

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PROSES KOŞULLARININ T/M YAĞ POMPASI ROTOR
DİŞLİSİNİN YAPI VE ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Metalurji ve Malzeme Müh. Zeynep Nihan YADELİ

**FBE Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı Malzeme Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Tez Danışmanı
Jüri Üyeleri**

**: Yrd. Doç. Dr. Deniz UZUNSOY (YTÜ)
: Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU (YTÜ)
Prof. Dr. Hakan KALELİ (YTÜ)**

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ	1
2. TOZ METALURJİSİ	3
2.1 Yöntemin Tarihçesi	3
2.1.1 Toz metalurjisinde ilk gelişmeler	3
2.1.2 Toz metalurjisinde modern gelişmeler	4
2.2 Toz Metalurjisi Yönteminde Kullanılan Metal Tozlarının ve Toz Metalurjik Parçaların Özellikleri	7
2.2.1 Tozların özellikleri.....	7
2.2.1.1 Tozların kimyasal özellikleri.....	8
2.2.1.2 Tozların fiziksel özellikleri	9
2.2.2 Toz metalurjik parçaların özellikleri	10
2.3 Yöntemin Avantajları ve Dezavantajları	12
2.4 Yöntemin Uygulama Alanları	13
2.5 Toz Metalurjisinin Durumu.....	28
3. TOZ METALURJİSİ SÜREÇLERİ	31
3.1 Demir Tozu Üretimi	32
3.1.1 Demir oksitin redüklenmesiyle demir tozu üretimi.....	32
3.1.1.1 Proses şartları	32
3.1.1.2 Högenäs Ancor MH-100 tipik toz özellikleri.....	35
3.2 Toz Metalurjisiyle Parça Üretiminde İşlem Kademeleri	35
3.2.1 Harmanlama	36
3.2.2 Presleme	36
3.2.3 Sinterleme	38
3.2.4 Sinterleme sonrası yapılan ikincil işlemler	40
3.2.4.1 İnfilitrasyon	43
3.2.4.2 Yağ emdirme	44
3.2.4.3 Boyutlandırma	44

3.2.4.4	İkinci presleme	44
3.2.4.5	Buharlama işlemi	44
3.2.4.6	Talaşlı imalat işlemi	44
3.2.4.7	Çapak alma	45
3.2.4.8	Birleştirme	45
3.2.4.9	Isıl işlem	45
3.2.4.10	Yüzey kaplama	45
4.	SİNERLEME ATMOSFERİNİN TOZ METALURJİK YAPILARA ETKİSİ..	46
4.1	Sinterleme Atmosferinin İşlevleri	46
4.1.1	Atmosfer Çeşitleri	51
4.2	Demir Esaslı Malzemelerin Sinterlenmesi	52
4.2.1	Fe Esaslı Malzemeler için Sinterleme Atmosferleri	52
4.2.2	Endotermik ve Egzotermik Atmosferler	53
4.2.3	Azot Esaslı Atmosferler	54
4.2.4	Ayrışmış Amonyak Atmosferleri	55
4.2.5	Hidrojen Atmosferleri	55
4.3	Demir Tozunun Sinterlenmesi	57
4.3.1	Fe-Grafit tozlarının sinterlenmesi	58
4.3.1.1	Bağlı karbonun etkisi	58
4.3.1.2	Atmosfer bileşiminin etkisi	58
4.3.1.3	Sıcaklığın etkisi	58
4.3.1.4	Sinterleme süresi	60
4.3.1.5	Soğuma hızının etkisi	60
4.4	Fe-Cu Esaslı Tozların Sinterlenmesi	61
4.5	Fe-Cu-Grafit Tozunun Sinterlenmesi	62
5.	OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE TOZ METALURJİSİ	63
5.1	Biyel Kolu	63
5.2	Kam Mili	64
5.3	Toz Metal Yataklar	65
5.4	Vites Kutusu Parçaları	66
5.5	Toz Metalurjisinin Otomotivdeki Diğer Uygulamaları	68
6.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	72
6.1	Toz Numuneye Uygulanan Testler	72
6.1.1	Elek analizi	72
6.1.2	Akışkanlık deneyi	73
6.1.3	Görünür yoğunluk deneyi	74
6.1.4	Toz partiküllerinin SEM incelemesi	75
6.2	Parçaya Uygulanan İşlemler ve Deneyler	75
6.2.1	İç rotor dişlisinden dış çıkarılması	77
6.2.2	Yoğunluk ölçümü	77
6.2.3	Metalografik hazırlık	78
6.2.4	Görüntü analizi	78
6.2.5	Kimyasal analiz	79
6.2.6	Tarama elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları	80
6.2.7	Sertlik ölçümleri	80
6.2.8	Korozyon Deneyi	82
6.2.8.1	Korozyon Hızı Hesaplamaları	83

6.3	Aşınma Deneyi	83
7.	DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARI	87
7.1	Elek analizi.....	87
7.2	Akışkanlık deneyi	87
7.3	Görünür yoğunluk deneyi	87
7.4	Toz partiküllerinin SEM incelemesi.....	88
7.5	Dişlilerin Yoğunluk Ölçümü	89
7.6	Görüntü analizi	91
7.6.1	Dağlama öncesi yapı görüntüleri ve gözeneklilik ölçümü.....	91
7.6.2	Dağlanmış yapı görüntüleri.....	95
7.7	Kimyasal analiz	97
7.8	Tarama elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları	98
7.9	Sertlik ölçümleri	107
7.10	Korozyon Deneyi.....	109
7.11	Aşınma Deneyi	111
8.	GENEL SONUÇLAR ve GELECEK ÇALIŞMALAR.....	118
	KAYNAKLAR.....	121
	ÖZGEÇMİŞ.....	123

SİMGE LİSTESİ

A	Toplam yüzey alanı (korozyon deneyinde)
A	Aşınma hızı
Al	Alüminyum
Al_2O_3	Alüminyumdioksit
BeO	Berilyumoksit
C	Karbon
CaO	Kalsiyumoksit
CH_4	Metan
CO	Karbonmonoksit
CO_2	Karbondioksit
Cr	Krom
Cr_2O_3	Kromoksit
Cu	Bakır
d	Sinterleme öncesi toz partikül çapı
D	Sinterleme sonrası birleşmiş toz partikül çapı
d_0	Elek analizi sonucu hesaplanan toz tane boyutu
ΔG	Ağırlık değişimi (korozyon deneyinde)
Δm	Ağırlık farkı (aşınma deneyinde)
F	Etkiyen kuvvet (aşınma deneyinde)
Fe	Demir
Fe_3O_4	Manyetit
Fe_α	Alfa demiri
Fe_γ	Gama demiri
G_{havada}	Havada ölçülen parça ağırlığı (yoğunluk deneyinde)
G_{suda}	Suda ölçülen parça ağırlığı (yoğunluk deneyinde)
H	Korozyon hızı
H_2	Hidrojen gazı
H_2O	Su
H_2SO_4	Sülfürik asit
HNO_3	Nitrik asit
K	Korozyon hızı katsayısı
L	Boy
L	Alınan yol (aşınma deneyinde)

M	Metal
m	Kütle
Mg	Magnezyum
MgO	Magnezyum oksit
Mn	Mangan
Mn_2O_3	Mangan oksit
Mo	Molibden
MO	Metaloksit
N_2	Azot gazı
$NaCl$	Sodyum klorür
Nb	Niyobyum
NH_3	Amonyak
Ni	Nikel
ρ	Yoğunluk
Pb	Kurşun
$\rho_{ölçülen}$	Ölçülen yoğunluk
ρ_{teorik}	Teorik yoğunluk
S	Kükürt
SiO_2	Silisyumdioksit
Sn	Kalay
t	Süre
TiO_2	Titanyumoksit
V	Hacim
W	En
W	Volfram
W_i	İlk ağırlık
W_s	Son ağırlık
Zn	Çinko
Zr	Zirkonyum

KISALTMA LİSTESİ

<i>ABD</i>	Amerika Birleşik Devletleri
<i>ABS</i>	Anti Bloke Brake System
<i>Atm.</i>	Atmosfer
<i>BMW</i>	Bayerische Motoren Werke
<i>BSE</i>	Back Scattered Electron
$^{\circ}\text{C}$	Santigrad Derece
<i>cm</i>	Santimetre
<i>cm²</i>	Santimetrekare
<i>dak</i>	Dakika
<i>EDS</i>	Energy Dispersive Spectrum
<i>EPMA</i>	European Powder Metallurgy Association
<i>GM</i>	General Motor
<i>gr</i>	Gram
<i>HIP</i>	Hot Isostatic Pressing
<i>HRB</i>	Brinell Hardness
<i>kg</i>	Kilogram
<i>ksi</i>	inch pound
<i>kV</i>	Kilo Volt
<i>M.Ö</i>	Milattan Önce
<i>M.S</i>	Milattan Sonra
<i> added</i>	mgr/gün.dm ²
<i>ml</i>	Mililitre
<i>mm</i>	Milimetre
μm	Mikrometre
<i>mm²</i>	Milimetrekare
<i>MPA</i>	Megapaskal
<i>MPIF</i>	Metal Powder Industries Federation
<i>N</i>	Newton
<i>P/M</i>	Powder Metallurgy
<i>SEM</i>	Scanning Electron Microscope
<i>SİP</i>	Soğuk İzostatik Presleme
<i>T/M</i>	Toz Metallurjisi
<i>y.y</i>	Yüzyıl

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	Bazı alaşımların mukavemet değerleri (Babacan, 2006).....	11
Şekil 2.2	Gözenek miktarının bazı özelliklere etkisi (Babacan, 2006).....	12
Şekil 2.4	T/M parçalarının pazar payları (www.mpif.org)	14
Şekil 2.5	TM demir – çelik üretiminin yıllara göre dağılımı (www.mpif.org)	28
Şekil 3.1	T/M üretim süreci (www.mpif.org)	31
Şekil 3.2	Högenäs prosesi akış şeması; a)Cevherin ve kok-kireçtaşı karışımının hazırlanması ve seramik tüplere doldurulması, b) tünel tipi fırın içinde cevher sünger demire redüklenir, c) sünger demir için tavlama fırını d) tavllanmış sünger demir tozunun karıştırılması ve ambalajlanması (Metals Handbook, 1998).....	33
Şekil 3.3	Toz metalurjisi yöntemine ait imalat aşamaları (Babacan, 2006).....	36
Şekil 3.4	Presleme basamakları (www.mpif.org).....	37
Şekil 3.5	Sinterlemede toz tanelerinin teması, boyun oluşumu ve tek tane haline gelme	39
Şekil 3.6	Sinterlemede metalurjik bağ oluşumu ve gözeneklerin kapanması (Kurt, 1992)....	39
Şekil 4.1	a) T/M de çok kullanılan elementler için metal-metal oksit dengesi; bakır, kobalt, nikel ve kalay oksitler, demir oksitten daha kolay redüklenir b) Demir-demir oksit dengesi (Metals Handbook, 1998).....	48
Şekil 4.2	Atmosferin yoğunlaşma noktası - su içeriği fonksiyonu (Metals Handbook, 1998)	49
Şekil 4.3	(a)Yoğunlaşma noktasının ve sıcaklığını fonksiyonu olarak endotermik gazın karbon potansiyeli, (b) Su buharı içeriği ve yoğunlaşma noktası arasındaki ilişki (Metals Handbook, 1998)	54
Şekil 4.4	Ayrılmış amonyak atmosferinde 30 dakika sinterlenmiş demir tozlarının porozitesi üzerinde sinterleme sıcaklığının etkisi. Büyütme 300X a) preslenmiş durum b) 1065°C’de c) 1120°C’de d) 1175°C’de sinterlenmiştir.(Metals Handbook, 1998).....	57
Şekil 4.5	Sinterleme sıcaklığının Fe + %1.25 grafitli test çubuklarının enlemesine kopma dayanımı üzerindeki etkisi (6.1 gr/cm ³ yoğunluğa kompaktlanmış ve verilen sıcaklıklarda 30 dakika sinterlenmişlerdir) (Metals Handbook, 1998).....	59
Şekil 4.6	Sinterleme sıcaklığının Fe+ %1.25 grafitli test çubuklarının mikroyapısı üzerindeki etkisi (Dağlayıcı: % 4 pikral + % 5 nitrik asit. Büyütme 800X) a) Sinterleme sıcaklığı 1010 °C bağlı karbon %0.1 dayanım 138 MPa b) Sinterleme sıcaklığı 1040 °C bağlı karbon %0.75 dayanım 352 MPa c) Sinterleme sıcaklığı 1120 °C bağlı karbon %0.75 dayanım 552 MPa d) Sinterleme sıcaklığı 1175 °C bağlı karbon %0.75 dayanım 655 Mpa (Metals Handbook, 1998)	59
Şekil 4.7	a) Sinterleme süresine karşın kopma dayanımı değişimini, b) Sinterleme süresine karşın boyutsal değişimi göstermektedir. 30. dakikaya kadar dayanımda hızlı bir artış vardır. İlerleyen sürelerde de dayanımdaki artış devam eder (Metals Handbook, 1998).....	60
Şekil 5.1	TM biyel kolu (www.metaldyne.com)	64
Şekil 5.2	Kam mili (www.corvettemuseum.com)	65
Şekil 5.3	Toz metal krank mili yatağının üst kısmı (www.metaldyne.com).....	66
Şekil 5.4	Yüzeyi yoğunlaştırılmış T/M bir helisel dişli (Sözen, 2006)	67
Şekil 5.5	TM vites kutusu parçası (www.ipmd.net)	67
Şekil 5.6	Toz metal ABS sensör rotoru (www.jagbits.com).....	68
Şekil 5.7	Sıcak şekil verilmiş T/M çember dişli (www.metalpowderproduct.com)	69
Şekil 5.8	T/M yakıt pompası dişlileri (www.rockmetalproduct.com)	69
Şekil 5.9	T/M kavrama göbeği ve baskı plakası (www.ipmd.net)	70
Şekil 5.10	T/M senkromeç dişlisi (www.sintermetal.com).....	70

