olmayan metalleri ve ergime sıcaklıkları birbirinden çok farklı metalleri birbirine bağlamak sert lehim ile kolay bir şekilde gerçekleştirilebilir.
- Sert lehimleme genellikle tek operasyonluk bir prosestir.
- Sert lehimleme izafi olarak düşük sıcaklıklarda gerçekleştirildiğinden esas metalin aşırı ısıtılmasını, çarpılmasını ve seyrelmesini azaltır.
- Sert lehimleme diğer kaynak işlemleri ile kıyaslandığında daha ekonomiktir.
- Sert lehimleme otomotizasyona çok uygundur.

Lehim alaşımlarına gümüş aşağıdaki avantajları sağlamak için katılır:

- Belirli bir ergime derecesi elde etmek
- Yüksek bir mukavemet sağlamak (çekme, eğme gibi)
- Lehim bağlantısının şekil değiştirme kabiliyetini arttırmak
- Lehimleme hızını yükseltmek
- Lehimleme yerinin rengini parçaya uydurmak
- Yüksek bir korozyon mukavemeti sağlamak
- Lehimin akıcılığını ve ıslatma kabiliyetini düzeltmek
- Lehimleme işleminden sonra minimum bir temizleme sağlamak

Gümüş 961 °C'de erimesine rağmen bazı ilave metaller ile alaşım oluşturarak bu ergime sıcaklığı daha düşük seviyelere kadar gerilemektedir. Gümüşlü alaşımlar kolayca şekillendirilebildiğinden dolayı istenen forma rahatlıkla getirilebilir. Özellikle fırında yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen veya yapılan lehimleme işlemleri için elverişlidir.

7. MATERYAL VE METOT

Yapılan çalışmada deney numunelerin üretimi, mekanik ve mikro yapı özelliklerinin tayini iki başlık altında incelenmiştir.

7.1. Kullanılan Malzemeler Ve Segmentlerin Üretimi

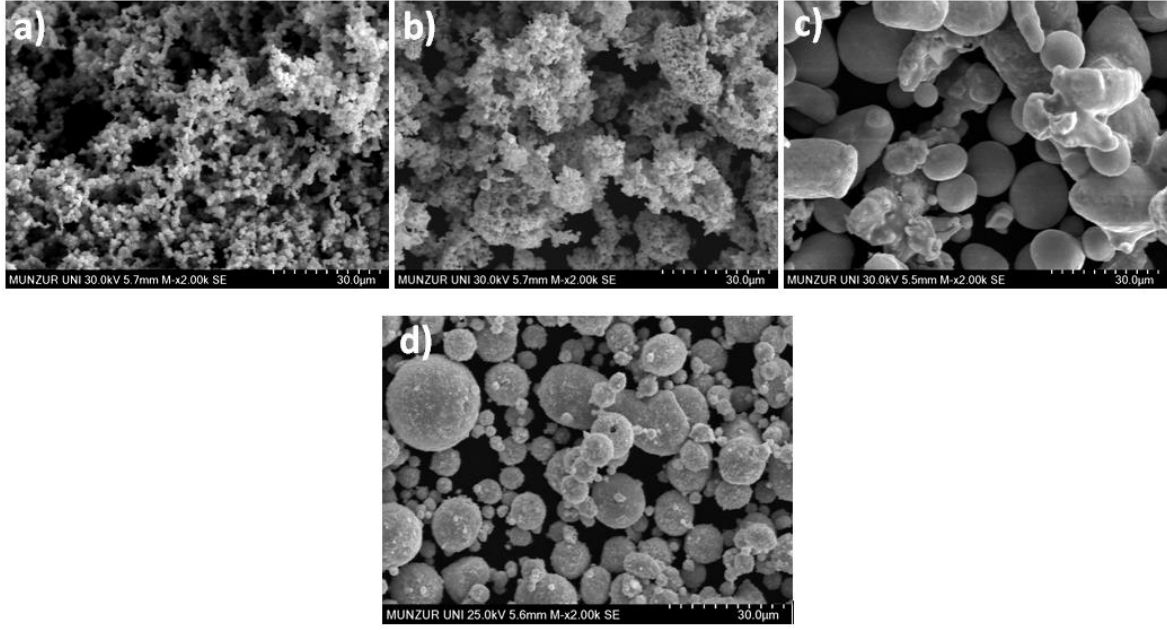
7.1.1. Kullanılan Malzemeler

Ticari olarak satılan Co (Eurotungstene, France), CuSn15 alloyed bronze (Pometon S.p.A., Italy), Ni (Nickel and Co S.p.A. Italy), sentetik elmas (Land Superabrasives Co. USA) ve AgCd (Sentes Bir A.Ş.,Ltd., Turkey) tozları matris malzemesi olarak kullanıldı. Kullanılan tozların karışım oranları ve özellikleri Tablo 7.1'de gösterilmektedir.

Tablo7.1 Numune üretimi için kullanılan malzemeler

Yüzdece içerik (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Boyut	Safılık (%)
80	8,7	50 µm	99,6
15	8,9	2,5 µm	99,9
5	8,86	1,8 µm	99,7
2-4-6	3,52	30-40 Mesh	95
0-4	3,21	60 Mesh	99,9

Kullanılan malzemelerin ayrıca SEM resimleri Şekil 7.1' de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Matris malzemeleri a)Nikel, b) Kobalt, c) Bronz alaşımı (CuSn15), d) AgCd

Karışımı meydana getiren malzemeler 0.01 gr hassasiyetinde hassas bir tartı ile (RADWAG, Kore) gösterilen karışım oranlarına göre tartıldı. Hazırlanan toz kümesi kontaminasyonu engellemek amacı ile yüksek yoğunluklu polietilen bir kap içerisinde şekil 7.2 'de gösterilen turbula mikser (Çelmak TB7, Türkiye) ile 30 dakika boyunca 40 dev./dak. dönüş hızında kuru olarak karıştırıldı.



Şekil 7.2. Turbula mikser (Celmak TB7, Türkiye)

Kuru olarak karışım yapılmasındaki amaç homojen bir ön karışım sağlanmasıdır. Seçilen tozların matriste hedeflenen performansı verebilmesi için çok iyi bir şekilde karıştırılmasını aynı zamanda matris içinde homojen olarak dağılmasını sağlamak gerekir. Ayrıca toz partiküllerinin min. boyutlara oluşmasını sağlamak için mikser kullanıldı.

Ön karışımı yapılan malzemelerin içerisine birbirleri ile homojen olarak karışmasını sağlamak amacı ile %2 oranında Polietilen glikol (PEG) eklendi. PEG'in neden olacağı topaklaşma etkisini engellemek ve ıslatıcının tüm yapı içerisinde dağılımını sağlamak amacı ile karışım içerisine hacimce 3/1 oranında aynı boyutta 55 HRC sertliğinde dış kısmı taşlanmış ve etil alkol ile temizlenip kurutulmuş çelik bilyeler eklenerek 30 dakika daha 40 dev./dak. hızda karıştırıldı.

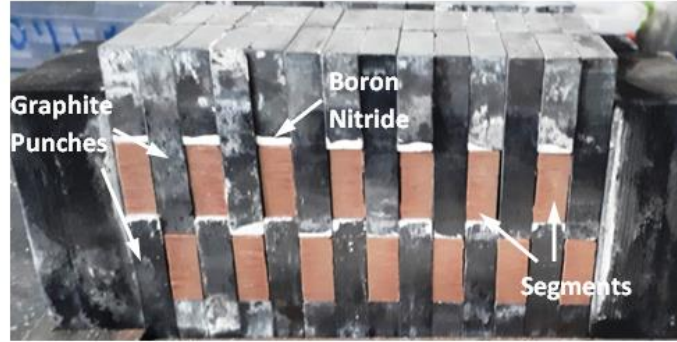
Toz kümesinin karıştırıldığı mikserin haznesi kapalı tiptir. Kapalı olan toz haznesi içine karışım konulduktan sonra dış ortam ile tozların ilişkisini kesmek için kapağı açılmayacak bir şekilde kapatılmaktadır. Mikser çalıştırdıktan sonra tozun homojen bir şekilde karışabilmesi için toz haznesi 360 derecelik turlarla her yöne dönebilmekte ve böylece tozların birbiriyle iyice karışması sağlanmaktadır.

Karıştırılan malzemeler 20 gram ağırlığında tartılarak şekil 7.3' te gösterilen çift etkili bir soğuk pres (Dim-Net WP-45SA, Korea) vasıtası ile 300 MPa basınç altında 4 saniye süre ile preslendi. Soğuk presleme işlemi sonucunda 23x23x9 mm boyutunda numuneler üretildi.



Şekil 7.3. Soğuk presleme işleminin gerçekleştirildiği cihaz

Soğuk preslenen malzemeler Şekil 7.4'te gösterildiği gibi grafit kalıplara yerleştirildi. Malzemelerin kalıplara yapışmaması ve sıcak presleme işleminden sonra kolayca kalıptan çıkarılması için grafit kalıp yüzlerine sıvı bor nitrür (BN) sürüldü.



Şekil 7.4. Sıcak presleme işleminden önce numunelerin grafit kalıba montajı

Sıcak presleme işleminde Grafit kalıbın dağılmaması için alüminyum sıkıştırma çerçevesi ile şekil 7.4'te gösterildiği gibi kapatıldı. Ayrıca çerçeve üzerinden elektriksel iletimin olmaması ve sinterleme için ihtiyaç duyulan sıcaklığın tam kalıp içerisinde oluşması için asbest yalıtım plakaları kullanıldı.

Grafit kalıp içerisindeki numuneler PLC kontrollü ve direk dirençli ısıtma tekniği ile çalışan bir sıcak pres (Zhengzhou Golden Highway, SMVB 80, China) ile 120 °C/dak ısıtma oranında 35 Mpa basınç altında sırası ile 650, 700 ve 750 °C'de 4 dakika boyunca %99.9 N₂ inert gaz atmosferi altında sıcak preslendi.

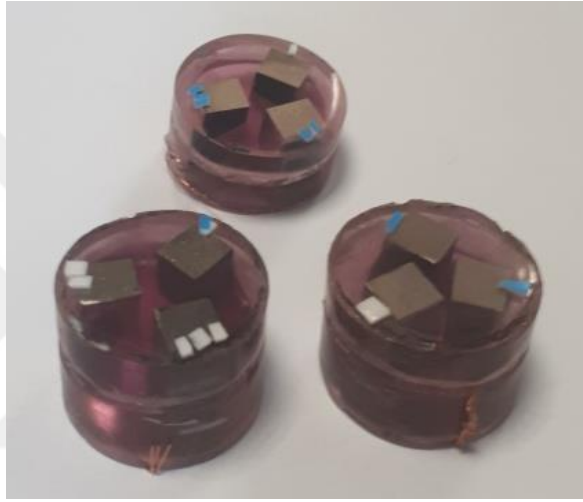
Sıcaklık ölçümü grafit kalıp merkezine yerleştirilen 1200 °C kapasiteli K tipi bir termokopul ile yapıldı. Sinterleme işlemin başlangıcında önce matris karışımına eklenen PEG'in yanması için 480 °C 'de 2 dakika beklendi. Sinterleme işlemi bittikten sonra 35 MPa baskı altında 200 °C 'de numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı. 23x23x9mm boyutunda her seriden 5 adet numune üretildi.

7.2. Karakterizasyon

Üretilen Numunelerin mikro yapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amacı ile aşağıda detayları verilen işlemler yapılmıştır. Sıcak presleme işleminden önce üretilen numunelerin bütün yüzeyleri oksit ve Bornitrür kalıntılarından arındırılması için 600 Mesh'lik su zımparası ile temizlenmiştir.

7.2.1. Yüzey Parlatma

Yüzey parlatma işlemi için Munzur Üniversitesi makine mühendisliği malzeme laboratuvarında bulunan Metcon cihazı kullanılarak yapıldı. Yüzey parlatma işlemi öncesinde numuneler Metcon Metacut 250 ile 1,1 mm kalınlıkta Sic esaslı disk kullanılarak sıvı soğutma ortamında kesildi. Parlatma işleminin daha rahat yapılabilmesi için numuneler üçlü gruplar halinde epoxy reçine ile kaplandı. Şekil 7.5’ de epoxy reçine ile kaplı numuneler gösterilmiştir.



Şekil 7.5. Epoxy reçine ile kaplanan numuneler

Daha sonra parlatma makinesi üzerinde bulunan pnömomatik yük ayarlı forcimat başlık ile sırası ile 300, 600, 800, 1000, 1200 ve 2000 Mesh’lik su zımparaları ile parlatıldı. Parlatılan yüzeyler daha sonra sırası ile 3 mikron ve 1 mikronluk elmas pastalar ile çuha üzerinde parlatılarak dağlama işlemine hazır hale getirildi. Şekil 7.6’da parlatma ve kesme işlemi için kullanılan cihazlar gösterilmektedir.



Şekil 7.6. a) Parlatma cihazı b) Kesme cihazı

Parlatılan yüzeylerde kalıntıların temizlenmesi için eti alkol ile temizlenerek kurutuldu. Temizlenen yüzey $5\text{HNO}_3 + 5$ asetik asit + $1\text{H}_3\text{PO}_4$ karışımının % 50 oranını saf su ile seyreltilerek numunelerin daldırma yöntemi ile dağlama işlemi yapıldı.