Şekil 6.1	Titreşimli elek cihazı ve eleklerin yerleşiminin şematik görünümü	73
Şekil 6.2	<i>Hall</i> düzeneği	74
Şekil 6.3	Tarama elektron mikroskobu (JEOL 5410 LV).....	75
Şekil 6.4	TPA-100 FRAY marka presleme cihazı ve preslenmiş parça	76
Şekil 6.5	MAHLER marka sinterleme fırını ve sinterlenmeye giren parçalar	76
Şekil 6.6	<i>Standart</i> marka mekanik testere.....	77
Şekil 6.7	Metalografik hazırlık cihazları a) Zımparalama cihazı b) Parlatma cihazı	78
Şekil 6.8	<i>LEICA</i> marka görüntü analiz cihazı ve bilgisayar düzeneği.....	79
Şekil 6.10	A) Rockwell sertlik cihazı B) Mikrovickers sertlik cihazı.....	81
Şekil 6.11	Dış profili ve sertlik alınan bölgeler 1. dış üstü, 2. merkez, 3. sol kenar, 4. sağ kenar	81
Şekil 6.12	Korozyon deney düzeneği	82
Şekil 6.13	<i>Nüve DS 030</i> laboratuvar tipi etüv	82
Şekil 6.14	Aşınma deney cihazı	84
Şekil 6.15	Hassas terazi.....	85
Şekil 7.1	Toz numunenin SEM mikroyapı görüntüleri A) 500X, B) 100X.....	88
Şekil 7.2	EDS ile elementlerin spektral dağılımı	89
Şekil 7.3	Yoğunluğun sinterleme atmosferinin % C potansiyeline bağlı değişimi	90
Şekil 7.4	Sinterlenmemiş parçanın 10X büyütme görüntüsü	91
Şekil 7.5	%0.2 C atmosferde sinterlenmiş parçanın 10X büyütme görüntüsü.....	92
Şekil 7.6	%0.4 C atmosferde sinterlenmiş parçanın 10X büyütme görüntüsü.....	92
Şekil 7.7	%0.6 C atmosferde sinterlenmiş parçanın 10X büyütme görüntüsü.....	93
Şekil 7.8	%0.8 C atmosferde sinterlenmiş parçanın 10X büyütme görüntüsü.....	93
Şekil 7.9	%0.2 C atmosferinde sinterlenen parçanın dağlanmış görüntüsü (40X büyütme) ..	95
Şekil 7.10	%0.4 C atmosferinde sinterlenen parçanın dağlanmış görüntüsü (40X büyütme)	96
Şekil 7.11	A) %0.6 C atmosferinde sinterlenen parçanın dağlanmış görüntüsü (40X büyütme).....	96
Şekil 7.11	B) %0.6 C atmosferinde sinterlenen parçadaki yapıların görüntüsü.....	97
Şekil 7.12	%0.8 C atmosferinde sinterlenen parçanın dağlanmış görüntüsü (40X büyütme)	97
Şekil 7.13	Sinterlenmemiş parçanın farklı bölgelerindeki mikroyapı görüntüleri A) Dış üst kenarı 50X, B) Dış merkezi 350X, C) Dış dibi 350X.....	99
Şekil 7.14	Sinterlenmemiş parçanın EDS analiz spektrumu.....	99
Şekil 7.15	%0.2 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın farklı bölgelerindeki mikroyapı görüntüleri A) Dış üst kenarı 750X, B) Dış merkez bölgesi 750X	100
Şekil 7.15	(Devamı) %0.2 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın farklı bölgelerindeki mikroyapı görüntüleri C) Dış dibi 750X.....	101
Şekil 7.16	%0.2 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın EDS analiz spektrumu	101
Şekil 7.17	%0.4 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın farklı bölgelerindeki mikroyapı görüntüleri A) Dış üst kenarı 750X, B) Dış merkez bölgesi 750X, C) Dış dibi 750X.....	102
Şekil 7.18	%0.4 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın EDS analiz spektrumu	103
Şekil 7.19	%0.6 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın farklı bölgelerindeki mikroyapı görüntüleri A) Dış üst kenarı 750X (Compo), B) Dış merkez bölgesi 750X (BSE), C) Dış dibi 750X (BSE)	104
Şekil 7.20	%0.6 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın EDS analiz spektrumu	104
Şekil 7.21	%0.8 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın farklı bölgelerindeki mikroyapı görüntüleri A) Dış üst kenarı 750X, B) Dış üst kenarı 75X.....	105
Şekil 7.21	(Devamı) %0.8 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın farklı bölgelerindeki mikroyapı görüntüleri C) Dış merkezi 750X	106

Şekil 7.22	%0.8 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın EDS analiz spektrumu	106
Şekil 7.23	Sertlik(HRB) – sinterleme atmosferi %C potansiyeli	107
Şekil 7.24	Mikrovickers (HV) – sinterleme atmosferinin %C potansiyeli.....	108
Şekil 7.25	24. ve 48. saat sonunda parçaların fotoğrafları	109
Şekil 7.25	(Devamı) 72. ve 96. saat sonunda parçaların fotoğrafları	110
Şekil 7.26	Korozyon deneyi boyunca ölçülen ağırlıklara bağlı grafik	111
Şekil 7.27	Aşınma hızının yoğunluk değerine bağlı değişimi.....	112
Şekil 7.28	Aşınma hızının sertlik değerine bağlı değişimi.....	113
Şekil 7.29	%0.2 C atmosferinde sinterlenen parçanın aşınma mikroyapıları A) 50X, B)150X,	113
Şekil 7.29	(Devamı) %0.2 C atmosferinde sinterlenen parçanın aşınma mikroyapıları C)500X, D)1000X.....	114
Şekil 7.30	%0.4 C atmosferinde sinterlenen parçanın aşınma mikroyapıları A)50X, B)150X.....	114
Şekil 7.30	(Devamı) %0.4 C atmosferinde sinterlenen parçanın aşınma mikroyapıları C)500X D)1000X	115
Şekil 7.31	%0.6 C atmosferinde sinterlenen parçanın aşınma mikroyapıları A) 50X, B)150X	115
Şekil 7.31	(Devamı) %0.6 C atmosferinde sinterlenen parçanın aşınma mikroyapıları C)500X D)1000X.....	116
Şekil 7.32	%0.8 C atmosferinde sinterlenen parçanın aşınma mikroyapıları A)50X, B)150X	116
Şekil 7.32	(Devamı) %0.8 C atmosferinde sinterlenen parçanın aşınma mikroyapıları C)500X, D)1000X.....	117

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	Toz metalurjisinde başlıca tarihsel gelişmeler (Metals Handbook, 1998)	6
Çizelge 2.1	(Devamı) Toz metalurjisinde başlıca tarihsel gelişmeler (Metals Handbook, 1998).....	7
Çizelge 2.2	Standart elek analiz takımı (Kurt, 1992).....	9
Çizelge 2.3	Bazı elementlerin mekanik özelliklere etkisi (www.turktoz.gazi.edu.tr)	11
Çizelge 2.4	Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998).....	14
Çizelge 2.4	(Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998).....	15
Çizelge 2.4	(Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998).....	16
Çizelge 2.4	(Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998).....	17
Çizelge 2.4	(Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998).....	18
Çizelge 2.4	(Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998).....	19
Çizelge 2.4	(Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998).....	20
Çizelge 2.4	(Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998).....	21
Çizelge 2.4	(Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998).....	22
Çizelge 2.4	(Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998).....	23
Çizelge 2.4	(Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998).....	24
Çizelge 2.4	(Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998).....	25
Çizelge 2.4	(Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998).....	26
Çizelge 2.4	(Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998).....	27
Çizelge 2.4	(Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998).....	28
Çizelge 3.1	Toz bileşimi (Metals Handbook, 1998).....	35
Çizelge 3.2	Yoğunluk - Ham Dayanım (Metals Handbook, 1998)	35
Çizelge 3.3	Elek analizi (Metals Handbook, 1998)	35
Çizelge 3.4	İkincil işlemler, uygulandığı parçalar ve uygulanma amaçları (Babacan, 2006). 41	
Çizelge 3.4	(Devamı) İkincil işlemler, uygulandığı parçalar ve uygulanma amaçları (Babacan, 2006)	42
Çizelge 3.4	(Devamı) İkincil işlemler, uygulandığı parçalar ve uygulanma amaçları (Babacan, 2006)	43
Çizelge 4.1	Tipik sinterleme fırını şeması (Metals Handbook, 1998).....	47
Çizelge 4.2	Yoğunlaşma noktası-hacimce su içeriği değerleri (Metals Handbook, 1998).....	49
Çizelge 4.3	Başlıca fırın atmosferlerinin bileşimleri (Metals Handbook, (1998)	56
Çizelge 4.4	Soğutma hızının demir - grafit numuneleri üzerindeki etkisi 6.1 gr/cm ³ ham	

yoğunluk, 1120°C de 30 dakika sinterleme (Metals Handbook, 1998)	61
Çizelge 5.1 Kamların kimyasal bileşimi (Sözen, 2006).....	64
Çizelge 5.2 T/M otomotiv parçaları ve parçalarda kullanılan tozlar (Babacan, 2006).....	71
Çizelge 7.1 Elek analizi tablosu	87
Çizelge 7.2 Ağırlık ve hacim değerlerine göre görünür yoğunluk	88
Çizelge 7.3 EDS ile tozun kimyasal analizi	89
Çizelge 7.4 HÖGENÄS tarafından yapılan toz numuneye ait kimyasal analiz	89
Çizelge 7.5 Parçaların havadaki ve sudaki ağırlıklarına bağlı yoğunluk değerleri	90
Çizelge 7.6 Yüzeysel gözenek değerleri	94
Çizelge 7.7 Teorik yoğunluğa ve ölçülen yoğunluğa bağlı hacimsel gözenek değerleri.....	95
Çizelge 7.8 Optik emisyon spektrometresi kimyasal analiz sonuçları	98
Çizelge 7.9 Sinterlenmemiş parçanın EDS ile ölçülen kimyasal analiz verileri	100
Çizelge 7.10 %0.2 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın EDS ile ölçülen kimyasal analiz verileri	101
Çizelge 7.11 %0.4C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın EDS ile ölçülen kimyasal analiz verileri	103
Çizelge 7.12 %0.6C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın EDS ile ölçülen kimyasal analiz verileri	105
Çizelge 7.13 %0.8 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın EDS ile ölçülen kimyasal analiz verileri	106
Çizelge 7.14 Bölgelere göre ölçülen sertlik değerleri ve ortalama değerler	107
Çizelge 7.15 Korozyon deneyi öncesi ölçülen parça ağırlıkları	109
Çizelge 7.16 Korozyon hızı	111
Çizelge 7.17 Aşınma deneyi grafik verileri	112

ÖNSÖZ

Çalışmalarım ve araştırmalarım boyunca tezimin gelişmesinde yardımlarını ve hoşgörüsünü eksik etmeyen ve yaptığı olumlu eleştirilerle tezimin bu aşamaya gelmesini sağlayan tez danışmanım Sayın Yard. Doç. Dr. Deniz UZUNSOY’a öncelikle teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim sırasında “Yurtiçi Yüksek Lisans Burs Programı” ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK-BİDEB’e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez çalışmalarına konu olan numunelerin tedarikini sağlayan TOZ METAL A.Ş. Kalite departmanından Met. Müh. Cengiz BOZACI Bey’e ve tüm tez çalışmam boyunca manevi desteğini benden hiçbir zaman eksik etmeyen aileme ve hayat arkadaşım Met. Müh. Caner YEŞİLDAL’a teşekkürlerimi sunarım.

PROSES KOŞULLARININ T/M YAĞ POMPASI ROTOR DİŞLİSİNİN YAPI VE ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Toz metalurjisi (T/M) ürünlerinin tipik örneklerinden biri yağ pompalarında kullanılan rotorlardır. Karmaşık şekilli parçaların seri üretimi için uygun maliyetli tek üretim yöntemi toz metalurjisidir. Bu çalışma farklı karbon (C) potansiyeline sahip sinterleme atmosferlerinde işlem görmüş T/M rotorların mikroyapılarının ve mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı bir değerlendirilmesini sunmaktadır. İşlem atmosferi söz konusu yağ pompası komponentinin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmuştur. Yağ pompası yapısının belirlenmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılım spektrumu (EDS) ve görüntü analiz işleminin bir kombinasyonu kullanılmıştır. Sinterlenmiş rotor parçalarının mikroyapısı genellikle demir partiküllerinin birbirine bağlı ağlarından oluşmuştur. Aynı zamanda T/M rotorların tüm özelliklerini optimize etmek üzere diş bölgesi boyunca yapı incelenmiş ve farklı karbon atmosferlerinde sinterlenmiş parçalara aşınma testleri uygulanarak aşınma hızları ölçülmüştür.

Anahtar sözcükler: Yağ pompaları, T/M rotorlar, sinterleme atmosferi, mikroyapı, özellik, aşınma

THE INFLUENCE OF PROCESS CONDITIONS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF P/M OIL PUMP ROTOR

ABSTRACT

One of the typical examples of powder metallurgy (P/M) product is rotors used in oil pumps. PM provides the unique, cost effective mass production method for the intricate shape components. This thesis presents a comparative evaluation of the microstructure and mechanical properties of P/M rotors processed in a range of sintering atmospheres. The processing atmosphere had a significant effect on the microstructure and mechanical properties of this automotive oil pump component. A combination of scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrum (EDS), image analysis was used for the identification of the structure of the oil pumps. The microstructure of the sintered rotor components generally consisted of interconnected network of iron particles. In order to optimise the overall properties of P/M rotors, examination of the structure along the tooth region was realized and sintered components in different carbon potential atmospheres were subjected to wear tests to specify wear ratios.

Keywords: Oil pumps, P/M rotors, sintering atmosphere, microstructure, property, wear

1. GİRİŞ

Günümüzün gelişen teknolojisi, ileri teknoloji malzemelerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Toz metalurjisi bu tür malzemelerin üretilmesinde kullanılan modern bir imalat yöntemidir. Özellikle döküm yöntemi ile şekillendirilemeyen ve plastik şekillendirme ile yeterince iyi özellikler kazandırılmayan malzemelerin üretimi için toz metalurjisi tercih edilmektedir.

Toz metalurjisi çok sayıda avantajı ile parça üretiminde mantıklı çözümler sunan yüksek verimlilikte bir yöntem olmasına rağmen bazı dezavantajları da mevcuttur. Ancak gerekli şartlar sağlanarak dezavantajları minimum seviyeye indirerek başarılı bir üretim gerçekleştirilebilmektedir. Enerji tasarrufu sağlayan, hurda üretiminin az olduğu, dökümle üretilmeyecek kadar girintili şekillerin hızlı ve yeterli dayanımda üretilmesi için en uygun yöntem olan toz metalurjisinin günümüzde birçok sektörde kullanımı giderek artmaktadır.

Kaliteli üretim için malzeme seçiminin büyük önem taşıdığı otomotiv sektöründe, toz metalurjisi yöntemi ilk defa 1927 yılında yatak malzemesi üretiminde kullanılmıştır. Müşteri memnuniyeti için malzemelerin yeterli dayanıklılığa sahip olmaları gerekmektedir. Örnek olarak binek araçlar için yağ pompasının ömrünün en az 200.000 km olması istenmektedir. 200.000 km'lik bu süreç içinde yağ pompası ve dolayısıyla pompada kullanılan malzemeler görevini en iyi şekilde yapmalı, aşınmamalı, yakıt tüketimini arttırmamalı ve motor performansını olumsuz yönde etkileyecek herhangi bir problem çıkarmamalıdır. Yağ pompasından beklenen özelliklere bakıldığında toz metalurjisi otomotiv sektörü için çok önemli bir tekniktir. Çünkü bu yöntem ile üretilen parçalar, sürtünen yüzeylerindeki gözenekleri sayesinde yağı tutarak aşınma dayanımını artırırken sürtünmeyi de azaltırlar, yine gözenekli yapıları sayesinde düşük ağırlığa sahiptirler. Yağ pompası gibi içinde dinamik parçalar barındıran elemanlarda düşük ataletleri sayesinde toz metalurjik ürünler motordaki yakıt tüketimine olumlu katkılar yapmaktadır.

Bu çalışmayla üretim tekniği toz metalurjisi olan 4 silindirli içten yanmalı motor yağ pompası iç rotor dişlisinin en yüksek kalitede üretimi için uygun proses şartları, malzeme özelliklerinin karakterizasyonu ile ortaya konulmuştur. Karakterizasyon; aşınma ve korozyon testleriyle, taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılım analizi (EDS) ve görüntü analiz işleminin bir kombinasyonu ile gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın 2. bölümünde toz metalurjisi yöntemi hakkında genel bilgiler verilerek yöntemin tarihçesi, gelişimi, uygulama alanları ve dünyadaki durumu kısaca anlatılmıştır. Çalışmanın 3. bölümünde toz metalurjisi yönteminin işlem kademeleri ayrıntılı şekilde açıklanmıştır.

Çalışmanın 4. bölümünde sinterleme atmosferleri ve bu atmosferlerin toz metalurjisi ile üretilen parçalara etkisinden söz edilmiştir. Çalışmanın 5. bölümünde toz metalurjisinin otomotiv sektöründeki uygulamaları resimli örneklerle anlatılmıştır. Çalışmanın 6. bölümünde Toz Metal A.Ş tarafından tedarik edilen, farklı karbon potansiyeline sahip sinterleme atmosferlerinde sinterlenen iç rotor parçalarına ve parçaların üretiminde kullanılan tozdan alınan örneğe yapılan çeşitli fiziksel, kimyasal ve mekanik deneyler açıklanmıştır. Çalışmanın 7. bölümde toz numuneye ve iç rotor parçalarına uygulanan deneylerin sonuçları belirtilmiştir. Çalışmamızın 8. bölümünde ise genel sonuçlar irdelenerek dikkat edilmesi gereken konular belirtilmiş ve bundan sonra yapılabilecek çalışmalar önerilmiştir.

2. TOZ METALURJİSİ

Toz metalurjisi üç ana işlem aşamasını barındıran şekillendirme ve üretim tekniğidir. Öncelikle birincil malzeme fiziksel olarak birçok küçük parçaya ayrılarak toz hale getirilir. Daha sonra tozlar, nihai ürün ölçülerine oldukça yakın, zayıf kohezif yapı (soğuk basınç kaynağıyla) oluşturmak üzere bir kalıba doldurulur ya da kalıp içinden geçirilir. En son aşamada ise basıncın, yüksek sıcaklığın ve tozların birbirlerine kaynadığı sürenin veya bunların farklı şekilde kombinasyonlarıyla nihai ürün elde edilmektedir. (www.wikipedia.org)

2.1 Yöntemin Tarihçesi

Toz metalurjisi kayıp yöntem olarak anılır. Yazılı tarihin ilk evrelerinde kil ve diğer seramik malzemelerden farklı olarak metalik süs eşyaları için kalıplama ve pişirme yöntemi, sadece zaman zaman uygulanmıştır. Metal malzemelerin sinterlenmesi, 18.yy.'ın sonlarında farklı yöntemlerle platinyum tozu üretiminin gerçekleşmesiyle tekrar rağbet görene kadar, takip eden yüzyıllarda tamamen unutulmuştur.

Altın, bakır, bronz gibi metal tozları ve tozlaştırılmış oksitler (özellikle demir oksit ve pigment olarak kullanılan diğer oksitler) seramiklerde ve kozmetik ürünlerinde boya-mürekkep esası olarak yazılı tarihin başlangıcından beri kullanılmışlardır. Tozlaştırılmış altın ilk el yazmalarını süslemek için kullanılmıştır. Bu tozların nasıl üretildikleri bilinmemekte ancak metal ergitmeden sonra granülasyonla üretilmiş olmaları muhtemeldir. Zira bu yöntem özellikle altın tozu gibi düşük ergime noktalı ve oksitlenme dirençli malzemeler için tercih edilen yöntemdir. Pigmentler ve dekoratif amaçlar için bu tozların kullanımı gerçek toz metalurjisi uygulaması değildir çünkü modern yöntemin başlıca özellikleri; tozu üretmek, tozları bir bütün oluşturacak şekilde basınç altında preslemek ve ana bileşenin ergime sıcaklığı altında olan sıcaklığa ısıtmaktır (Metals Handbook, 1998).

2.1.1 Toz metalurjisinde ilk gelişmeler

Metallerin ergime noktalarına ulaşabilecek fırınlar geliştirilmeden çok önce toz metalurjisi prensipleri kullanılmıştır. M.Ö. 3000 yıllarında alet edevat yapımı için Mısırlılar sünger demir kullanmışlardır. Nihai şekiller basit dövme işlemleriyle elde edilmiştir. Çoğu kez büyük miktarda metalik olmayan empürite içeren ürüne rağmen dikkat çekecek şekilde yoğun ve sağlam yapılar ortaya çıkarılmıştır. Demir oksitin indirgenmesinin eski zamanlardan kalma bir diğer örneği ise 6.5 ton ağırlığındaki *Delhi Pillar* imalat uygulamasıdır.

Toz metalurjisi uygulamaları, *Columbus*'un 1492 yılında Yeni Dünya'ya yaptığı deniz seferi öncesinde *İnka*'lar ve ataları tarafından platinyum yapımında kullanılmıştır. Kullanılan teknik, düşük ergime sıcaklığına sahip bağlayıcının birleşme reaksiyonunu temel almakta ve şu anda kullanılan sinterlenmiş karbür yapma tekniğine benzemektedir. Çalışma öncesindeki ısıtma difüzyonu, rengin, sinterlenmiş malzemedeki sarıdan nihai metaldeki beyazımsı platinyuma dönüşümüne sebep olmaktadır. Yeterli ısıtmanın, üfleme borularıyla havalandırılan odun kömürü ateşi sayesinde başarıldığı düşünülmektedir. Bu alaşımların analizleri önemli miktarda farklılıklar göstermektedir. Platinyum içeriği %26 ile %72, Altın içeriği ise %16 ile %64 arasında değişmektedir. Gümüş katkısının %3 ile %15 arasında değiştiği, bakır miktarının ise %4'lere kadar çıktığı tespit edilmiştir (Metals Handbook, 1998).