7.2.2. Yoğunluk Ölçümü

Numunelerin yoğunluk miktarı ve porozite oranın belirlenmesi için Arshimed prensibine göre yoğunluk ölçümüne tabi tutulmuştur. Yoğunluk ölçümü için ASTM B-311 standardı kullanılmıştır. Yoğunluk ölçüm işlemi numuneler önce kuru olarak, daha sonra sıcaklığı ölçülen saf su dolu bir kap içerisinde askıda bulunarak tartılmıştır. Yoğunluk ölçüm kitinin bulunduğu terazinin resmi Şekil 7.7’de gösterilmiştir.



Şekil 7.7. Yoğunluk ölçümlerinin yapıldığı hassas terazi

Yoğunluk değerleri aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$d = \frac{A \times E}{A - B}$$

Denklemden:

d: Numunenin özkütlesi

A: Numunenin havadaki kuru ağırlığı

B: Numunenin su içerisindeki ağırlığı

E: Suyun yoğunluğudur.

7.2.3. Sertlik Ölçümü

Üretilen numunelerin makro sertliklerinin belirlenmesi için Şekil 7.8’de gösterilen Emco Test - Durajet üçüncü nesil universal tip sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümü 187,5 kg yük ve 2,5 mm çapında ölçüm gücü ile Brinell (HB30)cinsinden ölçülmüştür. Her numune için 6 adet ölçüm yapılmış ve elde edilen bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak numunelerin sertlik değerleri belirlenmiştir. Sertlik işlemlerinin gerçekleştirildiği cihaz Şekil 7.8’de gösterilmiştir.



Şekil 7.8. Sertlik ölçüm cihazı

7.3.4. Üç Nokta Eğilme Deneyi

Numunelerin eğilme mukavemetini belirlemek için üç noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. ASTM B 528-83a standardına uygun olarak 1mm/dk hızda 30 mm alt destek boşluğunda yapılmıştır. Deneyler şekil 7.9’da gösterilen 100 kN kapasiteli SCHIMATZU marka universal test cihazı ile TRAPEZIUMX yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Kırılma tokluğu ise aşağıda gösterilen formül ile hesaplanmıştır.

$$P = (3 \times P \times L) / (2 \times t^2 \times w)$$

Bu denklemde:

P: Kırılmadan önceki yük

L: Destek noktaları arasındaki mesafe

w: Numune yüksekliği

t: Numune kalınlığı



Şekil7.9. Eğilme deneylerinin gerçekleştirildiği cihaz

7.3.5. Elektron Mikroskobu

Elektron mikroskobu incelemeleri şekil 7.10' gösterilen Munzur Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarında bulunan Hitachi SU3500 marka cihazı kullanılarak yüksek vakum altında yapıldı.



Şekil 7.10. Elektron mikroskobu

Elektron mikroskobu ile sinterleme işlemlerinde ne kadar başarılı olduğu ve hazırlanan numunelerin mikro yapılarının nasıl olduğu incelenmiştir. Ayrıca alaşımlama işlemlerinin tam olarak yapıp yapılamadığını anlayabilmek amacıyla da noktasal analiz (EDS) çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

7.3.6. XRD Cihazı

Üretilen numunelerin üç farklı sıcaklıkta sinterlenmeleri sonucunda numunelerde meydana gelebilecek faz yapılarını anlamak amacıyla şekil 7.11’de gösterilen Munzur Üniversitesinde bulunan Rigaku Mini Flex 600 Tabletop Bilgisayar Kontrollü X-Işınları Difraktometresi kullanılarak X-ışını kırınımı çalışmaları yapılmıştır.



Şekil7.11. XRD cihazı

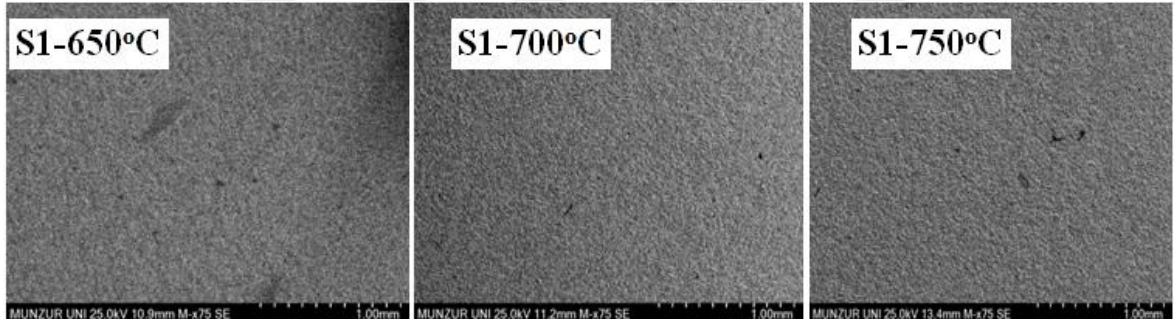
Farklı sıcaklıktaki numunelerin XRD analizi yapılarak sıcaklık farklılığında numunelerde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

8. BULGULAR

Bu bölümde yapılan çalışmaların sonuçları değerlendirilmiştir. Numunelerin Makroyapı, Mikroyapı, Sertlik, Yoğunluk, 3 Nokta eğme, MAP ve XRD analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçların grafikleri ve fotoğrafları gösterilmiştir.

8.1. Makroyapı İncelemeleri

Şekil 8.1’de sıcak preslenmiş olan S1 numunesinin 650,700 ve 750 °C de makro yapı fotoğrafları gösterilmiştir. Genel olarak SEM resimleri incelendiğinde matrisi meydana getiren toz partiküllerinin homojen bir şekilde karıştığı görülmektedir. Ayrıca yapı içerisinde segregasyon makro yapıda 2.20 mm üstünde mikro poroziteler varlığı görülmektedir.



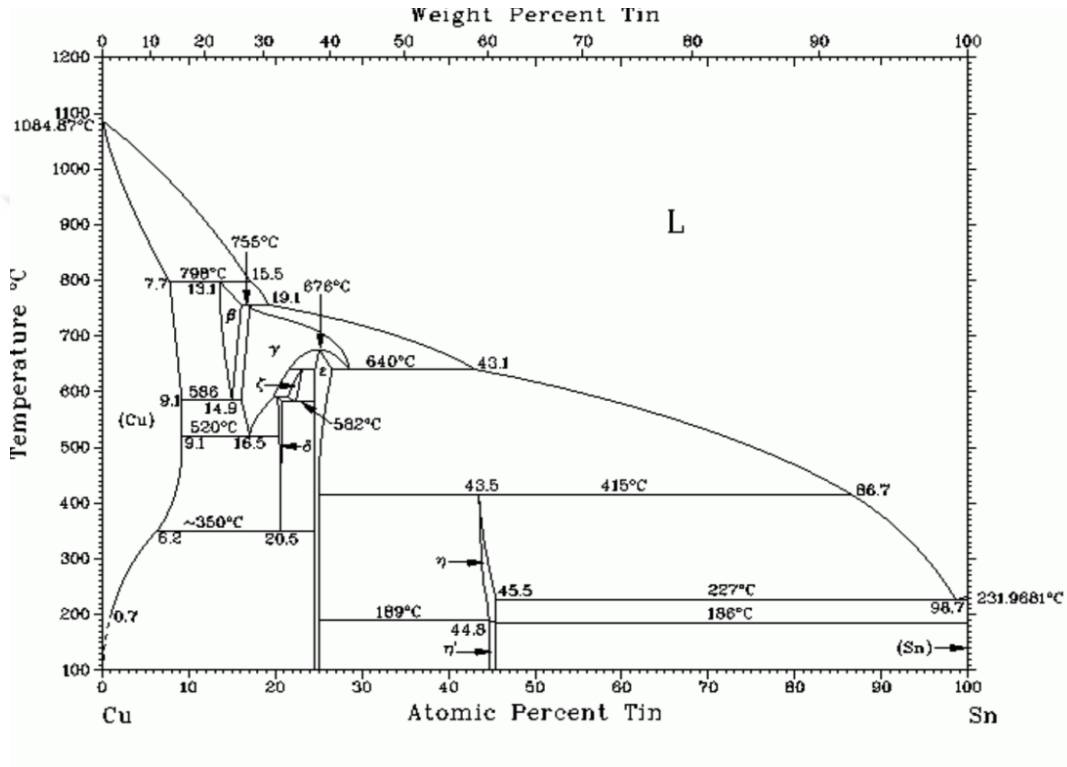
Şekil 8.1. Ag-Cd katkısız S1 numunesinin makroyapı SEM resimleri

8.2. Mikro Yapı İncelemeleri

Bu bölümde sıcak presleme ile üretilen ana matris olan S1 (%80 Bronz, %15 Nikel ve %5 Kobalt) numunesinin ve AgCd (%40 Ag, %19 Cu, %21 Zn ve %20 Cd) katkılı matrislerin mikroyapı incelenmelerinin yapılması için sırası ile 300, 600, 800 1000, 1200 ve 2000 Mesh’lik su zımparaları ile parlatılarak hazırlanmış ve dağlanmıştır. Daha sonra numunelerin mikroyapısal değişimleri incelenmiştir. Ayrıca ana matrise ilave edilen ağırlıkça %2-4-6 oranında AgCd miktarının da matris içerisindeki dağılımı ve mikroyapıya

etkisi incelenmiştir. Sıcak pres sinterleme sıcaklıkları ise Şekil 8.2'deki Cu-Sn ikili faz diyagramından yararlanılarak 650, 700 ve 750 °C olarak seçilmiştir.

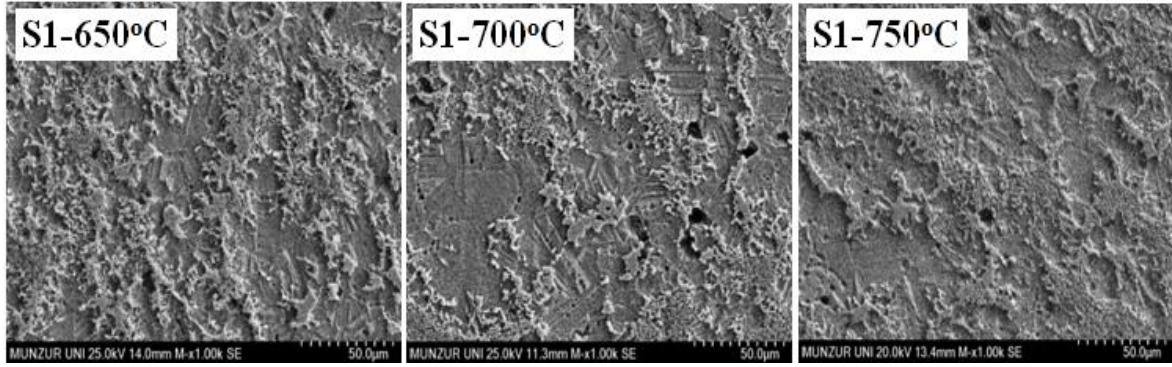
Şekil 8.2'de gösterilen Cu-Sn denge diyagramından anlaşıldığı üzere matrisin ana yapısını meydana getiren alaşım bronz (%85 Cu - %15 Sn) β fazı içerisinde Cu'nun katı eriyik oluşturduğu görülmektedir. Sinterleme sıcaklığının artması ile matris mikroyapısında yeni fazların oluşmayacağı öngörülmüştür.



Şekil 8.2. Cu-Sn ikili faz diyagramı (Saunders ve Miodownik, 1990).

Şekil 8.3'de S1içerik numunesinin 650,700 ve 750 °C sinterleme sıcaklıklarındaki mikroyapı SEM fotoğrafları gösterilmiştir. Şekil 8.3' deki mikroyapı resimlerinden anlaşıldığı gibi matrisin %80 'ni meydana getiren Bronzun yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Ayrıca matris içerisine ilave edilen Ni ve Co tane sınırlarında bir araya gelerek makro poroziteleri doldurucu bir etki oluşturmuştur. S1 numunesinde 650 °C de kısmi poroziteli bir yapı gözlemlenmiştir. Bu poroziteler genellikle mikro boyutta oluşmuştur. Bronz tane sınırlarında 5-10 mikron boyutunda makro porozitelerin varlığı söz konusudur. Özellikle Ni ve Co zengin bölgelerde oluşan mikro porozite oranı azalmıştır. Bronz partiküllerinin sıcaklık etkisi ile birleşmesi sonucunda Bronz zengin bölgeler oluşmuştur. Ayrıca artan sinterleme sıcaklığı ile mikro poroziteler artan sıcaklık etkisi ile

yapı içerisinde birleşenle makro porozite halini almıştır. Makro porozitelerin çapları 10-30 mikron aralığındadır. 700 °C 'de sinterlenen S1 numunesinde ise poroziteler kısmen kaybolarak yapı daha düzenli bir yapıya dönüşmüştür. 750 °C'de sinterlenen S1 numunesinde ise artan sinterleme sıcaklığının etkisi ile yapı içindeki makro ve mikro porozite oranı azalmıştır. Artan sinterleme sıcaklığı ve basınç etkisi ile yapı içerisinde bulunan toz partiküllerin hareket etmesi sonucunda bronz partikülleri yassı forma geçmiştir. Ayrıca bu matriste Bronz zengin bölgelerin varlığı azalmıştır. Sinterleme sıcaklığının 750 °C' ye yükseltilmesiyle birlikte yapı içerisindeki gözenekler daha da azalarak yapının daha düzenli bir forma ulaştığı görülmüştür. S1 numuneleri için sinterleme sıcaklığının artması ile birlikte malzemenin gözenekli yapısında gözle görülür bir azalmanın olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 8.3. Katkısız matrisin mikroyapısal fotoğrafları

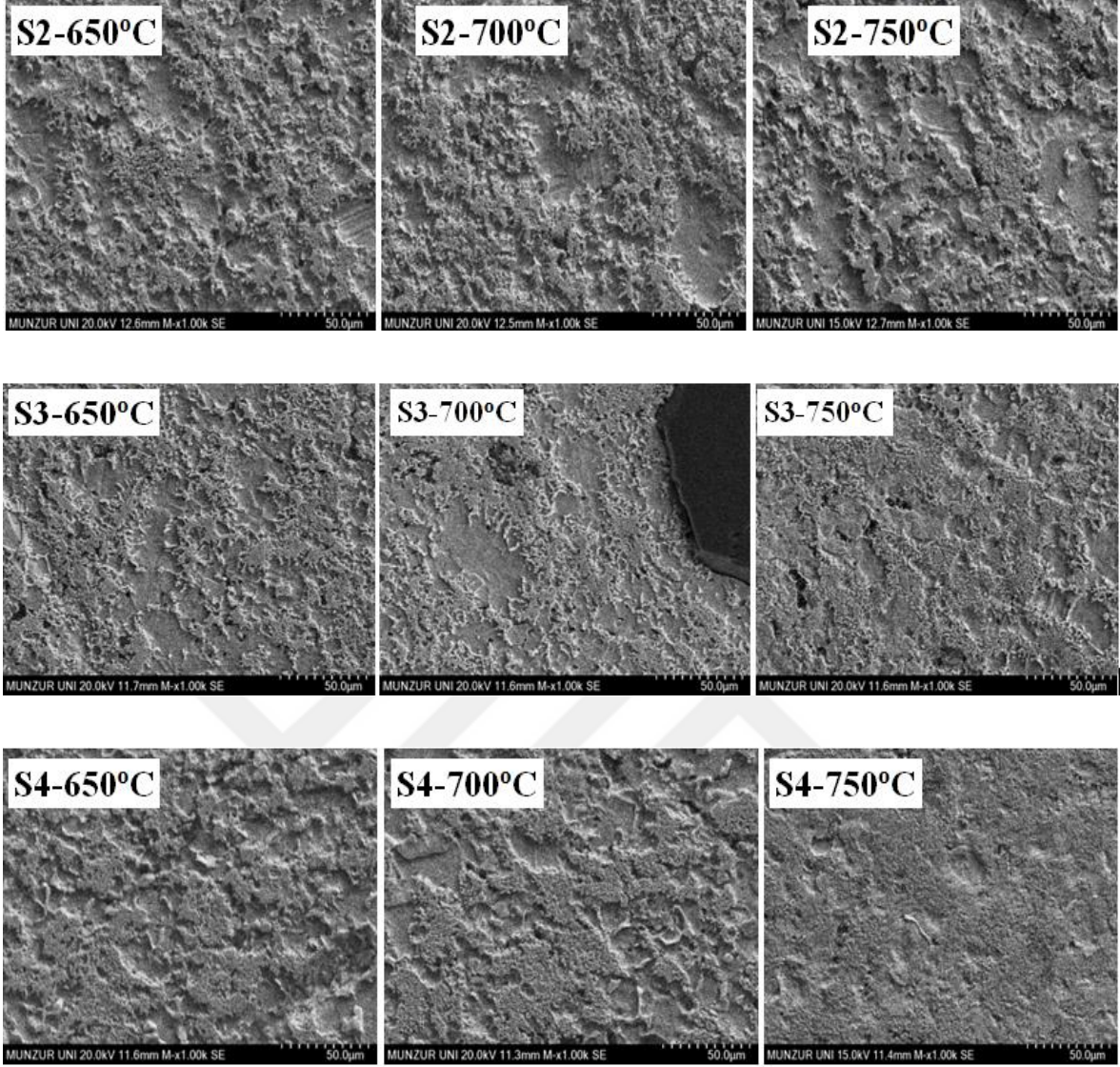
Şekil 8.4'te Ag-Cd içeren S2 (%2 Ag-Cd), S3 (%4 Ag-Cd) ve S4 (%6 Ag-Cd) numunelerinin 650, 700 ve 750 °C sinterleme sıcaklıklarındaki SEM mikroyapı resimleri gösterilmiştir. S2, S3 ve S4 numunelerinde sıvı faz oluşturmak için yapıya katılan ilave edilen AgCd'nin mikroyapıya etkisi gözlemlenmiştir. S2 numunelerinde ağırlıkça %2'lik AgCd ilavesi kısmen mikro gözenekleri azaltmıştır. Sıcaklığın artması ile sıvı fazın yapı içerisinde daha iyi dağılarak poroziteleri doldurduğu gözlemlenmiştir. Katkısız olan S1 numunesinin mikroyapı resimleri ile kıyaslandığında makro porozitelerin varlığı ciddi oranda azalma meydana gelmiştir. Yapı içerisinde bronz zengin bölgelerin azaldığı ve segregasyonun daha az olduğu bir mikroyapı elde edilmiştir. Bu durum sıvı fazın artan sinterleme sıcaklığı ile sıcak presleme esnasında partikül hareketlerini kolaylaştırdığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca bu durum bölgesel tane irileşmesini de engellemiştir. 750 °C yapılan sinterlemede SEM resminden anlaşılacağı gibi oluşan AgCd sıvı fazın Ni-Co

zengin bölgelerdeki mikro poroziteleri doldurduğu gözlemlenmiştir. S3 numunelerinde ise ağırlıkça %4'lük AgCd ilavesinin S2 numunelerine nazaran daha homojen olarak dağıldığı görülmektedir. 650 °C'de sinterlenen S3 (%4Ag-Cd) numunesinde artan sıvı toz oranının etkileri mikroyapı resimlerinden anlaşılacağı gibi belirgin hale gelmektedir. Mikro porozite miktarındaki azalma ve Bronz taneleri Ni-Co arasındaki birleşme daha da arttığı gözlemlenmiştir. Artan sinterleme sıcaklığı ile mikro porozite oranı azalmış ve Ni-Co zengin bölgelerde kısmi açık makro poroziteler oluşmuştur.

750 °C'de yapılan sinterleme işlemi ile makro porozite boyutları küçülmüş ve sıvı faz etkisi ile sinterleme işlemi esnasında partikül hareketleri artarak segregasyonun azaldığı görülmüştür. S4 numunelerinde ise ağırlıkça %6'lık AgCd ilavesi ile tanecikler arasındaki sıvı hal difzyonu ile partiküller arası bağlanmanın oluşmasını kolaylaştırmış ve matris içerisinde daha iyi bir şekilde çözünmüştür. Artan sıvı faz miktarı ile 650 °C'den itibaren mikroyapıda görülen makro porozite miktarı oldukça azalmıştır. Ayrıca Ni-Co zengin bölgelerden yapı içerisinde daha homojen bir dağılım gözlemlenmiştir. 700 °C'de sinterlenen numunede ise Ni-Co adacıkları belirgin hale gelmiştir.

750 °C'de artan Ag-Cd oranı ve sıcaklık etkisine bağlı olarak meydana gelen sıvı faz oluşum miktarı sayesinde neredeyse porozitelerden arınmış bir iç yapı elde edilmiştir. Yapı içerisindeki fazlar daha homojen hale gelmiştir. Ağırlıkça yapılarda bulunan %6 AgCd oranı mikroyapıda AgCd zengin bölgeler oluşumuna neden olmuştur.

Matris içerisine eklenen AgCd homojen bir şekilde dağılmıştır. Matris içerisindeki mikro ve makro poroziteleri doldurarak mikroyapının daha düzenli bir hale gelmesini sağladığı gözlemlenmiştir. 750 °C'de sinterlenen S4 numunesinin sinterleme sıcaklığının artması ve matris içerisindeki AgCd ilavesinin ağırlıkça oranı diğer numunelere göre daha fazla olması nedeniyle partiküller arası bağ oluşumu sıvı faz ile birlikte daha iyi bir şekilde meydana gelmiştir. Genel olarak mikroyapı incelemeleri neticesinde ilave edilen AgCd miktarı ile sinterleme sıcaklığının artması mikroyapılarda değişimlerin iyileştirici düzeyde meydana gelmesini sağladığı görülmüştür.



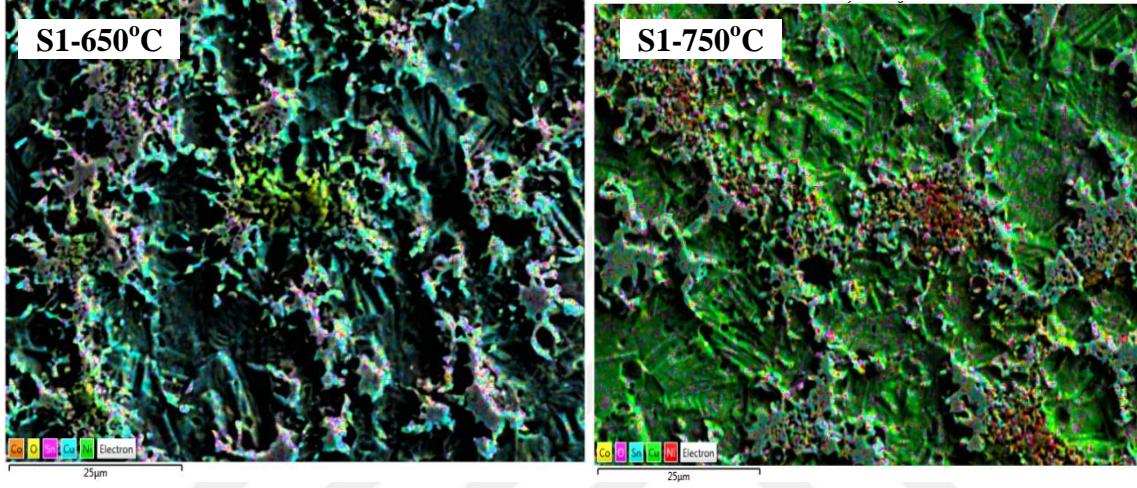
Şekil 8.4. S2, S3 ve S4 numunelerinin mikro yapısal fotoğrafları

Matrise ilave edilen AgCd un matris içerisinde homojen olarak dağılmadığı durumlarda malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri olumsuz yönde etkilenmektedir (Lee ve ark., 2001).

8.3. EDX İncelemeleri

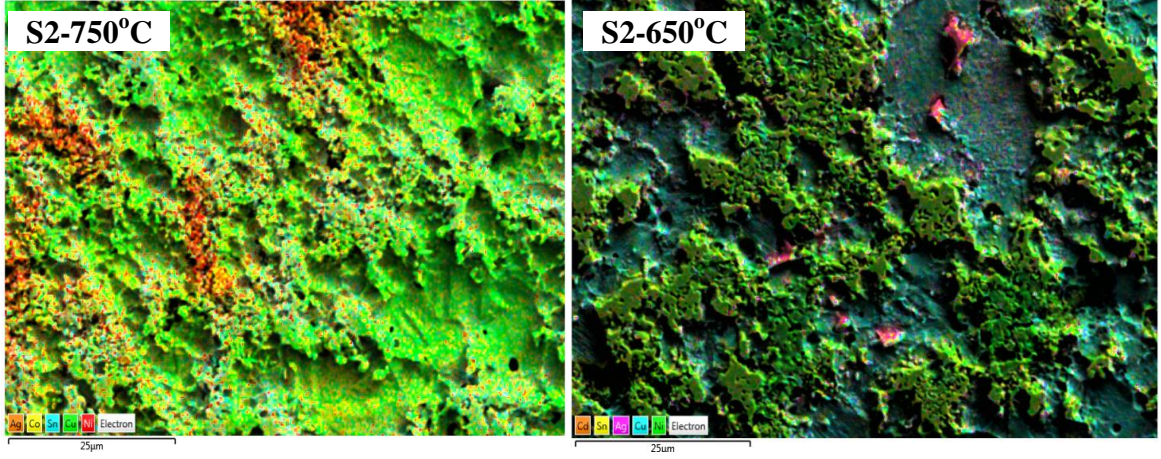
Üretilen numunelerde toz karışımına katılan Bronz, Nikel, Kobalt ve AgCd' in mikroyapı içerisindeki dağılımını daha iyi anlamak amacı ile 650 ve 750 °C'de sinterlenen numunelerin EDX-MAP analizleri yapılmıştır.

Şekil 8.5'te 650 ve 750 °C'de sinterlenen S1 numunesine ait EDX-MAP analiz resimleri gösterilmiştir. Resimler incelendiğinde katkı elemanlarının yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Ni ve Co zengin bölgelerin varlığı Bronz tane sınırlarında mevcuttur. 750 °C'de sinterlenen S1 numunesinde ise sinterleme sıcaklığı etkisinden dolayı Bronz tanelerinde irileşme görülmektedir. Özellikle Nikelin Bronz tane sınırlarında yoğunlaştığı görülmektedir.