2.1.2 Toz metalurjisinde modern gelişmeler

1900'ler ile I.Dünya savaşı arasındaki periyotta ve 1920'lerin sonlarında infiltrasyon teknikleri, gözenekli malzemeler, radyo ayar aygıtları için demir tozu esasları, toz metalurjik kalıcı magnetler ve volfram-bakır-nikel ağır metal bileşimleri geliştirilmişti. II. Dünya savaşı başlangıcında demir tozu teknolojisi ticari olarak gelişimine Avrupa'da başladı. Toz metalurjisiyle üretilmiş demir esaslı malzemelerin en göz alıcı gelişimi, II. Dünya savaşı sırasında askeri mermiler için parafin emdirilerek sinterlenmiş Fe-sevk çemberlerinin yaygın olarak kullanıldığı Orta Avrupa'da oldu. Alman toz metalurjistleri bu tekniği, hafif ateşli bir silah mermisini kaplamakta kullanılan ve nadir bulunan yumuşak tombak (%5–10 Zn) kullanımının yerine geçecek kadar verimli bulmuşlardır. Üretim bu uygulama için ayda 3500 tona ulaşmıştı.

Otomotiv sektörüne seri üretimin gelişi Fe ve Cu tozlarının yüksek tonajlarda kullanımını ve modern toz metalurjisi sektöründeki birçok teknolojik gelişmenin doğmasını sağlamıştır. Otomobil, otomotiv sektörüyle ilgisiz birçok T/M uygulaması için dahi temel olmuştur. İlk ticari T/M uygulaması 1927'de bir otomobilde kullanılan kendini yağlayan yatak malzemesidir. Gözenekleri içinde kılcal çekimle yağ tutabilecek gözenekli yatak bronzu üretmek üzere Cu-Sn toz kombinasyonundan yararlanılmıştır. Aynı dönemde kendini yağlayan yatak malzemeleri buzdolabı kompresör parçası olarak ev aletleri piyasasına da giriş yapmıştır.

1940'lardan 1950'lerin başlarına kadar Cu tozu ve kendini yağlayan yatak malzemesi toz metalurjisinin başlıca ürünleriydi. O zamandan beri Fe tozu ve dişliler, kamlar gibi toz metalurjik çelik parçalar sektörde baskın durumdadırlar. Cu tozu T/M için önemini korurken

yılda yaklaşık 30000 ton tüketilmektedir ancak 200000 tonla Fe ve Fe esaslı tozlar, Cu'nun kullanımını gölgelemektedir.

II. Dünya savaşının bitimi ve özellikle havacılık sektörü ile nükleer teknolojinin gelişimiyle refrakterlerin ve volfram, molibden, niyobyum, titanyum, tantalum gibi reaktif metallerin ve berilyum, uranyum, zirkonyum, toryum gibi nükleer metallerin toz metalurjisiyle ilgili gelişmeleri geniş alana yayılmış durumdadır (Metals Handbook, 1998).

Bütün refrakter metaller cevherlerinden kazanılır, işlenir ve T/M teknikleri kullanılarak şekillendirilirler. Reaktif metallerde daha yüksek saflık kazanmak ya da bu metalleri diğer metal veya metalik olmayan maddelerle birleştirmek ve olağan dışı özellikler kazanmak için genellikle T/M kullanılır. Nükleer enerji tesisleri genellikle uranyumoksitin toz metal (ör; Al) matrisi içinde dağıtılmasıyla elde edilmiş yakıt elemanları kullanmaktadır. Bu kontrol çubukları ve nötron kalkanları Ni, Cu, Fe ya da Al matrisi içinde bor tozları kullanıyor olabilir. Kalkan komponentleri gibi talaşlı işlem içeren karmaşık yapıları bölgelerdeki uygulamalar için genellikle Ni yada Cu tozlarıyla birleştirilmiş W kullanılmaktadır (Kobalt-60 konteyneri). Havacılık sektöründe berilyum ve titanyum yaygın olarak kullanılmaktadır. Roket etekleri, külahlar ve ısı kalkanları genellikle Nb'den oluşturulmaktadır. Mo füzelerde ve motor komponentlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Uzayda arama araçlarında kullanılan roketlerin nozulları kritik boyutsal toleransları sağlayabilmek için T/M işlemleri sayesinde W'dan yapılmıştır.

1950'ler ve 1960'lar T/M dövme ürünlerinin ortaya çıkışına tanıklık etmişlerdir. Bunlar üretimleri tozdan başlayan tam yoğun metal sistemleridir. Sıcakta izostatik olarak preslenmiş süperalaşımlar, T/M dövme ürünleri, T/M takım çelikleri, merdane sıkıştırımlı şerit ve dispersiyonla sertleştirilmiş bakır örnekleridir.

Son zamanlardaki T/M teknolojisi, devlet destekli araştırmalarla (ABD) jet motoru komponentlerinin daha yüksek performans-daha düşük maliyetlerle üretilebilmesi için birincil olarak süper alaşımlardaki geniş kapsama odaklanmış durumdadır. 1970'lerin sonlarında T/M işlenmiş ürünleri kapsayan deneysel programlar, özellikle T/M takım çelikleri ve dövme ürünleri şeklinde, kar amaçlı sektörlerle taşmaya başladı.

T/M dövme ürünler özelliklerin artık yoğunlukla uyum içinde olmaması gerektiğini işaret etti. T/M'nin alaşımlama esnekliğini ve son ya da sona yakın tasarım özelliklerini birleştirebilen tam yoğun komponentler çok kolaylıkla satılabilir. 1970'lerin sonları ve 1980'lerin başları, segregasyonun bertaraf edilmesi ve tam homojen, ince taneli, gözeneksiz, yüksek alaşımlı

yapının temin edilmesi için T/M tekniklerinin tanınmasında önemli bir metalurjik buluşa tanıklık etti. T/M işlenmiş metaller olarak kategorize edilerek, çok yüksek saflıktaki metal tozları ve sıcak izostatik presleme (HIP) gibi gelişmiş birleştirme teknikleriyle mükemmelliğe yol gösterdiler. Aynı zamanda 1980'ler ultra hızlı katılaşma ve enjeksiyon kalıplama teknolojisinin ticarileşmesini de gördü (Metals Handbook, 1998).

Çizelge 2.1 Toz metalurjisinde başlıca tarihsel gelişmeler (Metals Handbook, 1998)

Tarih	Gelişme	Köken
M.Ö. 3000	Alet edavat yapımı için Sünger Demir	Mısır, Afrika, Hindistan
M.S. 1200	Platinyum tanelerinin birleştirilmesi	Güney Amerika (İnka'lar)
1781	Ergiyebilen Pt-Ar alaşımı	Fransa, Almanya
1790	Ticari olarak Pt-Ar kimyasal kaplarının üretimi	Fransa
1822	Pt tozunun katı ingot formu	Fransa
1826	Pt toz kompaktının ticari anlamda yüksek sıcaklık sinterlemesi	Rusya
1829	Pt süngerinden Wollaston yöntemiyle kompakt Pt üretimi (Modern T/M esaslı)	İngiltere
1830	Farklı metal kompaktlarının sinterlenmesi	Avrupa
1859	Pt füzyon işlemi	
1870	Metal tozlarından yapılmış yatak malzemesi patenti (kendini yağlayan yatakların öncüsü)	Amerika
1878–1900	Akkor lamba filamanları	Amerika
1900 lerin başı	Kompozit metaller, Gözenekli metaller ve metalik filitreler	Amerika

Çizelge 2.1 (Devamı) Toz metalurjisinde başlıca tarihsel gelişmeler (Metals Handbook,1998)

Tarih	Gelişme	Köken
1915–1930	Semente karbürler	Almanya
1920 – 1940	Kendini yağlayan metaller (ticari kullanım)	Amerika
1940 – 1950	Fe tozu teknolojisi	Orta Avrupa
1950 – 1960	T/M işlenmiş ve dispersiyonla sertleştirilmiş ürünler	Amerika
1970 – 1980	(HIP) T/M takım çelikleri, süperplastik ve süperalaşımlar	Amerika
1980 ler	Hızlı katılaşma ve enjeksiyon kalıplama teknolojisi	Amerika

Ticari toz metalurjisi şu anda yüksek gözenekli metal filitreler, kendini yağlayan yataklar ve kontrollü yoğunluktaki T/M parçalardan tam yoğun T/M dövme metal sistemlerine kadar çok geniş bir yelpazede yayılmıştır. Toz metalurjisindeki ana gelişmeler çizelge 2.1’de sunulmuştur.

2.2 Toz Metalurjisi Yönteminde Kullanılan Metal Tozlarının ve Toz Metalurjik Parçaların Özellikleri

Toz metalurjisi yöntemi ile parçanın çalışma şartlarına uygun kimyasal-mekanik özelliklerde ürün elde edilebilmesi için; tozların özelliklerinin dikkatli bir şekilde belirlenmesi ve uygun T/M imalat basamaklarının kullanılması gerekmektedir (Babacan, 2006).

2.2.1 Tozların özellikleri

Toz metalurjisi çok geniş bir alanda hizmet verdiği için, kullanılacağı yere göre tozların özelliklerinin dikkatli bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Metal tozlarını, geniş bir aralıkta mühendislik ihtiyaçlarını karşılamak üzere, toz metalurjisi yöntemi için oldukça fazla sayıda tip ve derecede bulmak mümkündür. T/M parçalarının mekanik veya kimyasal özellikleri, üretim teknikleri ile ortaya çıktığı için tozların özelliklerinin belirlenmesinde, tozun boyutu, şekli ve yüzey alanı incelenmektedir (German,1997). Metal tozlarının

özellikleri iki ana başlık altında incelenebilir; tozların kimyasal özellikleri ve tozların fiziksel özellikleri.

2.2.1.1 Tozların kimyasal özellikleri

Kimyasal özellikler ifadesinden bileşim ve saflık anlaşılır. Tozlarda bulunabilen katı yabancı maddeler genelde kimyasal indirgenme sonucu ortaya çıkmaktadır. Tozlar kimyasal indirgenme ile üretilmişse bazı oksit parçacıkları indirgenmeden kalmış olabilir (Cu ve Fe demir tozlarında olduğu gibi). Bu tanecikler tozun özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Bazen de bu yabancı maddeler kendilerini yüzey filmleri olarak gösterirler. Atmosferle temas sonucu belli bir süre sonra tozlar oksitlenir. Tozların preslenmesi sırasında Cr, Zr, Al, Mg, Pb ve Sn gibi metallerin dengeli oksitlerinin kalıp ve zımba yüzeylerinde olumsuz etkileri gözlenmiştir (Uygur, 1986).

Metal tozlarını kimyasal özelliklerini tespit edebilmek için, standart kimyasal analiz yöntemleri kullanılabilir. Mesela, tozlardaki oksijen tayini için 5gr kurutulmuş toz numunenin 30–60 dakika süre ile hidrojen gazı altında 550°C ile 1150°C sıcaklıkta indirgenerek tartılarak eşitlik (2.1) yardımıyla sonuç elde edilir.

$$\%O_2 = \frac{W_i - W_s}{W_i} \times 100 \quad (2.1)$$

W_i = İlk ağırlık

W_s = Son ağırlık

Bu değer SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , BeO , Mn_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , MgO vb. gibi dengeli oksitleri içermez. Çünkü deney şartları altında bu gibi oksitler indirgenmez. Asitte çözünmeyen maddelerin tayini için ise, numune asit içinde kaynatılır ve filtre edilerek fırında 980°C’de yakılarak eşitlik (2.2) yardımıyla sonuç çıkarılır (Uygur, 1986).

$$\%Asitte\ÇözünmeyenMadde = \frac{W_s}{W_i} \times 100 \quad (2.2)$$

W_i = İlk ağırlık

W_s = Son ağırlık

2.2.1.2 Tozların fiziksel özellikleri

Tozların fiziksel özellikleri; toz tane boyutu, toz tane şekli, akış hızı, görünür yoğunluk, sıkıştırılabilirlik ve sinterlenebilirlik olarak verilebilir.

Toz tane boyutu

Herhangi bir teorik sınır bulunmamasına rağmen, pratik olarak maksimum toz tane boyutu toz özellikleri, parça yoğunluğu ve mümkün pres kapasitesi tarafından belirlenmektedir. Geleneksel preslenmiş T/M parçalarının büyüklüğü, tasarlanan alan $0.0001 - 625 \text{ mm}^2$ ve yükseklik presleme yönünde 1 ile 150 mm arasındadır. Pratik yükseklik sınırı 7.62 cm'e yakındır. Verilen bir metal toz için gerekli yoğunluk ne kadar düşükse, bir özel pres üzerinde üretilebilir parça boyutu da o kadar büyüktür. Presleme yönünde nispeten uzun parçaları, toplam uzunluğu boyunca yeterli yoğunlukta üretmek zordur. Parça uzunluğunu kısıtlayan diğer bir faktör de metal tozlarının görünür yoğunluğudur (German, 1997).