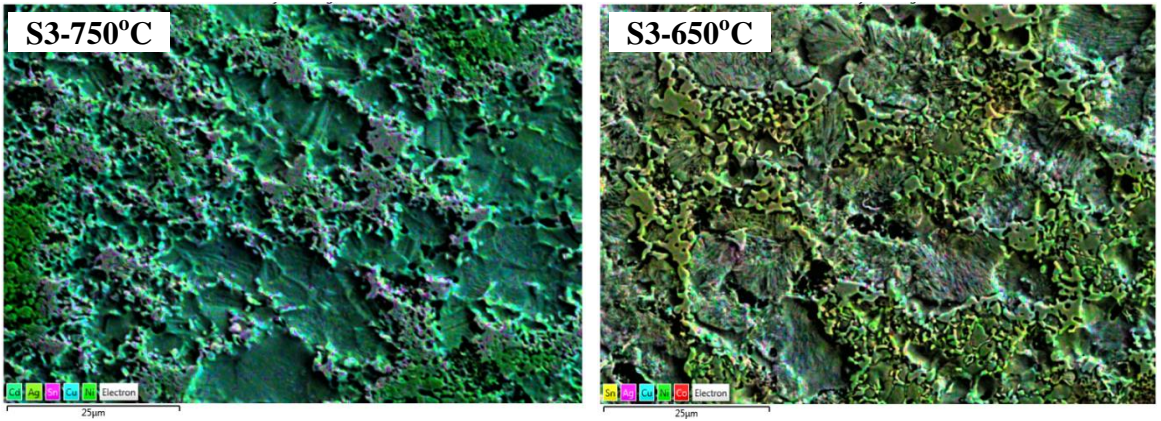
Şekil 8.5 S1 numunelerinin EDX -MAP analiz fotoğrafları

Şekil 8.6'da AgCd katkılı S2 numunesinin EDX-MAP analiz fotoğrafları gösterilmiştir. S1 numunesi ile karşılaştırıldığında AgCd sıvı fazın yapıdaki poroziteleri bir miktar azalttığı görülmektedir. Bronz tanelerinde bir miktar irileşmenin olduğu görülmektedir. Ayrıca Ni-Co zengin bölgelerin daha homojen bir şekilde dağıldığı belirlenmiştir. 750 °C'de sinterlenen S2 numunesinde S1 numunesine göre kıyaslandığında bronzun tane irileşmesi açıkça görülmektedir. Ayrıca AgCd sıvı fazı kapiler etki sebebi ile Ni-Co bölgeleri içerisinde yaklaşık 1-3 mikronluk porozitelerin içerisine nüfuz etmiştir.



Şekil 8.6 S2 numunelerinin EDS -MAP analiz reesimleri

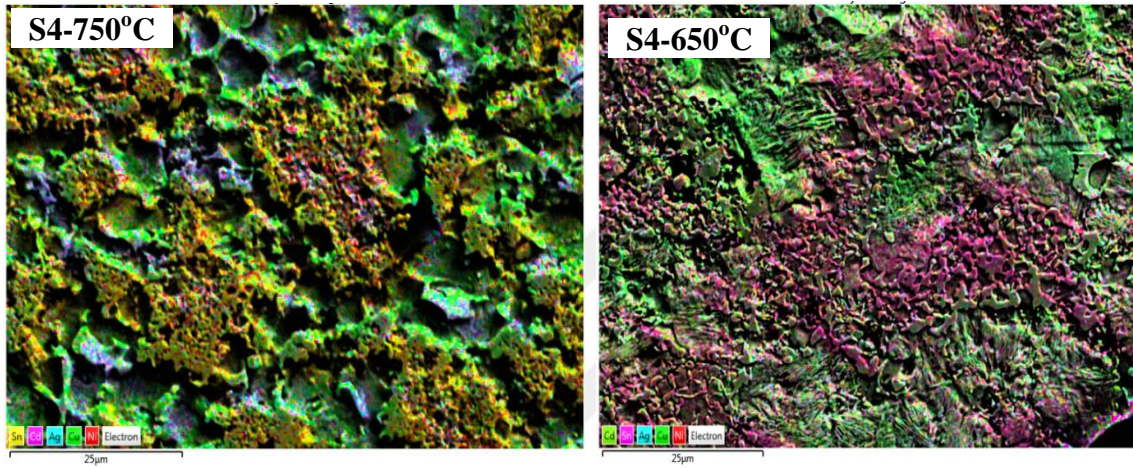
Şekil 8.7’de %4 AgCd sıvı fazı içeren S3 numunesinin EDX-MAP analizi fotoğrafları gösterilmiştir. Sinterlenen S3 numunesi S2 numunesi kıyasla artan AgCd oranı ile tane irileşmesi oranında arttığı görülmektedir. Yine S2 numunesine kıyasla Ni-Co adacıklarının daha yoğun bir yapı şeklinde mikroyapı içerisinde bulunduğu görülmektedir. 750 °C’de sinterlenen S3 numunesinde ise Bronz tanelerinin yapılarında değişiklikler görülmektedir. AgCd sıvı fazın bronzu kısmi olarak çözüldüğü düşünülmektedir. EDX-MAP analiz fotoğraflarından anlaşıldığı üzere Bronz taneleri içerisinde lamelli yapıda AgCd mikroyapı şeritlerinin varlığı mevcuttur. Sıvı fazın neden olduğu partikül hareketleri mikroyapısal değişimlere neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 8.7 S3 numunelerinin EDS -MAP analiz fotoğrafları

Şekil 8.8’de %6 AgCd katkılı S4 numunesinin EDX-MAP analiz fotoğrafları gösterilmiştir. 650 °C’de sinterlenen numunenin mikroyapısının S2 ve S3 numunesinden

oldukça farklı olduğu göze çarpmaktadır. Ni-Co adacıklarının birleşerek yapı içerisinde kısmi lamelli halden küresel hale geldiği görülmektedir. Ayrıca Bronz tanelerinde yapısal şekil değişimi meydana gelmiştir. Sıvı fazın neden olduğu bu şekil değişimi yapı içerisinde bronz taneleri etrafında kısmen mikroyapılarda düzensiz oksit filmlerinin neden olduğu çatlaklara yol açmıştır. Fakat mikroyapısal olarak diğer numunelere göre daha kararlı bir içyapının olduğu düşünülmektedir.



Şekil 8.8 S4 numunelerinin EDS -MAP analizleri

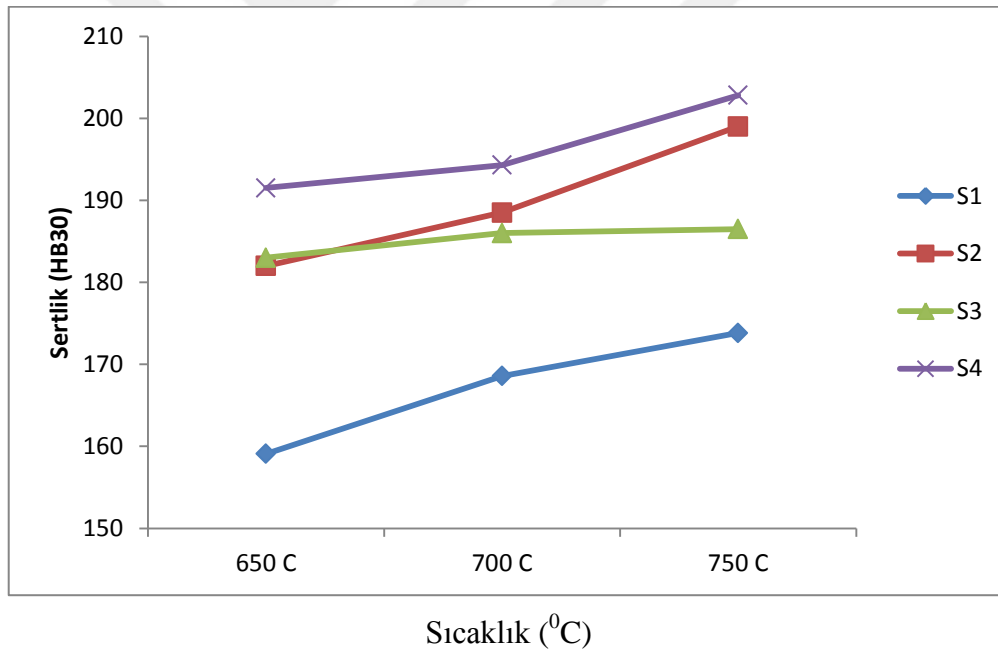
750 °C’de sinterlen S4 numunesinde ise artan sıvı faz oranının neden olduğu partikül hareketleri ve çözünme miktarı nedeni ile Bronz tanelerinin de yapısal değişime yol açtığı düşünülmektedir. Artan sinterleme sıcaklığı etkisi ile Ni-Co adacıklarının boyutları büyümüştür. Bu durumun daha gevrek bir yapıya neden olduğu sonucuna varılmıştır. Sertlik ölçüm değerleri bu durumu desteklemiştir.

8.4. Sertlik Ölçümü

Sıcak presleme tekniği ile üretilen numunelerin sertlik ölçümü HB30 (2,5-187,5) Brinell cinsinden yapılmıştır. Üretilen numunelerin sertlik ölçüm sonuçları Şekil 8.9’da grafikte gösterilmiştir. AgCd katkısız S1 numunesi için 650, 700 ve 750 °C’deki sertlik değerleri sırasıyla 159,08 HB, 168,58 HB ve 173,83 HB’dir. Ağırlıkça % 2 AgCd katkılı numunelerin sertlik değerleri sırasıyla 182 HB, 188,5 HB ve 199 HB’dir. Yine aynı sıcaklıklarda % 4 AgCd katkılı numunelerin sertlik değerleri sırasıyla 183 HB, 186 HB ve

186,5 HB ve % 6 AgCd katkılı numunelerin sertlik değerleri sırasıyla 191,5 HB, 194,3 HB ve 202,8 HB olarak ölçülmüştür.

Grafik incelendiğinde artan AgCd katkı oranı ile numunelerin sertlik değerinin de arttığı görülmüştür. Ayrıca sinterleme sıcaklığının artması ile S1, S2, S3 ve S4 numunelerinin sertlik değerlerinde artış meydana gelmiştir. Sıcaklığın artması ile porozite miktarının azalması ve partiküller arası sıkı bağ oluşumu sağlanmıştır. Bu durum sertliğin artmasına neden olmuştur. Ayrıca AgCd katkısı sıvı faza dönüşerek poroziteleri doldurmuş ve sinterleme esnasında ki partikül hareketlerini kolaylaştırmıştır (Min ve ark., 2007). Bu durum sertlik miktarında artırıcı etki yapmıştır. Sertlik değerlerinin artmasının diğer bir nedeni ise, sıcaklık artışı ile birbiriyle komşu olan toz partikülleri arasında sıvı hal difüzyonu ve partikül hareketi yoluyla iyi bir bağlanmanın olmasıdır (Dewidar ve ark., 2010).



Şekil 8.9. Sinterleme sıcaklığının sertliğe etkisi

Grafik incelendiğinde S3 numunelerindeki sertlik artışının S2 numunesine göre daha yüksek olması gerekirken bir miktar daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin oluşan sıvı fazın kapiler etki neticesinde mikro poroziteleri doldurması ve artan sinterleme sıcaklığı ile makro porozitelerin oluşturduğu yapısal kusurlar olduğu

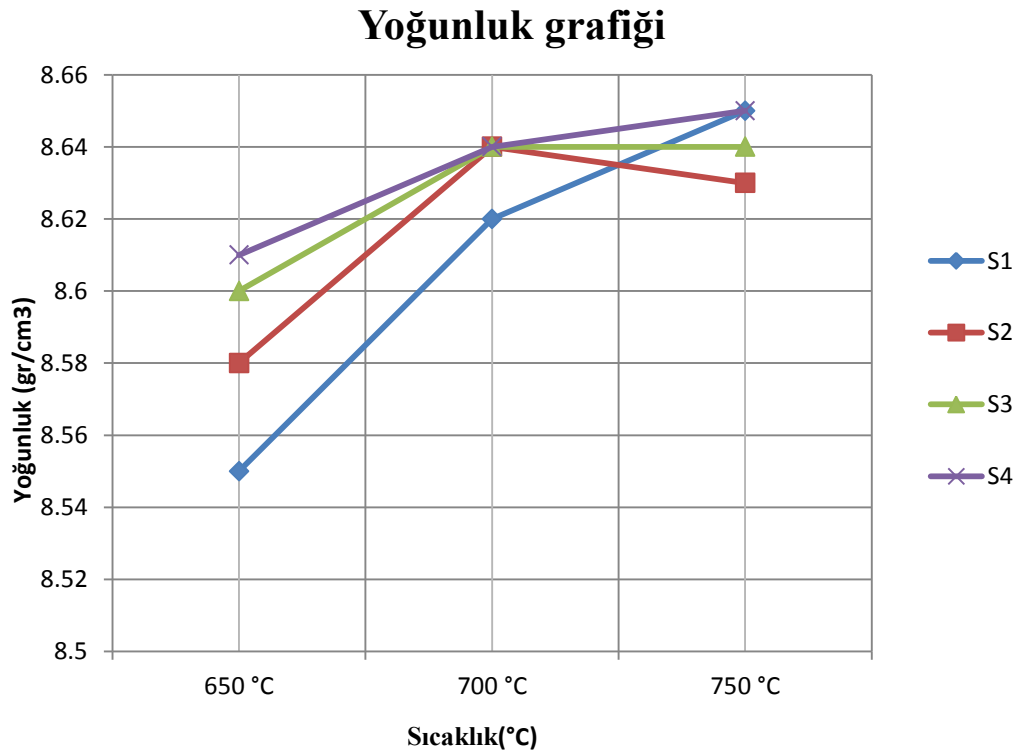
düşünülmektedir. %4 oranındaki AgCd sıvı faz miktarı mukavemet değerinin artması için eşik değer olabileceği sonucuna varılmıştır.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda ve Şekil 8.9' da görüldüğü gibi sıcaklık ile numunelerin sertlikleri arasında bir doğru orantı görülmektedir. Ancak bu doğru orantı belirli bir sıcaklık değerine kadar geçerlidir. (Kim, 2000; Kumar ve ark., 2011).

Sonuç olarak AgCd takviye elemanı matrisin içerisinde çözünerek numunelerin mukavemetine gerekli katkıyı yapmıştır. Ayrıca numune sertliklerinde sıcaklığın artışı ile birlikte arttırıcı bir rol oynadığı görülmüştür.

8.5.Yoğunluk Ölçümü Sonuçları

Sıcak presleme işleminin sinterlenen numunelerin yoğunluk karakteristiklerinin belirlenmesi için numunelerin yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Tüm numunelerin 650, 700 ve 750 °C sinterleme sıcaklıklarındaki yoğunluk değişimi Şekil 8.10'da ki görülmektedir.



Şekil 8.10. Numunelerin sıcaklık-yoğunluk grafiği

Şekil 8.10’da görüldüğü gibi 650 °C numunelerin yoğunlukları 8,49 – 8,58 gr/cm³ arasında değişmekte, 700 °C numunelerin yoğunlukları 8,60 – 8,64 gr/cm³ arasında değişmekte ve 750 °C numunelerin yoğunlukları 8,58 – 8,65 gr/cm³ arasında değişkenlik göstermektedir. Elde ettiğimiz bu veriler doğrultusunda matrise ilave edilen AgCd ‘un artan sıcaklık değerleri ile birlikte yoğunluk üzerinde arttırıcı bir etki yaparak malzemenin yapısını daha sıkı bir forma soktuğu görülmüştür.

Ayrıca tablo 8.1’de sıcak presleme sonucu elde edilen numunelerin teorik ve deneysel yoğunluk değerleri gösterilmiştir.

Tablo 8.1. Farklı sıcaklıklarda sinterlenen AgCd katkılı ve katkısız numunelerin teorik ve deneysel Yoğunlukları

Numune	Teorik yoğunluk (gr/cm ³)	Deneysel yoğunluklar (gr/cm ³)		
		650 °C	700 °C	750 °C
Sıcaklık				
S1	8,67	8,55	8,62	8,65
S2	8,68	8,58	8,64	8,63
S3	8,69	8,60	8,64	8,64
S4	8,70	8,61	8,64	8,65

Artan sinterleme sıcaklıklarında yoğunluklarda artış gözlenmiştir. Sinterleme sıcaklığındaki artış ile teorik ve deneysel yoğunluklar arasındaki fark azalmıştır. Çünkü toz metal partiküllerinin birbirine olan difüzyonu sinterleme sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Bu durum yoğunluğun artmasına neden olmuştur (German, 1996).

Artan sinterleme sıcaklığı, partiküller arasında sıvı faz oluşumunu arttırmış, partiküllerin birbirine olan difüzyonuna arttırıcı etki göstermiştir. (Lima ve ark., 2003). Şekil 8.10’daki grafik incelendiğinde aynı sinterleme sıcaklığında artan AgCd ilavesi ile yoğunluklarda artışın meydana geldiği gözlemlenmiştir. AgCd’un matrisi meydana getiren tanecikler arasında kolaylıkla yayınabilmesi ve tanecikler arasındaki boşlukları kolayca doldurabilmesinden dolayı yoğunluğu arttırdığı muhtemeldir. (Efe ve ark., 2011; German, 2005). Yine sabit sinterleme sıcaklığında artan AgCd ilavesiyle bağıl yoğunluklarda artış meydana gelmiştir. Bu durum artan AgCd oranının sıkıştırılabilirliğe yaptığı olumlu etki ile açıklanabilir (Rahaman, 2003). Artan sinterleme sıcaklıklarında bağıl yoğunluklarda artış gözlenmiştir (Kang, 2005).

AgCd sıvı fazı mikro ve makro poroziteleri doldurmuştur. Bu durum yoğunlukta olduğu gibi diğer mekanik özelliklerinin de gelişmesine yol açmıştır. 750 °C’de sinterlenen

S2 ve S3 numunelerinde yoğunluk değerinin bir miktar azaldığı görülmektedir. Bu durumun nedeninin sıcak presleme işlemi esnasında AgCd eriyiğinin kalıplardan sızarak yoğunluğu bir miktar azalttığı düşünülmektedir.

Tablo 8.2. Bağlı yoğunluk

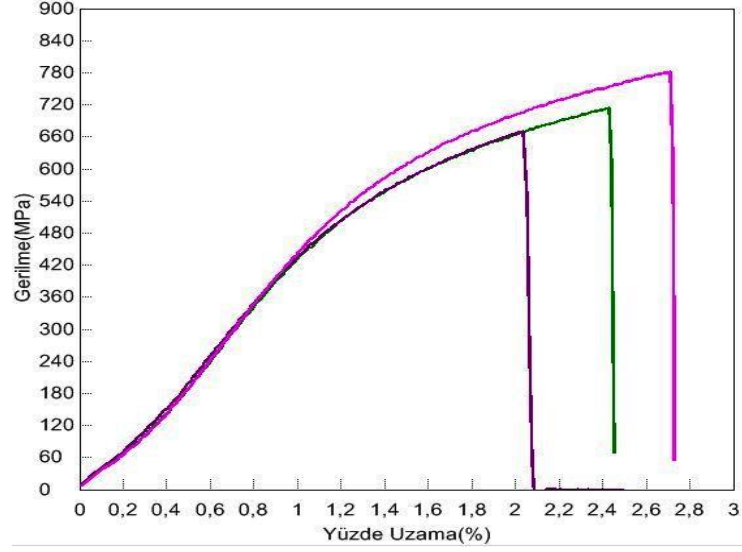
Numune	Teorik yoğunluk (gr/cm ³)	Yüzdece(%) Porozite oranı (gr/cm ³)		
		650 °C	700 °C	750 °C
Sıcaklık				
S1	8,67	1,38	0,57	0,23
S2	8,68	1,15	0,46	0,576
S3	8,69	1,035	0,57	0,575
S4	8,70	1,034	0,68	0,574

8.6. Üç Nokta Eğilme Deneyi İncelemeleri

Yapılan 3 noktalı eğme deneyi ile eğme mukavemeti üzerine sinterleme sıcaklığının ve AgCd ilavesinin etkisi incelenmiştir.

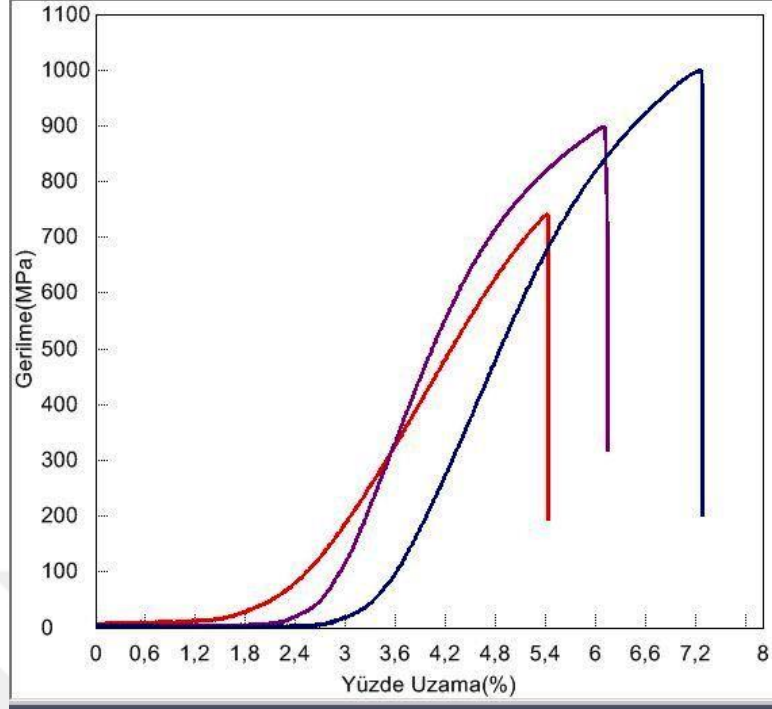
S1, S2, S3 ve S4 numunelerinin tümünde sinterleme sıcaklığının artması ile birlikte eğme dayanımlarında artışın olduğu aşağıda verilen grafiklerde gözlemlenmiştir.

Şekil 8.11’de AgCd katkısız olan S1 numunesinin eğme deneyi sonucu gösterilmektedir. Sırasıyla 650,700 ve 750 °C üretilen numuneler sırasıyla 670, 713 ve 780 MPa gerilme altında sırasıyla %2,1- %2,45 ve %2,72 uzayarak kırılmıştır. S1 numunelerinin eğilme dayanımları sinterleme sıcaklığının artması ile birlikte artış göstermiştir. En yüksek eğilme dayanımına 750 °C de 780 MPa ile ulaşılmıştır. Aynı zamanda sinterleme sıcaklığının uzama miktarını da eğilme mukavemetindeki artışa bağlı olarak bir miktar etkilediği görülmektedir.



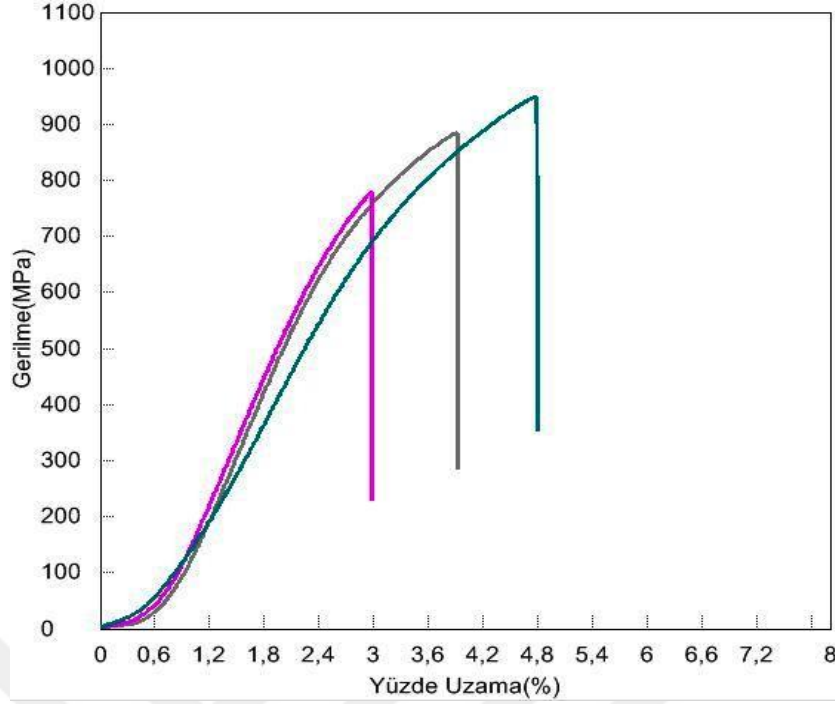
Şekil 8.11. S1 Serisi 3 noktalı eğilme deneyi grafiği

Şekil 8.12’de %2 AgCd katkılı olan S2 numuneleri için üç nokta eğme deneyleri sırasıyla 742, 892 ve 988 MPa gerilmeleri altında sırasıyla % 5,41- %6,09 ve % 7, 25 uzayarak kırılmıştır. S2 numunelerine ilave edilen ağırlıkça %2 AgCd un 3 noktalı dayanımı üzerinde ki etkisi şekil 8.12’de açık bir şekilde görülmektedir. İlave edilen %2 AgCd sayesinde S2 numunelerinin 3 noktalı dayanımları S1 numunelerinden daha mukavemetli olduğu görülmüştür. Yine S2 numunelerinde de sinterleme sıcaklığının artması ile çekme dayanımlarında bir artışın olduğu gözlemlenmiştir. Boyca uzamada, sinterleme sıcaklığından etkilenmiş olup düşük sinterleme sıcaklığındaki boyca uzama ile yüksek sinterleme sıcaklığındaki boyca uzama arasında yaklaşık olarak %1,84’lük bir artış bulunmaktadır (German, 1996).



Şekil 8.12. S2 Serisi 3 noktalı eğilme deneyi grafiği

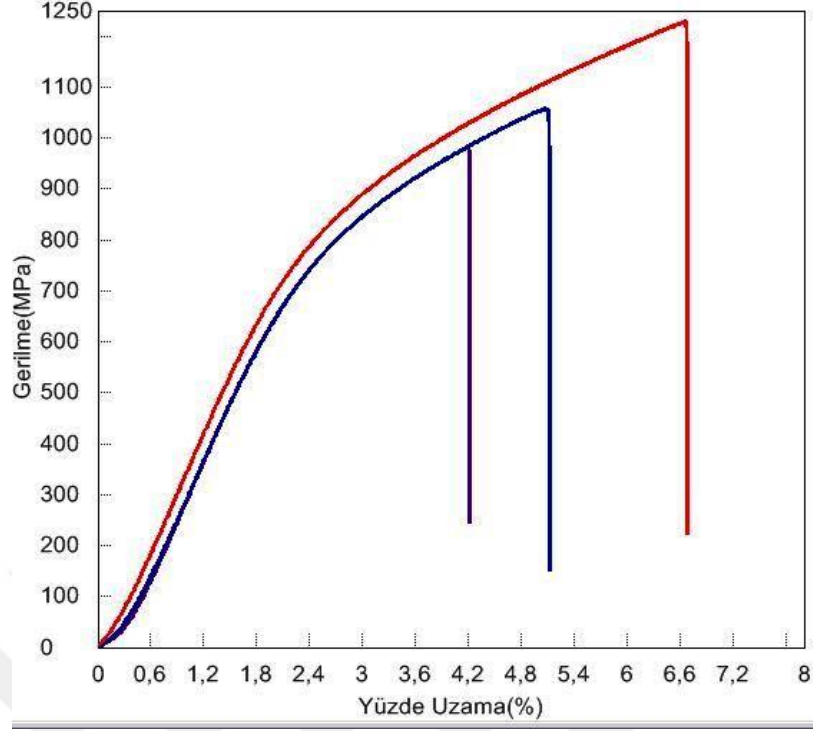
Şekil 8.13'de %4 AgCd katkılı S3 için sırasıyla 778, 884 ve 948 MPa gerilmeleri altında sırasıyla %2,96 - % 3,9 ve % 4,7 uzayarak kırılmıştır. Ağırlıkça %4 AgCd barındıran S3 numunelerinin 3 noktalı eğilme dayanımları S2 numunelerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu duruma matrise ilave edilen AgCd miktarının artırılması neden olmuştur.