Tozların tane büyüklükleri genellikle elek analizi ölçüm tekniği ile yapılmaktadır. Elek büyüklüğü, delik büyüklüğü ile ölçülür. Elek büyüklüğü meş (mesh) ile belirtilir. Çizelge 2.2'de elek analizi takımı gösterilmiştir (Kurt, 1992).

Çizelge 2.2 Standart elek analiz takımı (Kurt, 1992)

Mesh	30	40	50	60	80	100	140	200	230	325
Delik çapı (μm)	600	425	300	250	180	150	106	75	63	46

Toz tane şekli

T/M işlemleri için en uygun olan parçalar presleme yönünde düzgün boyutlara sahip olan parçalardır (silindirik, kare, dikdörtgen). Bunların baskıları nispeten basittir. Mükemmel küreler T/M yöntemi ile üretilemez. Parçacık boyu ve şekli çok yakından ilgili iki faktördür. Parçacıklar tek boyutlu (iğne, düzgün olmayan çubuk), iki boyutlu (dendritik, pul), üç boyutlu (küresel, yumru, düzgün olmayan, köşeli, gözenekli) olarak sınıflandırılırlar.

Atomize Al ve Sn gibi demirdışı tozlar ve paslanmaz çelik gibi demirli alaşımlar, parçacık boyu azaldıkça daha küresel parçacıklar oluşturma eğilimindedir. Gaz veya hava atomizasyonu daha yuvarlak, su atomizasyonu ise düzgün olmayan şekiller oluştururlar. Parçacık şeklinin kontrolü, optik ve elektron mikroskopları ile yapılır. Parçacıkların şekli

tozların çeşitli özelliklerini etkilemektedir. Bunlar tozun akış hızı, görünür yoğunluğu, sıkıştırılabilirliği ve sinterlenebilirliğidir (Ekşi, 1996; German, 1997).

Akış hızı

Küresel tozlar kolay akarken, pul şeklindeki tozlar düşük akış özelliği gösterirler ve düzgün olamayan şekilli bazı tozlar ise hiç akmazlar. Akış hızı 50gr. kuru tozun *Hall* hunisinden kendi halinde akış zamanı diye tanımlanır (Metals Handbook, 1998).

Görünür yoğunluk

Belli bir hacimdeki sıkıştırılmamış toz kütlenin ağırlığıdır. Görünür yoğunluk gr/cm^3 olarak ifade edilir. Küresel tozlar en yüksek, köşeli tozlar yüksek ve gözenekli tozlar ise düşük görünür yoğunluktadır (Metals Handbook, 1998).

Sıkıştırılabilirlik

Metal toz kütlelerinin, kolay sıkışabilme ve teorik yoğunluğa yaklaşabilme derecesine sıkıştırılabilirlik denir. Düzgün olmayan şekilli tozlar zor sıkıştırılır. Bunun için yağlayıcılar kullanılarak sıkıştırma işlemi kolaylaştırılabilir. Buna karşın düzgün şekilli tozlar daha rahat sıkıştırılabilirler. Sıkıştırılabilirlik eşitlik (2.3) kullanılarak yoğunlaşma parametresi ile belirlenir (Babacan, 2006).

$$\text{Yoğunlaşma parametresi} = \frac{\text{Ham yoğunluk} - \text{Görünür yoğunluk}}{\text{Teorik yoğunluk} - \text{Görünür yoğunluk}} \quad (2.3)$$

Sinterlenebilirlik

Sıcaklık etkisiyle toz taneleri arasında bağ (boyun) oluşma kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Sinterleme işlemi sırasında etkin olan olay difüzyon olup; küçük taneli ve düzgün olmayan şekilli toz taneciklerin birim yüzey alanları daha büyük olduğu için difüzyon, düzgün tanelere oranla daha hızlı olmaktadır.

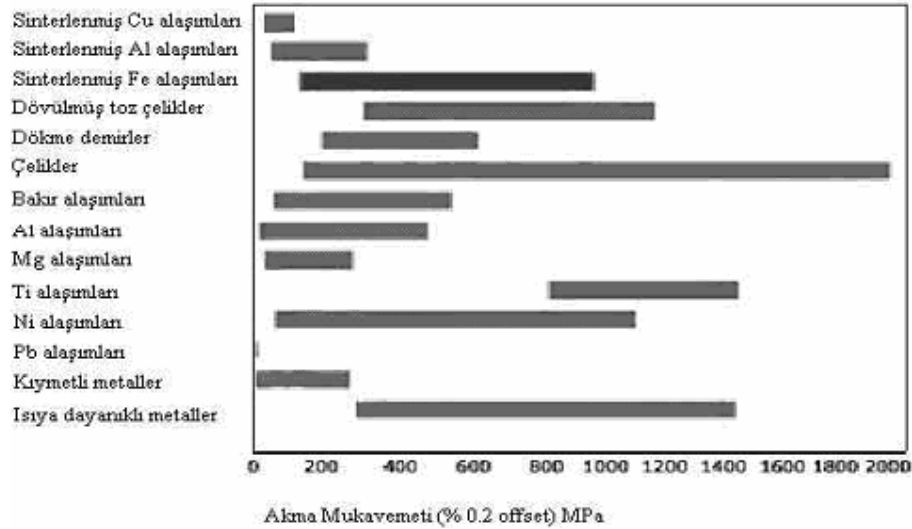
2.2.2 Toz metalurjik parçaların özellikleri

Sinterlenmiş malzemelerin özellikleri birçok faktöre bağlıdır ve özel talepleri karşılamak için optimize edilebilir. Belirli bir uygulama için bir malzeme seçiminde, kimyasal bileşim ve parçaların yoğunluğu dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir. Kimyasal bileşim ve mekanik özellikler sinterlenmiş makina parçalarının özelliklerini belirlemede yaygınca kullanılan faktörlerdendir. Bazı örnekler çizelge 2.3'te verilmiştir (www.turktoz.gazi.edu.tr).

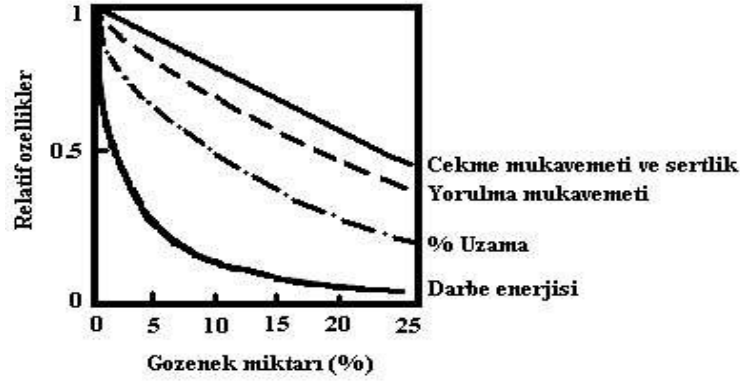
Çizelge 2.3 Bazı elementlerin mekanik özelliklere etkisi (www.turktoz.gazi.edu.tr)

Kimyasal Bileşim	Fe	Fe-Cu	Fe-Cu-C	Fe-Ni-Cu-Mo-C	Fe-P	Fe-P-C
Mekanik Özellikler	Sertlik	Yoğunluk	Çekme ve Akma dayanımı	Çapraz Kırılma dayanımı	Young modülü	Young modülü

T/M malzemelerin mekanik özellikleri gözeneklerin varlığından dolayı düşer. Çekme mukavemeti ve sertlik gözenek miktarı ile doğrusal olarak düşerken, uzama yüzdesi ve darbe enerjisi eğrisel olarak düşerler. Mekanik özellikler zorunlu değerler veya tipik değerler olarak verilirler. Sinterlenmiş malzemelerin döküm-dövme malzemeler ile karşılaştırılması ve değişik malzemelerin akma mukavemetleri şekil 2.1’de verilmiştir (Babacan, 2006). Ayrıca sinterlenmiş malzemenin içerdiği gözenek miktarının mekanik özelliklere etkisi şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.1 Bazı alaşımların mukavemet değerleri (Babacan, 2006)



Şekil 2.2 Gözenek miktarının bazı özelliklere etkisi (Babacan, 2006)

2.3 Yöntemin Avantajları ve Dezavantajları

T/M küçük, karmaşık ve boyutsal hassasiyeti yüksek parçaların seri imalatına son derece uygundur. Belirli derecede gözenek ve geçirgenlik elde edilir. T/M ile üretilen parçaların büyük bir kısmında elde edilen boyutsal hassasiyet ve yüzey kalitesi talaşlı işlem gibi ilave operasyonlara olan gereksinimleri ortadan kaldırması ve malzeme kaybının çok az olması bu yöntemin ekonomik bir üretim yöntemi olduğunun göstergesidir. Döküm gibi alışlagelmiş üretim tekniklerinde yaşanan oksidasyon, segregasyon, gaz absorpsiyonu ve yüksek yoğunluk farkından dolayı alaşım oluşturmama gibi birçok problem T/M yöntemi ile kolaylıkla ortadan kaldırılabilir. T/M nispeten düşük enerji tüketimine, yüksek malzeme kullanımına ve düşük maliyete sahip otomatikleşmiş işlemleri verimli kullanır. Sahip olunan bu özellikler ile T/M verimlilik, enerji ve hammadde gibi günümüz kaygılarını ortadan kaldırmaktadır. Bazı metallerin ergime sıcaklığı çok yüksek olması ve bu sıcaklıklara ulaşılamaması (W, Mo gibi), bazı özelliklerin ancak T/M ile sağlanabilmesi (kendi kendine yağlanan yataklar), süper alaşım ve sert metaller gibi önemli malzemelerin bu yöntem ile üretilmesi toz metalurjisini zorunlu kılan başlıca sebeplerdir. Bunların sonucu olarak, T/M konusu sürekli gelişmekte ve geleneksel metal şekillendirme operasyonlarının yerini almaktadır. Bir üretim yöntemi olmasının yanı sıra T/M aynı zamanda önemli bir malzeme ve yarı mamul üretim yöntemidir. Periyodik cetvelde metal olarak kabul edilebilen 86 kadar elementten yaklaşık 8000 kadar alaşım üretilebilmiştir. 86 elementten ikili, üçlü, dörtlü gibi farklı kombinasyonlarla 10^{25} mertebelerinde alaşım üretebilmek mümkün olabilir bunu mümkün kılabilen tek yöntem olarak T/M ortaya çıkmaktadır. T/M, kompozit malzeme üretiminde de kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yolla alışlagelmiş malzemelerden daha farklı ve üstün özelliklerde malzeme üretilebilmektedir (Baksan ve Gürlü, 2003; Babacan, 2006).

T/M yönteminin avantajlarını aşağıdaki gibi özetlenebilir (Baksan ve Gürler, 2003):

- ✓ Eşsiz özelliklerde, sınırsız sayıda alaşım ve kompozit malzeme üretmek mümkündür;
- ✓ Boyut, şekil ve parça içindeki gözenekliliğin kontrolü kolaydır;
- ✓ İstenen mikroyapıda, fiziksel ve mekanik özelliklerde malzeme üretilebilir;
- ✓ Üretim adetleri orta miktardan yüksek miktarlara kadar çıkabilir;
- ✓ Başlangıçtan, yani malzeme seçiminden, nihai ürüne kadar aradaki kademelerde üretim optimizasyona elverişlidir;
- ✓ Son ölçülerde parça üretimi mümkün olduğu için talaş, çapak vb. gibi artıklar yoktur;
- ✓ Döküm, dövme ve talaşlı imalat gibi yöntemlere nazaran metal işleme / şekillendirme maliyet oranı açısından daha avantajlı yöntemdir.

Toz metalurjisinin gelişimiyle birlikte aşağıdaki malzemelerin imal problemi tamamen çözümlenmiştir (Ersümer, 1970):

- ✓ Sünek hale getirilmiş refrakter metaller,
- ✓ Amalgamlarda kullanılan plastik malzemeler,
- ✓ Sert ve tok alaşımlar (Bunlar metalsel karbürler ve bir yardımcı metalden ibarettir),
- ✓ Bileşenleri birbiriyle zor karışan veya hiç karışmayan elektrik kontak malzemeleri,
- ✓ Gözenekli yataklar.