Şekil 8.13. S3 Serisi 3 noktali eğilme deneyi grafiği

Şekil 8.14'de %6 AgCd katkılı S4 için sırasıyla 980, 1057 ve 1228 MPa gerilmeleri altında sırasıyla %4,19- %5,07 ve % 6,66 uzayarak kırılmıştır. İçerisinde ağırlıkça %6 AgCd içeren S4 numuneleri en yüksek 3 noktali dayanıma sahip numunelerdir. Matris içerisinde ki AgCd miktarının en fazla olması S4 numunelerinin 3 noktali dayanımlarının en yüksek olmasını sağladığı şekil 8.14'den çıkarılmaktadır. S4 numunesi 750 °C de 1228 MPa eğilme gerilmesi ile en yüksek eğilme dayanımına sahiptir. Bunun yanı sıra 750 °C de boyca uzama miktarı da %6,66 ya kadar çıkabilmiştir.

İlave eleman (AgCd) ile matris ara yüzeyinde genişleme katsayısı farklılığından dolayı gerilim yoğunlaşması meydana gelir. Bunun sonucunda matrisin dayanımını arttıran dislokasyonlar ara yüzeyde oluşur. Sıcaklık arttıkça dislokasyon yoğunluğu daha fazla artar ve matrisin dayanımı da buna paralel olarak artar (Samuel ve ark., 1995). AgCd ilave miktarı arttıkça eğme dayanım değerlerinde artış gözlenmiştir. Bunun sebebi AgCd matris içerisinde daha fazla yer alarak yapı içerisindeki poroziteleri doldurarak malzemeyi daha yoğun bir yapıya ulaştırmasıdır (Dwan, 2007). Mikro yapı ve sertlik sonuçları da elde edilen bu değerleri destekler niteliktedir.



Şekil 8.14. S4 Serisi 3 noktalı eğilme deneyi grafiği

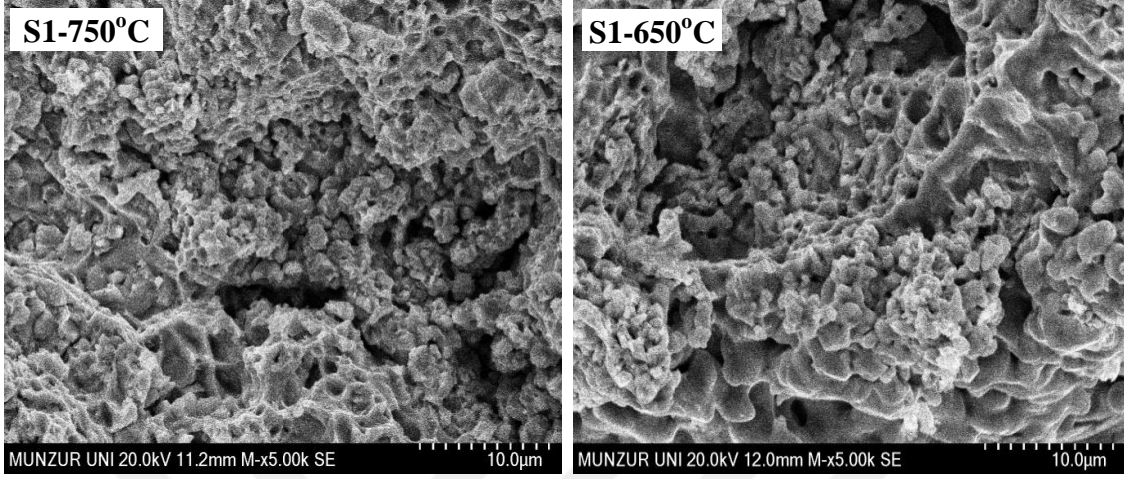
8.7. Kırık Yüzeyler İncelemeleri

Katkısız numunelerin kırık yüzeyleri metal tozlarının birbirine ne derecede tutunabildiğini anlamak ve kırılma ara yüzeyinin anlaşılması amacıyla yapılmıştır. AgCd katkılı numunelerin ise kırık yüzeyleri de alaşıma katılan AgCd ilavesinin yapı içerisinde ne şekilde tutunabildiği ve kırılma esnasındaki ara yüzey durumu hakkında bilgi edinebilmesi için yapılmıştır.

Şekil 8.15’de 650 ve 750 °C’de sinterlenen S1 numunesinin kırık yüzeyleri incelendiğinde 650 °C’de sinterlenen numunenin yüzeyinde çatlaklar ve yırtılmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Yapı içerisinde açık makro porozitenin varlığı mevcuttur. Makro porozitelerin varlığı kırılma mukavemetini olumsuz yönde etkilemiştir. Bronz partikülleri birleşerek yapı mukavemetinin artmasına neden olmuştur.

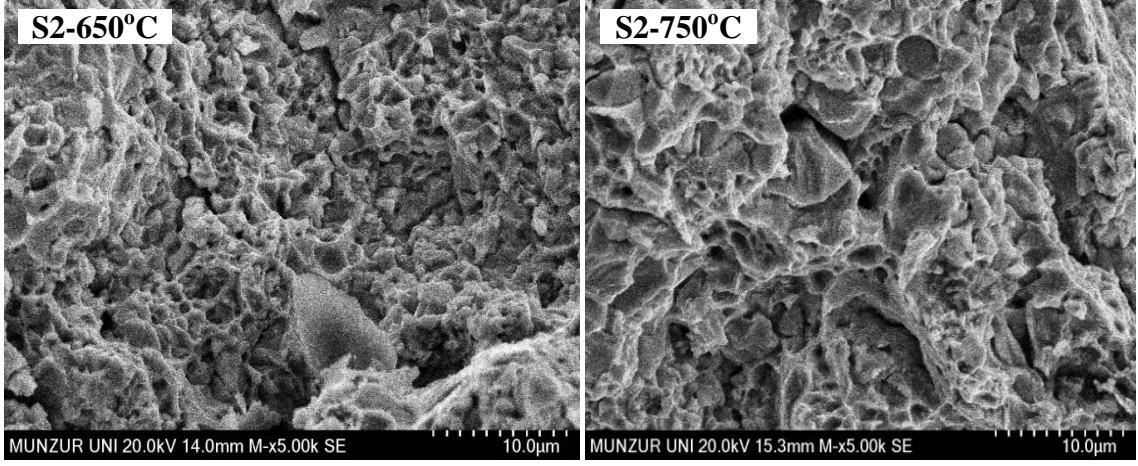
750 °C’de sinterlenen S1 numunesinde ise sinterleme sıcaklığının artması ile matrisi meydana getiren partiküller arası boyun oluşumunun daha fazla olduğu görülmektedir. Yapı içerisinde bulunan çatlaklarda azalma olduğu görülmektedir. Ayrıca Bronz partiküllerinin birleşerek oluşturduğu tanelerin varlığı da söz konusudur. Kırılma

karakteristiğinin gevrek olduğu gözlenmiştir. Ayrıca süngerimsi yapının varlığı da söz konusudur.



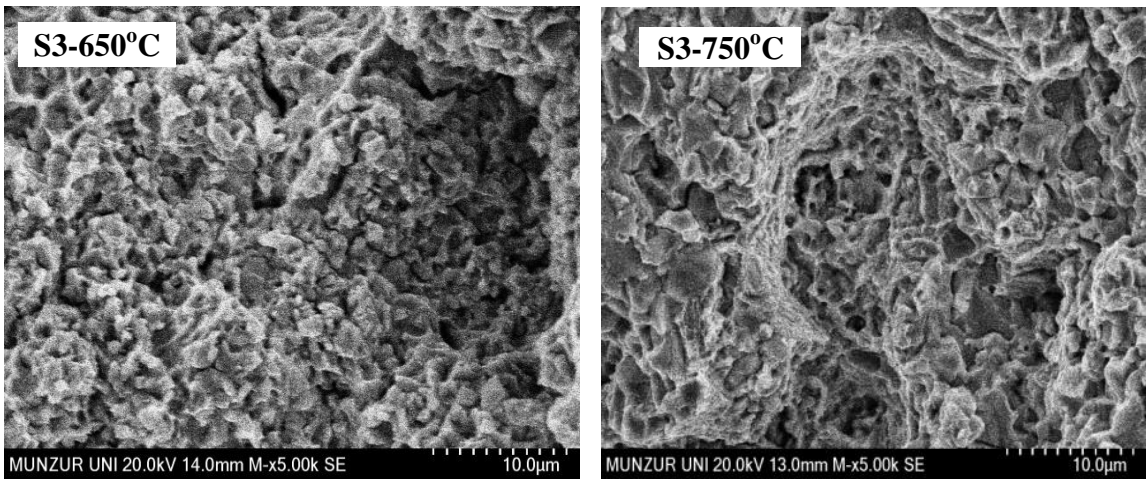
Şekil 8.15. S1 numuneleri kırık yüzey SEM resimleri

Şekil 8.16'da %2 AgCd katkılı S2 numunesinin kırık yüzey SEM fotoğrafı gösterilmiştir. 650 °C'de sinterlenen numune yüzeyinde oyuk ve çatlakların varlığı gözükmemektedir. S1 numunesine göre çatlak miktarı azalmıştır. Ayrıca makro porozite miktarında da bir miktar azalmanın olduğu görülmektedir. Ağırlıklı olarak yapıda mikro poroziteler vardır. Kırılma şeklinin gevrek ve bronz taneleri arasında olduğu gözlemlenmiştir. AgCd sıvı tozu makro porozitelere bir miktar nüfuz etmiştir. 750 °C'de sinterlenen S2 numunesinde ise kırılma yüzeyinin daha düzgün olduğu görülmektedir. Kırılma yüzeyindeki çatlak miktarı sıcaklık etkisi ile azalmış ve çatlaklar arası mesafede düşüş meydana gelmiştir (Schatt, 1997).



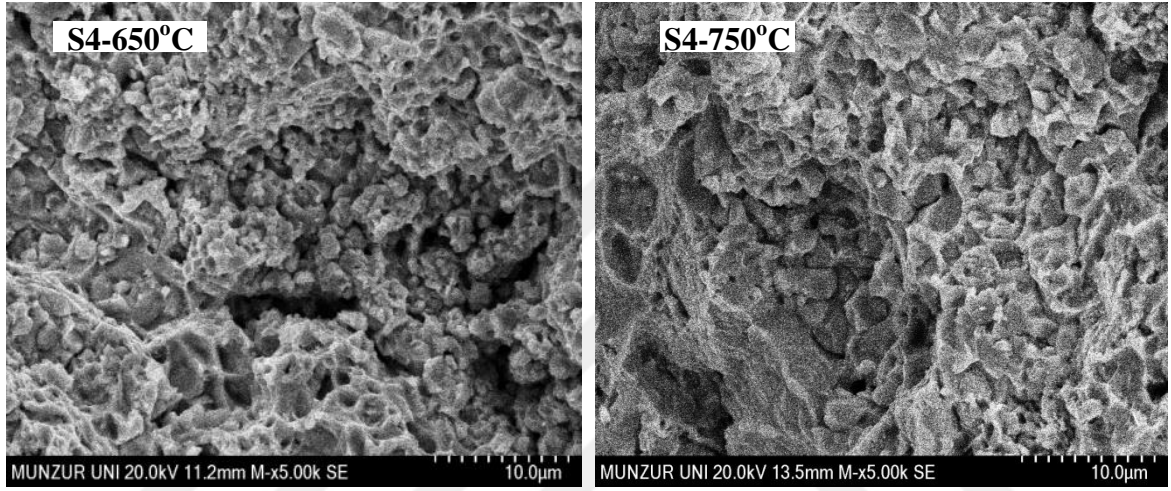
Şekil 8.16. S2 numuneleri kırık yüzey SEM resimleri

Şekil 8.17’de %4 AgCd katkılı S3 numunesinin kırık yüzey SEM fotoğrafı gösterilmiştir. S1 ve S2 numunelerinde olduğu gibi 650 °C’de yapılan sinterleme işleminde yüzeyde dalgalı şekilde bir kırılma meydana gelmiştir. Mikro porozite oranlarında azalmalar görülmektedir. Ayrıca partiküller arası kırılmalar meydana gelmiştir. 750 °C’de sinterlenen S3 numunesinde ise S1 ve S2 numunelerinde olduğu gibi artan sinterleme sıcaklığı ile taneler arası bağların daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca AgCd sıvı fazın Ni-Co zengin bölgelerde oluşan mikro porozitelere kapiler etki ile nüfuz ettiği ve Bronz partiküllerinin etrafını sardığı görülmektedir. Yapı içerisinde tam yoğunlaşmış bölgesel köprülerin varlığı söz konusudur.