Yöntemin dezavantajları şu şekilde sıralanabilir (Ersümer , 1970):

- ✓ İlk yatırım yani takımlar, presler, sinter teçhizatı oldukça pahalıdır. Seri üretim yapılmazsa amortisman değerleri yüksektir,
- ✓ Metal tozlarının maliyeti ingot halinde üretilen malzemelerden daha yüksektir,
- ✓ Toleranslar talaşlı işlemlere göre daha kabadır,
- ✓ Mekanik ve fiziksel özellikler bazı işlemler yapılmadıkça sınırlıdır.

2.4 Yöntemin Uygulama Alanları

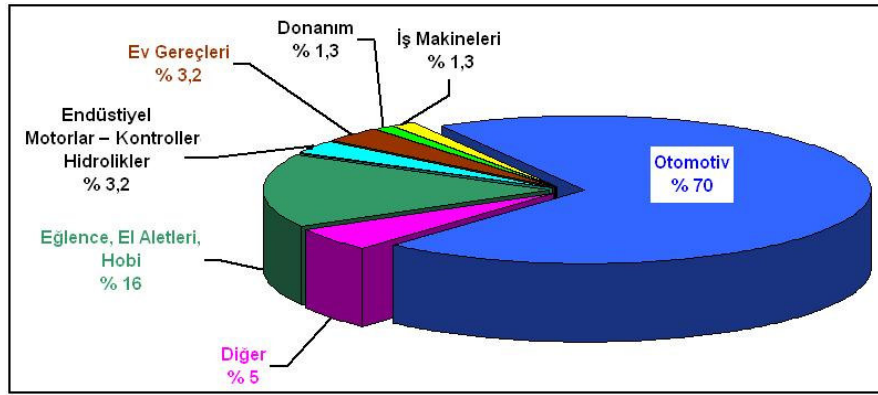
T/M'nin uygulama alanı oldukça geniştir. Volfram lamba filamentleri, dişçilikte kullanılan malzemeler, dişli çarklar, yağlamasız yataklar, elektrik kontaktarı, nükleer güç yakıt elemanları, ortopedik gereçler, ofis makina parçaları, yüksek sıcaklık filtreleri, uçak fren balataları, akü elemanları ve jet motor parçaları metal tozlarından üretilen parçalara örnek olarak verilebilir (Babacan, 2006). Çizelge 2.4'te toz metalurjisinin kullanım alanları ve bu alanlarda kullanılan toz çeşitleri verilmiştir.

Ayrıca, metal tozları boyalar, gözenekli betonlar, baskılı devreler, patlayıcılar, kaynak elektrodları, roket yakıtları, baskı mürekkepleri, lehimleme aletleri ve katalizörlerin

üretilmesinde de kullanılmaktadır (www.turktoz.gazi.edu.tr; Baksan ve Gürler, 2003).

T/M kullanım alanlarından bir tanesi de savunma sanayisidir. Ateş sanatı olarak bilinen piroteknik uygulamalar savunma sanayisi için oldukça önemlidir. Piroteknik reaksiyonlar çok yüksek sıcaklık oluşturdıklarından aydınlatmaya yol açarlar. Piroteknikler havai fişek, işaret fişegi ve flaş tozu olarak kullanılırlar (Baksan ve Gürler, 2003).

T/M parçaların dünya genelindeki pazar payı şekil 2.3'te verilmiştir. Genellikle demir parçalarının üretiminde kullanılan T/M yöntemi otomotiv endüstrisinde oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Düşük yoğunlukta parça kullanımının tercih edildiği otomotiv endüstrisi, T/M uygulamaları daha hafif parça üretimine doğru yöneltmektedir (www.struers.com).



Şekil 2.4 T/M parçalarının pazar payları (www.mpif.org)

Bu pazarın %70'i otomotiv endüstrisi tarafından kullanılmaktadır. Avrupa yapımı arabalar 7 kg, Japon yapımı arabalar ise 5 kg T/M parçaya sahip olduğu halde, Amerikan arabaları 16 kg'dan daha fazla T/M parça içermektedir (www.turktoz.gazi.edu.tr).

Çizelge 2.4 Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998)

UYGULAMA	KULLANILAN TOZ
AŞINDIRICI İŞLEM	
Püskürtmeli Temizleme	Demir, Çelik, Paslanmaz çelik
Aşındırıcı Çarkları	Demir, Çelik, Bakır, Kalay, Nikel

Çizelge 2.4 (Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998)

UYGULAMA	KULLANILAN TOZ
Alaşım Ürünleri (Çelikler, elektrocuruf çelik, kolay işlenir çelik, dökme demir, sünek demir)	Nikel, Ferro-tungsten, Ferro-silis, Ferro-molibden, Ferro-Molibden, Kurşun, Demir, Alüminyum, Selenyum, Telleryum, Molibden, Tungsten
TARIM	
Hayvan yemi	Demir
Hayvan tedavisi	Kobalt
Gübre	Demir
Çiftlik araç-gereçleri	Demir , Çelik, Bakır, Bronz
Besin zenginleştirici	Demir, Bakır, Mangan
Mantar ilaçları	Bakır
Çayır ve bahçe aletleri	Demir, Çelik, Demir alaşımları, Bakır, Bronz
Tohum temizleme	Demir
Tohum kaplama	Alüminyum
Toprak hazırlama	Demir , Bakır
UZAY	
Fren balataları	Bakır, Kurşun , Kalay, Yüksek nikelli alaşımlar, Grafit, Demir
Çekirdek (eletronik parçalar)	Demir, Molypermalloy
Denge ağırlıkları	Tungsten, Bakır, Demir, Nikel
Filtre (Yakıt, Hidrolik akışkan, Hava için)	Bronz, Paslanmaz çelik, Nikel

Çizelge 2.4 (Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998)

UYGULAMA	KULLANILAN TOZ
Donanım	Alüminyum, Berilyum, Titanyum, Demir
Isı kalkanları	Berilyum, Tungsten
Isı kalkanı kaplaması	Alüminyum
Jet motoru parçaları	Süper alaşımlar
Manyetik kalkanlar	Alüminyum, Nikel, Kobalt
Uçak sürüklenme ölçümü	Alüminyum
Roket yakıtları	Alüminyum
Parçaların onarımı	Nikel kromyum, Nikel alüminyum, Paslanmaz çelik
Aşındırma püskürtmesi	Molibden, Bakır-nikel alaşımları, Kobalt alaşımları, Krom karbür
OTOMOTİV	
Klima	Demir, Çelik
Alternatör regülatör, bağlantılar, dikme parçaları	Platin alaşımları, Demir
Karoser lehim	Çelik, Alüminyum, Kurşun, Kurşun alaşımları
Kovanlar, yataklar	Bakır, Kurşun, Kalay, Demir, Alüminyum, Grafit, Bronz
Bağlantılar	Tungsten, Gümüş
Filtreler	Paslanmaz çelik, Bronz
Yakıt pompası parçaları	Demir, Bakır, Takım çeliği

Çizelge 2.4 (Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998)

UYGULAMA	KULLANILAN TOZ
Çok renkli karoser sonkatı	Alüminyum
Darbe sönümleyiciler	Demir, Alüminyum
Buji (karoser)	Demir
Buji (korozyondan koruma)	Çinko
Vites kutusu parçaları	Demir, Bakır, Çelik
Kamyon sinyal lambaları	Alüminyum
Fren kuşakları, Fren balataları	Bakır, Demir, Kurşun, Kalay, Grafit, Pirinç, Çinko
Tekerlek dikmeleri	Tungsten karbür
Subap içleri	Takım çelikleri, Paslanmaz çelik
İNŞA VE YAPI	
Havalandırılmış beton	Alüminyum, Demir
Asfalt çatı kaplama	Alüminyum
Sızdırmazlık elemanları	Alüminyum
İletken ve tutuşmayan döşeme	Bakır
Zemin, duvar ve tavan için dekoratif plastikler ve linolyum	Demir, Pirinç, Bakır, Alüminyum, Paslanmaz çelik
Kanvas tente ve döşeme için koruyucu kaplama	Alüminyum, Çinko
Boru bağlantı elemanları	Çinko, Kurşun, Bakır
KARBÜRLER	Tungsten, Titanyum, Tantalum, Niyobyum

Çizelge 2.4 (Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998)

UYGULAMA	KULLANILAN TOZ
KATALİZÖRLER	
Gaz sentezleme	Platinyum, Nikel
Hidrojenasyon	Platinyum, Platin alaşımları, Tungsten, Molibden, Renyum
Ortam ısıtıcılarda yanma tetikleyici	Platinyum
Alkiller	Alüminyum
Hidrojen arıtma	Rutenyum, Paladyum
Hidrojen ve oksijen tepkimesi	Paladyum
Raney katalizör	Nikel, Alüminyum
Roket yakıtları	Demir
Genel kimyasal katalizörler	Demir,Bakır, Bakır oksitler
SEMENTE KARBÜRLER	
Kobalt, Molibden, Titanyum, Tungsten, Nikel, Tantalyum, Niyobyum	
KİMYASAL	Alüminyum, Kurşun, Kalay, Bakır, Demir, Nikel, Mangan
KAPLAMALAR	
Kir tutmayan boyalar	Bakır, Bakır oksit
İletken boyalar ve plastikler	Gümüş, Bakır, Nikel
Korozyona dayanıklı boyalar	Paslanmaz çelik, Alüminyum, Çinko, Kurşun
Dekoratif boyalar	Alüminyum, Pirinç, Bronz, Çinko, Paslanmaz çelik, Kurşun, Bakır
Kumaş kaplamalar	Alüminyum

Çizelge 2.4 (Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998)

UYGULAMA	KULLANILAN TOZ
Isı yansıtıcı boyalar	Alüminyum
Sert koruyucular	Kobalt alaşımları, Nikel alaşımları, Tungsten, Molibden, Paslanmaz çelik, Tungsten karbür
Reçineli vernikler	Gümüş, Pirinç, Bronz, Alüminyum
Mekanik kaplama	Çinko, Kurşun, Kalay, Bakır, Kadmiyum
Çamur kaplama	Nikel
Çatı kaplama	Alüminyum
Vakumda metal kaplama	Alüminyum, Bakır, Çinko
MADENİ PARA BASIMI	Nikel, Bakır-Nikel, Titanyum
DİFÜZYON KAPLAMA	Alüminyum-Titanyum alaşımları, Krom, Çinko, Hafniyum
ELEKTRİK - ELEKTRONİK	
Akustik elemanları	Paslanmaz çelik
Piller	Nikel, Çinko, Gümüş, Demir, Kurşun, Grafit
Hava delikleri (boruları)	Paslanmaz çelik
Katod ışıını tüpleri	Grafit, Nikel
Fırçalar	Bakır, Gümüş, Grafit
Bağlantılar	Bakır, Gümüş, Tungsten, Molibden, Demir, Kalay, Platin alaşımları, Grafit, Karbon
Kristal destekler	Gümüş, Bakır, Tungsten
Geciktirme hatları, bilgisayarlar	Demir, Molypermalloy
Motor kutup parçaları	Demir, Silikon-demir

Çizelge 2.4 (Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998)

UYGULAMA	KULLANILAN TOZ
Basılı devreler	Bakır, Gümüş, Palladyum, Altın, Platin
İletişim cihazları	Demir, Nikel, Molibden
Yarı iletkenler	Kurşun
Solenoitler	Demir
Telefon parçaları	Demir, Pirinç, Bronz, Palladyum, Paslanmaz çelik
Terminaller	Nikel
İnce film rezistanslar	Palladyum, Gümüş
Elektriksel yük boşaltım elektrodları	Tungsten, Bakır, Gümüş
Elektrokimyasal işlem elektrodları	Bakır, Gümüş, Tungsten
ISIL İŞLEM	
Fırın ısıtma elemanları	Platin alaşımları, Tungsten, Molibden
Fırın kalkanı	Alüminyum, Tungsten
İnfiltrasyon	Bakır, Pirinç, Gümüş, Mangan
Koruyucu kanallar	Platin alaşımları
ENDÜSTRİYEL (GENEL)	
Hava aracı egzoz susturucu	Paslanmaz çelik, Bronz
Yatak ve kovanlar	Bakır, Kalay, Kurşun, Bronz
Asbestli fren balataları	Çinko, Grafit, Pirinç
Kesici takımlar	Tungsten, Kobalt

Çizelge 2.4 (Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998)

UYGULAMA	KULLANILAN TOZ
Filtreler (sıvılar, gazlar)	Bronz, Nikel, Paslanmaz çelik, Süper alaşımlar, Titanyum
Alevle kesme ve düzeltme	Demir, Alüminyum
Manyetik kavrama akışkanları	Paslanmaz çelik (manyetik)
Sürtünme malzemeleri	Bakır, Kalay, Çinko, Demir, Kurşun, Grafit
Gaz motoru egzoz arıtması	Platin
Döner bileği taşları	Pirinç, Bronz
Ses geçirmeyen plastik	Kurşun, Grafit
ENDÜSTRİYEL PATLAYICILAR	Alüminyum
BİRLEŞTİRME	
Sert lehimleme	Bakır, Nikel, Gümüş, Kobalt, Pirinç, Altın, Alüminyum, Nikel-kobalt-demir-krom alaşımları, Nikel-silisyum-bor alaşımları
Ark kaynağı elektrodları	Demir, Nikel, Krom
Direnç kaynağı elektrodları	Tungsten, Bakır, Gümüş, Molibden, Mangan
Lehimleme	Kurşun, Kalay, Lehim alaşımları
Termit kaynağı	Alüminyum
YAĞLAYICILAR	
Bakır yağlayıcılar	Bakır
Gres yağları	Kurşun, Grafit
Yüksek sıcaklık yağlayıcıları	Alüminyum, Grafit
Plastik dolgulu metaller	Demir, Bakır

Çizelge 2.4 (Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998)

UYGULAMA	KULLANILAN TOZ
MANYETİK	
Kavramalar	Paslanmaz çelik (manyetik), Demir
Mürekkepler	Demir
Kalıcı mıknatıslar	Demir, Nikeli Kobalt, Alüminyum, Baryum, Ferrit, Demir-alüminyum alaşımları, Molibden
Kutup parçaları, iletişim araçları	Demir, Demir-kobalt, Silisyum-demir
Hafif manyetik parçalar	Demir, Nikel-demir, Silisyum-demir
Yürüyen dalga tüpü mıknatısları	Platin, Kobalt
TIP VE DİŞÇİLİK	
Diş amalgamları	Gümüş, Altın, Alaşımlar
Prostetikler	Süper alaşımlar
İnsülin üretimi	Çinko
Ameliyathane hava filtreleri	Paslanmaz çelik, Monel, Kobalt alaşımları
İlaç yapımında son filtreler	Paslanmaz çelik, Monel
Dişçilikte porselen kaplamalar	Palladyum
Açık yara enfeksiyonlarını önleme	Alüminyum
Cerrahi gazlı bez ve iğneler	Tantalyum, Zirkonyum
Cerrahi implantlar	Nikel ve kobalt alaşımları
Ortopedik harici takma sistemler	Titanyum
Radyasyon kalkanı	Tungsten

Çizelge 2.4 (Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998)

UYGULAMA	KULLANILAN TOZ
METAL İYİLEŞTİRMESİ	
Bakır sementasyonu	Demir
Altın sementasyonu	Çinko
Çözeltili kaynaklı metaller	Alüminyum
TAHRİBATSIZ MUAYENE	
Manyetik parçacıklarla muayene	Demir
NÜKLEER MÜHENDİSLİK	
Kontrol çubukları ve reflektörler	Zirkonyum, Berilyum, Hafniyum, Uranyum
Filtreler (sıvı sodyum-potasyum, gaz, ağır su için)	Paslanmaz çelik, Nikel alaşımları
Yakıt elementleri	Demir, Paslanmaz çelik
Yüksek yoğunluklu beton	Demir
Yüksek yoğunluklu kauçuk	Kurşun, Pirinç
Kalkan	Alüminyum
Gama ışını kalkanı	Tungsten, Nikel, Bakır, Kurşun
Nötron kalkanı	Bor, Nikel, Demir, Kurşun
Bilgisayarlar	Demir
OFİS EKİPMANLARI	
Kopyalama makinası parçaları	Demir, Paslanmaz çelik, Bronz, Alüminyum
Faks makinası	Alüminyum, Çelik, Bronz, Paslanmaz çelik
Kayıt cihazları	Demir

Çizelge 2.4 (Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998)

UYGULAMA	KULLANILAN TOZ
İş makinaları	Çelik, Demir, Paslanmaz çelik, Pirinç, Alüminyum
Elektrostatik fotokpi makinası toneri	Demir
SAVUNMA SANAYİ (ORDU)	
Cephane	Grafit
Zırh delici çekirdek	Tungsten, Bakır, Nikel, Kobalt
İnsansız bombalar	Demir
Füzeler	Alüminyum, Grafit
Kırılabılır kurşunlar	Demir, Kurşun
Füze parçaları	Pirinç, Paslanmaz çelik, Demir, Çelik
Yangın bombaları, işaret fişekleri, izli mermiler, torpidolar	Demir, Alüminyum, Bakır, Seryum, Magnezyum, Çinko, Silisyum,
Füze filtreleri	Nikel bazlı alaşımlar
Taramalı tüfek	Bakır, Demir, Pirinç
Roket fırlatıcı parçalar	Paslanmaz çelik, Alüminyum
Katı füze yakıtı	Alüminyum, Magnezyum
KİŞİSEL ÜRÜNLER	
Çakmaktaşı	Seryum alaşımı
Kablosuz elektrikli diş fırçası ve traş bıçağı	Bakır, Nikel, Pirinç, Demir, Bronz
Kozmetikler	Çinko, Alüminyum
Güçlendirilmiş gıda naddeleri ve tahıllar	Demir

Çizelge 2.4 (Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998)

UYGULAMA	KULLANILAN TOZ
Tırnak cilası	Alüminyum,Bakır
Yüz sabunu	Alüminyum
Ayna gümüşleme	Demir
Kalem uçları	Platin, Rutenyum, Tungsten, Paslanmaz çelik
Fotoğraf flaş lambaları	Zirkonyum, Seryum
Vitaminler	Demir
PETROL VE PETROKİMYA	
Hidrokraking	Platin alaşımları
Olefinlerin hidrojenasyonu	Platin
Petrol yakıtlarının geliştirilmesi	Platin
Yağ sondajlama	Tungsten karbür, Tungsten alaşımları
Hidrojen arıtma	Rutenyum
PLASTİK GÜÇLENDİRİCİLER	
Karoser lehimleri	Çelik, Alüminyum, Kurşun
Döküm ve metal parçaların onarımı için macunlar	Demir, Paslanmaz çelik, Alüminyum, Gümüş
Gövde düzleme macunları	Demir, Alüminyum
Takım ve kalıplar	Demir, Alüminyum

Çizelge 2.4 (Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998)

UYGULAMA	KULLANILAN TOZ
BASKI MÜREKKEPLERİ	
Ofset, Tipo baskı, Rotagravür vb. için metalik mürekkepler	Bakır, Pirinç, Alüminyum
PROSES ENDÜSTRİSİ	
Alüminyum alkiler	Alüminyum
Su sentez katalizörü	Palladyum
Kağıtlar için kaplamalar	Alüminyum, Bakır, Kalay
Bira fermentasyonunu kontrol	Paslanmaz çelik
Şap çözeltilisinin rengini açma	Alüminyum
Kimyasal reaktör filtreleri	Paslanmaz çelik
Hidrojenasyon	Platin metalleri, Alüminyum, Nikel
Optik cam işlemleri	Platin alaşımları
Suni ipek üretimi	Platin alaşımları
Kafein sentezi	Demir
Hidrokarbinların sentezi	Demir
PİROTEKNİKLER	Alüminyum, Grafit, Demir, Magnezyum
RADYO VE TELEVİZYON	
Çekirdekler	Demir, Molypermalloy
Tutucular (TV tüpleri)	Baryum, Nikel
Kalıcı mıknatıslar	Demir, Nikel, Kobalt, Alüminyum, Baryum, Ferrit, Nadir toprak elementleri

Çizelge 2.4 (Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998)

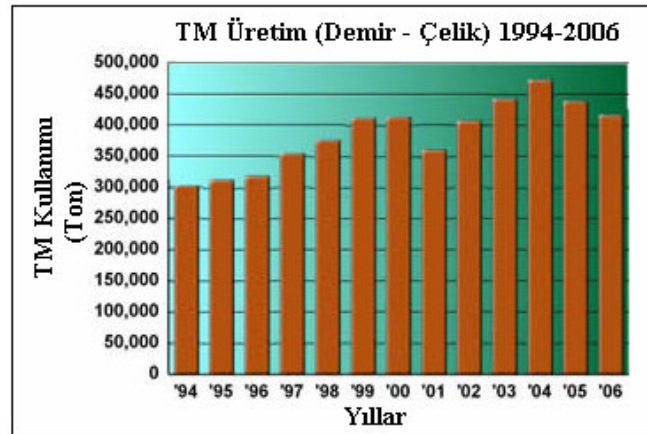
UYGULAMA	KULLANILAN TOZ
Baskılı devreler	Bakır, Gümüş
Alıcı tüpleri	Tungsten, Molibden, Nikel
EĞLENCE	
Golf sopaları	Tungsten, Demir, Pirinç
Avcı bıçakları	Pirinç, Paslanmaz çelik, Demir, Nikel, Gümüş
Av tüfeği	Demir, Paslanmaz çelik
Balık oltası makarası	Demir, Pirinç, Paslanmaz çelik
Dıştan takmalı tekne motorları	Pirinç, Çelik
Yelkenli gemi donanımı	Paslanmaz çelik, Bronz
Dart oyunu	Tungsten
KENDİNDEN YAĞLAMALI PARÇALAR	
Yağ doldurulmuş	Bakır, Kalay, Kurşun, Demir, Alüminyum, Grafit, Bronz
Plastik doldurulmuş	Demir, Bakır, Gümüş
KAĞIT VE ŞERİTLER	
Alaşım	Kobalt, Demir, Nikel, Alüminyum, Tungsten, Molibden
Cam mühürleme	Demir, Kobalt, Nikel alaşımları
Nikel, Kobalt	Nikel, Kobalt
Çelik	Demir

Çizelge 2.4 (Devamı) Toz metalurjisi uygulama alanları ve kullanılan toz çeşitleri (Metals Handbook, 1998)

UYGULAMA	KULLANILAN TOZ
GEMİCİLİK	
Hata önleyici boyalar	Bakır, Bakır oksit
Gemi omurgası düzleme macunu	Demir
Gemi kış boyası	Alüminyum, Çinko
SES GEÇİRMEZLİK	
Akustik plastikler	Kurşun, Grafit
SU GEÇİRMEZLİK	
Beton	Demir, Alüminyum
Çatı kaplamaları	Demir, Alüminyum

2.5 Toz Metalurjisinin Durumu

Toz metalurjisinin ileriki yıllarda daha da yüksek oranda kullanılacağı kuşkusuzdur. Çünkü toz metal dövme, sıcak izostatik presleme, yüksek sıcaklıkta sinterleme gibi T/M yöntemleri uygulama sahalarının giderek artmasını sağlamaktadır. Bu durumda giderek T/M ile üretilmiş yeni parçaların artması ve yeni pazarlar meydana gelmesi demektir (www.mpif.org). Şekil 2.5'te yıllara göre toz metalurjik demir çelik üretimi gösterilmektedir.



Şekil 2.5 TM demir – çelik üretiminin yıllara göre dağılımı (www.mpif.org)

ABD'deki verilere göre 1997 yılında T/M ile üretilmiş parçaların değeri 1.7 milyar dolar mertebesinde idi. Yapılan tahminlere göre bu rakamın daha da artacağı ve T/M ile üretilmiş parçaların toplam miktarının 500.000 tonu aşacağı öngörülmektedir. Bu nedenle üreticiler yeni üretim tesisleri yatırımına ağırlık vermektedirler. Yabancı ülkelerde bu konudaki yatırımlar bu kadar büyük boyutlarda olmasına rağmen ülkemizde halen endüstriyel olarak toz metal üretimi ciddi olarak ele alınmamıştır. Gerek üniversitelerimizde gerekse sanayide kullanılan tozlar halen yurtdışından getirilmekte ve memleketimizde işlenerek nihai ürün haline getirilmektedir. Savunma sanayi sektöründe, örneğin jet uçak motorları tamirinde hiç de azımsanmayacak miktarda toz metal, termal sprey tekniği ile kullanılmaktadır (Baksan ve Gürler, 2003).