Şekil 8.17. S3 numuneleri kırık yüzey SEM resimleri

Şekil 8.18’de %6 AgCd katkılı S4 numunesinin 650 ve 750 °C’deki kırık yüzey SEM fotoğrafları gösterilmektedir. 650 °C’de sinterlenen numunenin kırık yüzeyinde Ni-Co zengin bölgesinde çatlakların varlığı görülmektedir. Artan AgCd miktarı ile yapıdaki çukur miktarları azalmıştır. S1, S2 ve S3 numunelerine göre daha düzgün yüzeyli bir kırılma meydana gelmiştir. Ni-Co partiküllerinin tam olarak birleşmediği yapıda ki Bronz ve oluşan AgCd sıvı tozun kısmen bir bütün haline geldiği görülmektedir. Gevrek şekilde kırılmaların varlığı söz konusudur.



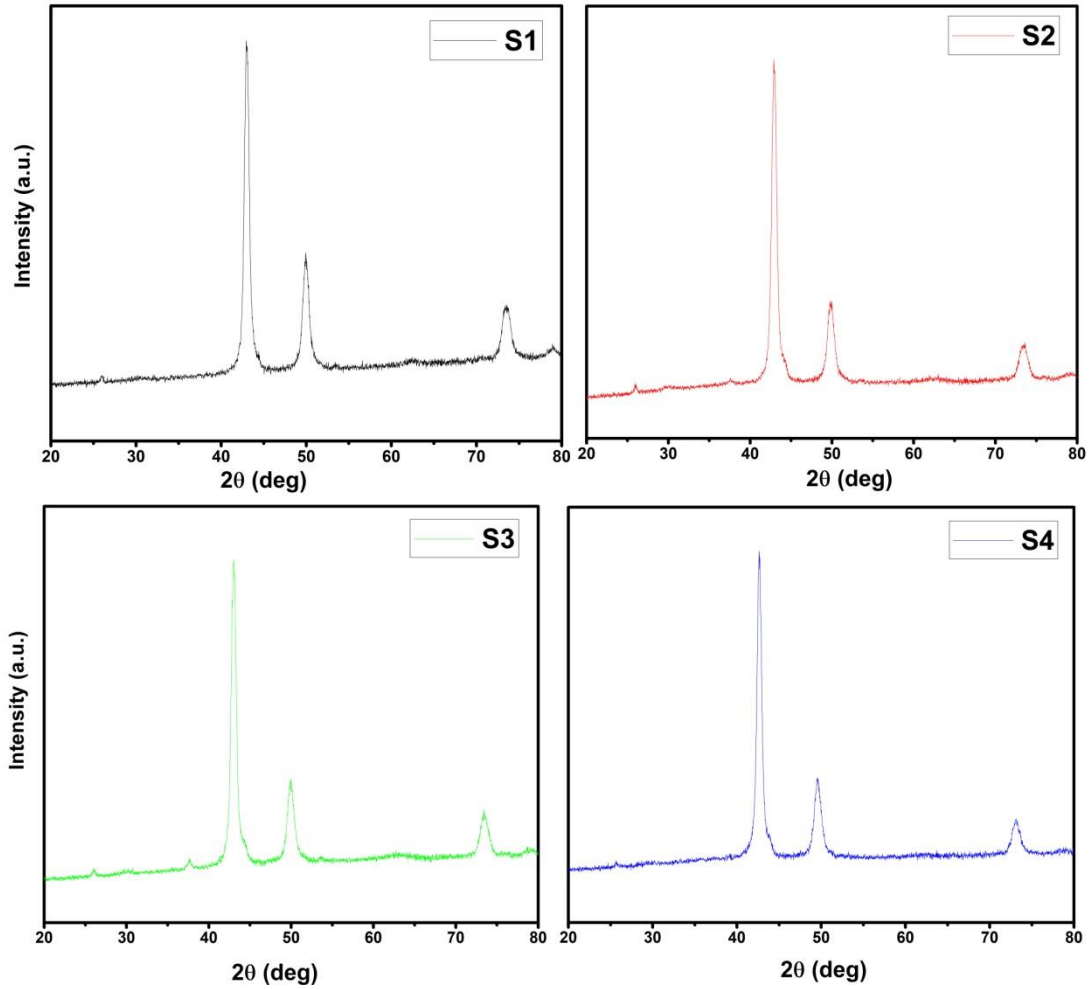
Şekil 8.18. S4 numuneleri kırık yüzey SEM resimleri

750 °C’de sinterlenen S4 numunesinde ise diğer şekilde olduğu gibi sinterleme sıcaklığının etkisi ile sıvı fazın tamamen matris içerisine nüfuz ettiği görülmektedir. Toz partikülleri arasında boyun oluşumu mevcuttur. Bu durum mukavemeti artırıcı şekilde etki etmiştir. Yapı içerisindeki çatlak ve mikro porozite oranı oldukça az seviyededir. Çatlak boyları kısa ve çatlak yüzeyleri arasındaki mesafe oldukça azdır. Taneler arası gevrek kırılma gözlemlenmiştir.

8.8. XRD İncelemeleri

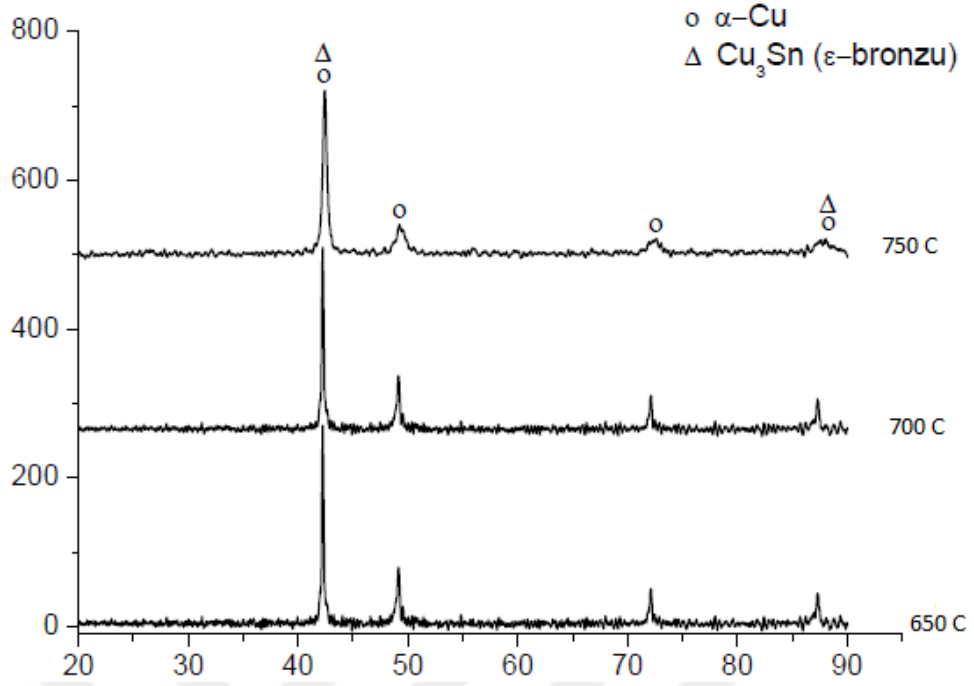
Matris ile AgCd tanecikleri arasında ki ara yüzeylerde tanecikler arası bağlanmayı sağlayacak bir sıvı fazın meydana gelip gelmediğini belirlemek amacıyla üretilen her bir numune için XRD analizleri yapılmıştır. AgCd katkısız S1 matrisinin ve ağırlıkça %2-4-6 AgCd ilaveli S2,S3 ve S4 matrislerinin 750 °C’deki XRD analiz fotoğrafları Şekil 8.19 ‘da

gösterilmiştir. Pikler birbirine çok yakın olduğundan 750 °C'deki inceleme sonuçları gösterilmiştir.



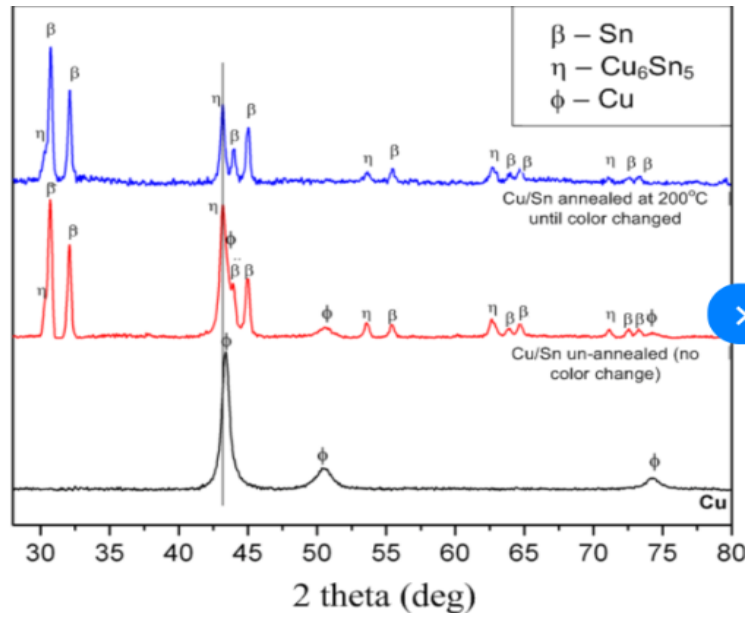
Şekil 8.19. S1-S2-S3-S4 numunelerin XRD analiz grafiği

Şekil 8.20'de gösterilen S1 numunelerinin XRD analiz grafiklerinde de görüldüğü üzere α -Cu ve Cu₃Sn fazları olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca sinterleme sıcaklığının artırılması ile birlikte α -Cu ve Cu₃Sn fazlarının piklerinde genişlemelerin olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 8.20. S1 numunelerin XRD analiz grafiği

Ağırlıkça % 2 AgCd katkılı S2 numunesinin XRD analiz grafiği Şekil 8.20’de gösterilmiştir. S2 XRD analiz grafiğinde görüldüğü üzere Cu_6Sn_5 fazlarının varlığı tespit edilmiştir. Ayrıca S2 numunelerinin XRD analiz grafiğinde sinterleme sıcaklığının artması ile birlikte fazlarda oluşan piklerde genişlemelerin varlığı görülmüştür.



Şekil 8.21. % 2 AgCd katkılı S2 numunelerin XRD analiz grafiği

Ağırlıkça % 4 ve %6 AgCd katkıli S3 ve S4 numunelerinin şekil 8.19’da gösterilen XRD analiz grafiklerinde artan AgCd oranlarında piklerdeki artış grafiklerden açık bir şekilde görülmektedir. Ayrıca artan sinterleme sıcaklığı ile fazların piklerinde genişlemelerin S1 ve S2’ye göre daha belirgin bir şekilde oluştuğu görülmüştür.



SONUÇLAR

Bu çalışmada ağırlıkça %80 Bz, %15 Ni ve %5 Co'tan oluşan matrise ağırlıkça %2, %4 ve %6 AgCd ilave edilerek S1, S2, S3 ve S4 numuneleri sıcak presleme ile elde edilmiştir. Sinterleme işlemi ise 650, 700 ve 750 °C'de gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması sonucunda numunelerin makro yapısı, mikro yapısı, sertlikleri, yoğunlukları, EDX analizleri, XRD analizleri ve 3 noktalı eğilme özellikleri ile ilgili şu sonuçlara varılmıştır;

- Numunelerin makro yapı resimleri incelendiğinde matrisi oluşturan toz partiküllerinin homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Ayrıca yapı içerisinde segregasyon makro yapıda 2.20 mm üstünde mikro poroziteler varlık göstermektedir.
- Cu-Sn denge diyagramı incelendiğinde matrisin ana yapısını oluşturan alaşım bronz (%85 Cu - %15 Sn) β fazı içerisinde Cu'ın katı eriyik oluşturduğu görülmektedir.
- Matrise ilave edilen ağırlıkça %2, %4 ve %6 AgCd'un matris içerisinde homojen olarak bir dağılım sergilemediği durumlarda malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri olumsuz yönde etkilenmektedir.
- Genel olarak mikroyapı incelemeleri neticesinde ilave edilen AgCd miktarı ile sinterleme sıcaklığının artması mikroyapılarda iyileştirici düzeyde değişimlere neden olduğu görülmüştür.
- EDX-MAP analiz resimleri incelendiğinde katkı elemanlarının yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Ni ve Co zengin bölgelerin varlığı Bronz tane sınırlarında mevcuttur. 750 °C'de sinterlenen numuneler incelendiğinde sinterleme sıcaklığı etkisinden dolayı Bronz tanelerinde irileşme görülmektedir. EDX analiz resimleri incelendiğinde Nikelin Bronz tane sınırlarında yoğunlaştığı görülmektedir
- Sinterleme sıcaklığının artması ile birlikte Ni-Co adacıklarının boyutları büyümüştür. Bu durumun daha gevrek bir yapıya neden olduğu sonucuna varılmıştır.
- Matrise dahil edilen AgCd katkı miktarının artması ile AgCd katkısı sıvı faza dönüşerek poroziteleri doldurmuş ve sinterleme esnasında ki partikül hareketlerini kolaylaştırarak numunelerin sertliğini arttırmıştır.

- Sinterleme sıcaklığının arttırılması ile partiküller arası sıkı bağ oluşumu sağlanarak porozite miktarı azalmış ve bu duruma bağlı olarak S1, S2, S3 ve S4 numunelerinin sertlik değerlerinde artış meydana gelmiştir.
- Sonuç olarak AgCd takviye elemanı matrisin içerisinde çözünerek numunelerin mukavemetine gerekli katkıyı yapmıştır.
- Sinterleme sıcaklığının artması ile matrisi oluşturan partiküller arasında sıvı faz oluşumunda artış yaşanmıştır.
- Matrise ilave edilen AgCd'un matrisi oluşturan tanecikler arasında kolaylıkla yayılabilmekte ve böylece tanecikler arasındaki boşlukları kolayca doldurabilmektedir. Bu durum da yoğunluk üzerinde olumlu bir etki yaptığı şekil 8.10'da ki yoğunluk değerlerinde görülmüştür.
- 750 °C'de sinterlenen S2 ve S3 numunelerinde yoğunluk değerinin bir miktar azaldığı görülmektedir. Bu durumun nedeninin sıcak presleme işlemi esnasında AgCd eriyiğinin kalıplardan sızarak yoğunluğu bir miktar azalttığı düşünülmektedir.
- S1, S2, S3 ve S4 numunelerinin tümünde sinterleme sıcaklığının artması ile birlikte eğme dayanımlarında artışın olduğu görülmüştür.
- Matrise ilave edilen AgCd miktarı arttıkça eğme dayanım değerleri de artış göstermiştir. Bunun sebebi AgCd matris içerisinde daha fazla yer alarak yapı içerisindeki poroziteleri doldurarak malzemeyi daha yoğun bir yapıya ulaştırmasıdır.
- Numunelerin kırık yüzey analizleri incelendiğinde yapı içerisinde makro porozitenin varlığı görülmüştür. Yapıda görülen bu makro porozitelerin varlığı kırılma mukavemetini olumsuz yönde etkilemiştir. Ancak Bronz partikülleri birleşerek matrisin mukavemetinin artmasını sağlamışlardır.
- Sinterleme sıcaklığının 650 °C'den 750 °C'ye çıkarılması ile birlikte kırılma yüzeyindeki çatlak miktarları azalmış ve çatlaklar arası mesafede düşüş meydana gelmiştir.

ÖNERİLER

Yapılan tez çalışmasında sıcak presleme işleminde Bronz esaslı bir matris içerisine AgCd alaşım eklenerek başarılı bir şekilde numuneler üretilmiştir.

Elde edilen deneysel bulgular sonucunda;

- %40 Ag içerikli AgCd alaşımının sinterleme işlemlerinde metal matrisli kompozitlerin içerisine katkı ve ıslatıcı eleman olarak katılabilir.
- Elmaslı kesici takımlarda elmas tutunumunu artırıcı etkisi incelenebilir.
- Sıcak presleme süreleri değiştirilerek mikroyapıya etkisi incelenebilir.
- Üretimi yapılan malzemenin elektriksel özellikleri incelenerek kontakt malzemesi olarak özellikleri araştırılabilir.
- Sinterleme sıcaklığının artması ile matris mikro yapısında yeni fazların oluşmayacağı öngörülmüştür.
- Sıvı fazın neden olduğu partikül hareketleri mikro yapısal değişimlere neden olduğu düşünülmektedir.
- S1, S2, S3 ve S4 numunelerinin yoğunluk ölçümlerinde AgCd oranının artırılıp sinterleme sıcaklığının artması ile birlikte yoğunluk değerlerinde artışın olduğu görülmektedir.
- Yüzdece aynı oranda ilave edilen AgCd oranlı numunelerin yoğunluk değerleri sinterleme sıcaklığının artması ile birlikte yoğunluk değerlerinde artış gerçekleşmiştir.

KAYNAKLAR

- Anık, S., Dikicioğlu, A., Vural, M.,** 1999. İmal Usulleri, , İ.T.Ü. Makina Fakültesi.
- ASM Metals Handbook,** 1998. Powder Metal Technologies and Applications 7. ASM International, 1146. USA.
- Aydın, Ş.,** 1997. Toz metalurjisi Yöntemleri ile Elde Edilen Seramik Tanecik Destekli Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Bakan, H.,** 1999. Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilen Cu-%25Cr Elektrik Kontak Malzemesinin Sinterleme Davranışlarının incelenmesi., Doktora Tezi., İ.T.Ü.
- Boz, M.,** 2003. Seramik Takviyeli Bronz Esaslı Toz Metal Fren Balata Üretimi ve Sürtünme- Aşınma Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Ankara.
- Crawson, A.,** 1993. P/M Ferrous Materials, Metal Handbook, 7, 623, New York/U.S.A.
- Çelik, E.,** 2009. Elmaslı Kesici Takımlarda Alternatif Bağlayıcılar, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Dewidar, D., Abdel-Jaber, G.T., Bakrey, M., Badry, H.,** 2010. Effect of Processing Parameters and amount of additives on the Mechanical Properties and Wear Resistance of Copper-based Composite, *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, 10-3, 25-40.
- Dwan, J.D.,** 2007. Fracture toughness determination of diamond impregnated PM cobalt, *Industrial Diamond Review*, 1, 33-36.
- Efe, Ç.G., Altınsoy, İ., İpek, M., Zeytin, S., Bindal, C.,** 2011. Some properties of Cu-SiC composites produced by powder metallurgy method, *Kovove Metallic Materials*, 49(2), 131-136.
- Erdoğan M.,**2011. Toprak İşleme Endüstrisinde Kullanılan Çizici Kalemlerin Mikrodalga Toz Sinterleme Tekniği ile Üretimi ve Karakterizasyonu. Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Erol, E.,**2009. Toz Metalurjisi Ders Notları. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Öğretmenliği, Afyonkarahisar.
- Ersümer, A.,** 1970. Toz Metalürjisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, İstanbul.

- Fatih E.**, 2011. Hızlı Katılaştırma Yöntemi İle Üretilmiş Nikel-Bakır (Monel 400) Alaşımı Tozların Presleme Ve Sinterleme Parametrelerinin İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Trabzon.
- German, R. M.**, 1996. Sintering Theory and Practice. Wiley – Interscience, 568, New York.
- German, R. M.**, 1985. Liquid Phase Sintering, Plenum Press, New York.
- German, R.M.**, 2005. Powder metallurgy and particulate materials processing, *Metal Powder Industries Federation*, USA.
- German, R.M.**, 1984. Powder Metallurgy Science. MPIF, 278. USA.
- German, R.M.**, 2007. Materials Processing Handbook Powder Processing.
- Gessinger, G. H., Fischmeister, H. F., Lukas H. L.**, 1973. A Model for Second Stage Liquid Phase Sintering with a Partially Wetting Liquid, *Acta Met.*, 21, 715-724.
- Gülsoy, Ö.**, 1999. Toz Metalurjisi ile Üretilen Demir Esaslı Yapısal Parçaların Mekanik Özellikleri, Master Tezi, Marmara Üniversitesi.
- Gülsoy, Ö.**, 2003. Paslanmaz Çeliklere Katılan İki Tip Bor ilavesinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- Hatman, A., Karagöz, Ş.**, 1993. 7. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, Su atomize CuZn42 alaşımı tozu üretimi ve su basıncının toz özelliklerine etkileri, 553-565, Ankara.
- Hiçyılmaz, N.**, 1999. Toz Metalurjisi Yöntemleri ile Elde Edilen Seramik Tanecik Destekli Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerin Aşınma Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Höganäs AB**, 2004a. Material and Powder Properties 1. Höganäs Handbook for Sintered Components, Sweden.
- Höganäs AB**, 2004b. Production of Sintered Components Volume 2. Höganäs Handbook for Sintered Components, Sweden.
- James, B.A.**, 1985. Liquid Phase Sintering in Ferrous Powder Metallurgy, *Powder Metallurgy*, 28, 3.
- Kang, S.J.L.**, 2005. Sintering, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Kaya, G.**, 1999. Mechanical Properties of Pm Al-SiC Composites Produced By.
- Kayış, V.**, 2005. Kısmi Ve Ön Alaşımli Demir Tozları İçerisine Katılan B Ve Fe İlavelerin Sinterleme Davranışları Ve Mekanik Özelliklere Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

- Kim, H.S.**, 2000. On the rule of mixtures for the hardness of particle reinforced composites, *Materials Science and Engineering A*, 289, 30-33.
- Kumar, G.B.V., Rao, C.S.P., Selvaraj, N.**, 2011. Mechanical and tribological behavior of particulate reinforced aluminum metal matrix composites—a review, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 10, 59-91.
- Kurgan, N.**, 2005. T/M Paslanmaz Çelik İmplantlarının Üretimi ve Teknolojik Özellikleri Üzerine Bir Araştırma, Celal Bayer Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, Doktora Tezi , 9, 25-46.
- Kurt, A.O.**, 2004. Toz Üretim Yöntemleri ve Sinterleme, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 1-2.
- Lawley, A.**, 1992. Atomization The Production of Metal Powders.
- Lee, D.W., Ha, G.H., Kim, B.K.**, 2001. Synthesis of Cu-Al₂O₃ nano composite powder, *Scripta Materialia*, 44(8-9), 2137-2140.
- Lima, W.M., Velasco, F.J., Abenojar, J., Torralba, J.M.**, 2003. Numerical approach for estimating the elastic modulus in MMCs as a function of sintering temperature, *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144, 698-702.
- Mediha S.**,2007. Toz Metalurjisi ve Uygulamaları Yüksek Lisans Tezi Tasarım ve İmalat Mühendisliği, Koceli.
- Min, K.H., Lee, B.H., Chang, S.Y., Kim, Y.D.**, 2007. Mechanical properties of sintered 7xxx series Al/SiCp composites, *Materials Letters*, 61, 2544-2546.
- Niemi, A. N., Baxa, L. E., Lee, J. K. and Courtney, T. H.**, 1981. Coalescence Phenomena in Liquid Phase Sintering- Conditions and Effects on.
- Okuyama K.**,2007. Sintering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Japan.
- Onur, A.**, 1996. Yağ Atomizasyonu Yöntemiyle Metal Tozu Üretiminin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Özgür Ö.**, 2007. Toz Metalurjisi İle Üretilen Alaşımli Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi Sakarya Üniversitesi Metal Eğitimi, Sakarya.
- Özkal, B.**,1993. Volfram Ağır Alaşımlarında Başlangıç Toz Özelliklerinin Sıvı Faz Sinterlemesi Yoluyla Yoğunlaşma Süreçlerine olan Etkileri, İ.T.Ü., Yüksek Lisans Tezi,İstanbul.
- Pavlovic, M.G., Pavlovic, Lj., J., Ivanovic, E., R., Radmilovic, V., Popov, K., I.**, 2001. The Effect of Particle Structure on Apparent Density of Electrolytic Copper Powder, *Journal of the Serbian Chemical Society* 66 (11-12)923.

- Peelen, J. G.**, 1979. Transparent Hot-Pressed Alumina, I : Hot Pressing of Alumina., Ceramic., 5 (121),70–75.
- Rahaman, M. N.**, 2003. Ceramic Processing and Sintering, 2nd Ed. CRC, 880, New York.
- Šalák, A.**, 1995. Ferrous Powder Metallurgy. Cambridge International Science Publishing, 450, England.
- Samuel, A.M., Gotmare, A., Samuel, F.H.**, 1995. Effect of solidification rate and metal feedability on porosity and SiC/Al₂O₃ particle distribution in an Al–Si–Mg (359) alloy, *Composites Science and Technology*, 53, 301–315.
- Saunders, N., Miodownik, A.P.**, 1990. Bull. Alloy Phase Diagrams, vol. 11, pp. 278-87.
- Sarıtaş, S., Türker, M. ve Durlu, N. (Ed.)**, 2007. *Toz metalurjisi*. Ankara: Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları.
- Sarıtaş, S.**, 1994. Toz Metalurjisi, Makine Mühendisliği el Kitabı, Cilt 1-2 Baskı, Ankara, 64-82, MMO.
- Schatt, W., Wieters, K.P.**, 1997. Powder metallurgy: Processing and Materials. European Powder Metallurgy Association (EPMA), Germany.
- Shaw, T. M.**, 1986. Liquid Redistribution during Liquid Phase Sintering, *Journal of the Ceramic Society.*, 69(1), 27 – 34.
- Stosuy, A.**, 1993. Microstructures of Ferrous Powder Metallurgy Alloys, Atlas of Microstructures of Industrial Alloys, U.S.A.
- Şulan, T.**, 1993. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Geliştirilen 90W7Ni3Fe Ağır Alaşımlarının Sıvı Faz Sinterlemesi Süreçleriyle Üretilmesi ve Karakterizasyonu, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi.
- Upadhyaya, G.S.**, 1996. Powder Metallurgy Technology. Cambridge International Science Publishing,
- Ünlü, M. D.**, 2014. SiC Esaslı Seramiklerin Spark Plazma Sinterleme (SPS) Yöntemi ile Üretimi ve Karakterizasyonu. (Doktora tezi) İstanbul Technical University.
- Ünlü, N. Çavusoglu, L.**, 1995. Toz Metalurjisinin Yaygın Kullanım Alanları, Metal Dünyası, Teknik Yazı, 11-12, İstanbul.
- Yavuz, N., Güner, R.**, 2002. Demir Esaslı Toz Metal Parçaların Elektrik Direnç Kaynağından Optimum Kaynak Şartlarının Belirlenmesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Dergisi, 7(1), 221-228.

Yılmaz, B., 1999. Toz Metalurjisi ile Üretilen, Bağlı Grafitli Demir Parçalarda Kullanılan, Farklı Demir Tozu Cinslerinin Parçalardaki Mekanik Özelliklere Etkisi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, 3-4.

Zhang, M., Zhang, W., Zhang, Y. and Gao, L., 2012. Fabrication, microstructure and mechanical behavior of SiCw-B₄C-Si composite, Materials Science and Engineering A, 552, 410–414.



ÖZGEÇMİŞ

1992’de Elazığ’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ’da tamamladı. 2010 yılında başladığı Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden 2014 yılında mezun oldu. 2014 yılında Munzur Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği bölümünde Yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. Yusuf Kaygusuz evli ve İngilizce bilmektedir.