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

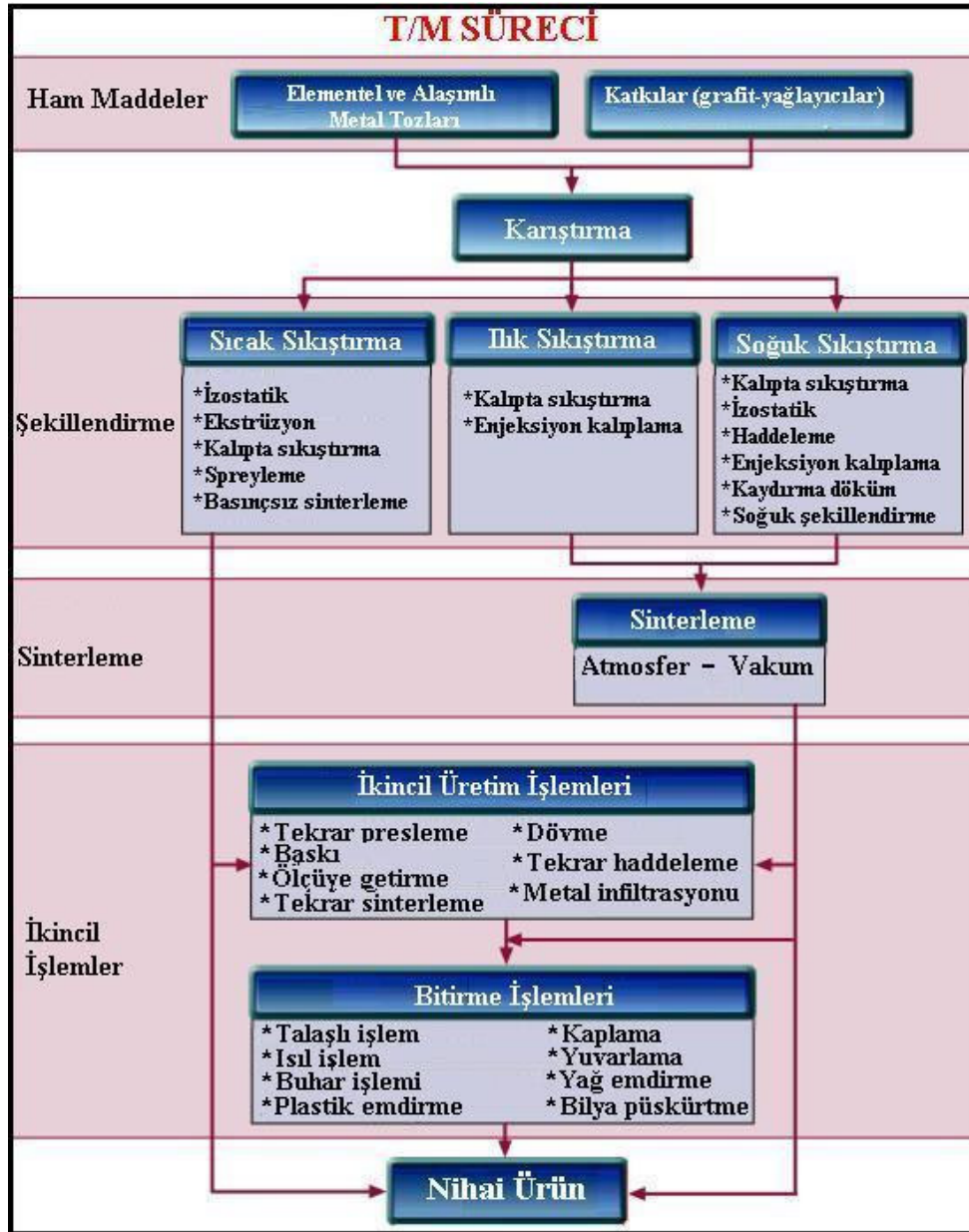
Avrupa'da da T/M parça üretimi giderek artmaktadır. Sonuçta dünya çapında bu sektörde genişleme görülmektedir. Bu konuda özellikle GM, Ford, Daimler - Chrysler, Toyota, Honda, BMW ve Volkswagen gibi otomotiv firmaları önemli adımlar atmaktadırlar (www.struers.com).

T/M aynı zamanda stratejik bir yöntemdir, çünkü bu üretim tekniği daha önce bahsettiğimiz gibi birçok üretim tekniğinden avantajlı olabilecek yönlerinin yanı sıra üretimi zor olan parçaların üretiminde adeta tek üretim tekniği olarak görülmektedir. Bu üretim tekniği ile beraber kullanılan yöntemleri de önemli uygulamalar olarak karşımıza çıkarmaktadır, örneğin sıcak izostatik presleme, püskürtme ile şekillendirme, termal sprey, soğuk şekillendirme ve mikron altı boyutta parçaların işlenmesi. Sıcak izostatik presleme ile üretilen süper alaşım toz metalurjik parçalar, uçakların motor parçaları, motor parçalarının tamiri, petrokimya endüstrisi sayılabilir (Baksan ve Gürler, 2003).

Roket ve füzelerde alüminyum ve magnezyum metal tozlarının katı yakıt olarak kullanımı ise son yıllarda giderek artmaktadır. Keza yakıt malzemesi dışında diğer patlayıcı ve piroteknik uygulamalar toz metal uygulamalarının önemini arttırmaktadır (Baksan ve Gürler, 2003).

3. TOZ METALURJİSİ SÜREÇLERİ

Toz metalurjisi tekniği temel olarak iki alt süreçten oluşmaktadır. İlk süreç tozun üretimi; ikinci süreç ise toz partiküllerini çeşitli işlemlerle tek parça komponent haline getirmek ve sinterleme sonrası ikincil işlemler ile istenen özelliklere sahip parça üretimidir. Şekil 3.1’de T/M üretim süreci ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.1 T/M üretim süreci (www.mpif.org)

3.1 Demir Tozu Üretimi

T/M’de kullanılan demir tozları birçok farklı şekilde üretilebilmektedir. Her üretim tekniği toza farklı özellikler kazandırmaktadır. Nihai parçadan istenen özellikler gözönünde bulundurularak bu özellikleri sağlayacak üretim yöntemiyle üretilmiş tozlar komponent imalatında kullanılmaktadır (Metals Handbook, 1998).

3.1.1 Demir oksitin redüklenmesiyle demir tozu üretimi

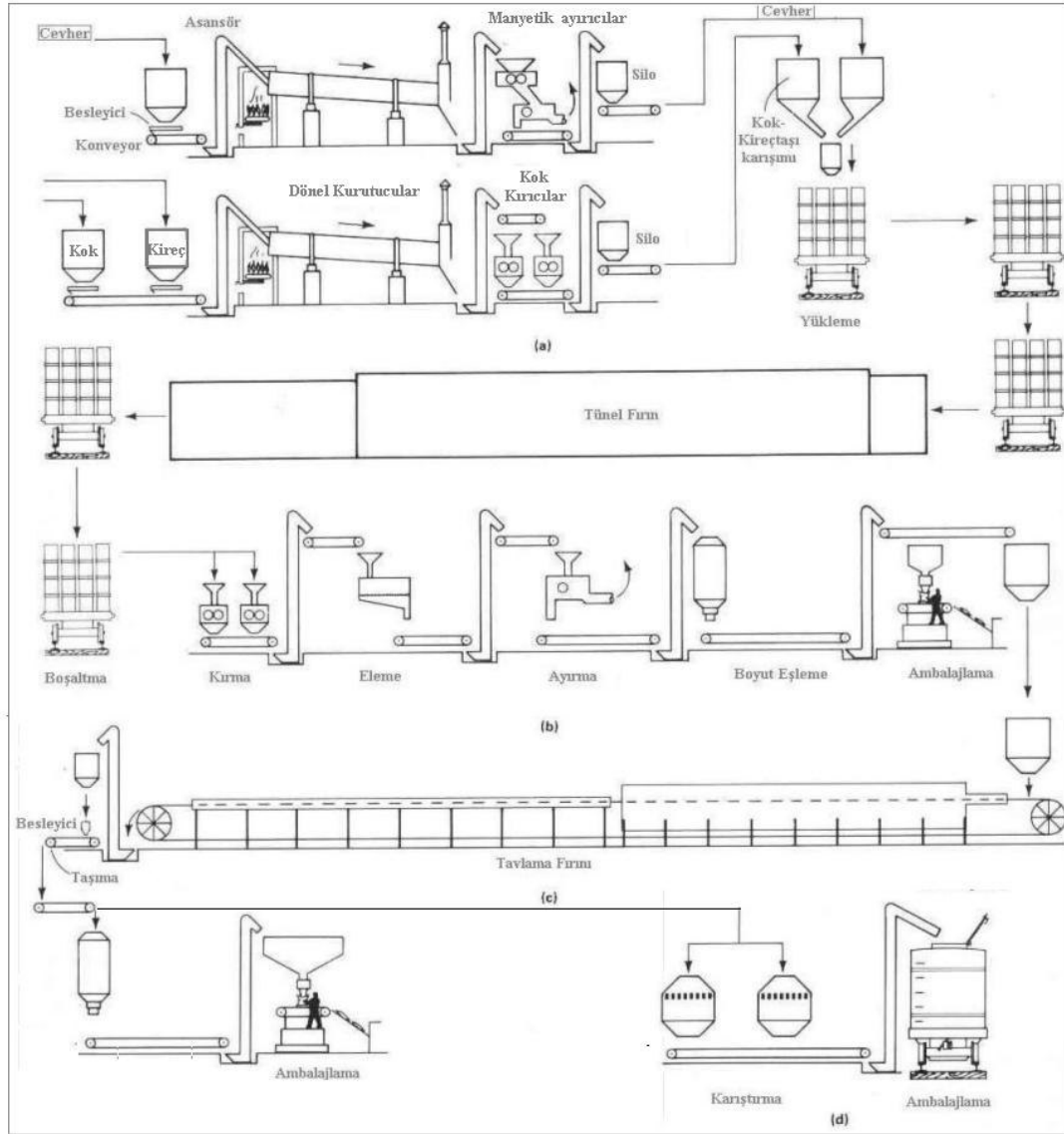
Demir cevherinin özellikle karbonla redüklenmesi demir tozu üretiminin en eski yöntemidir. İsveç sünger demir prosesi, İsveç Högenäs’de 1900’lerin başında geliştirilmiştir. Aslında temelde çelik yapımı için hammadde olarak sünger şeklinde metalik demir üretilmesi hedeflenmiştir. Yöntemin farklılaşmış olan bir tipi İsveç ve Amerika’da kullanılmakta olup; demir tozu üretimi için hala önemli bir yöntemdir. Benzer bir uyarlaması Rusya’da da kullanılmaktadır.

İsveç sünger demir prosesi, demir cevherinin demirin ergime sıcaklığı altındaki sıcaklıklarda metalik demire doğrudan redüklenmesi için geliştirilmiş olan birçok prostesten birisidir. Ancak bu birçok doğrudan redükleme prosesleriyle üretilmiş metalik demir, T/M demir ve çelik ürünlerinin üretiminde demir tozu olarak kullanılmak için uygun değildir çünkü yüksek oranda empürite içermektedir. Aynı zamanda, parçacık boyutu, dağılımı, şekli, parça içi gözenekliliği gibi arzu edilen fiziksel ve mekanik özelliklere sahip değildir ve pekleşmeden yoksundurlar (Metals Handbook, 1998).

3.1.1.1 Proses şartları

Högenäs prosesinde kuzey İsveç’ten çıkarılan ve öğütme-manyetik ayırtırmayla zenginleştirme sonrasında yaklaşık %71.5 Fe içeriğine sahip olan saf manyetit (Fe_3O_4) cevheri kullanılmaktadır. Küçük miktarda bulunan empüriteler oksit içindeki katı eriyikte değildirler ve farklı fazlarda bulunurlar. Cevher, sürekli kullanım için uygun kalitede ve yeterli miktardadır. Şekil 3.2’de Högenäs prosesi akış şeması görülmektedir

Sünger demir tozu üretimi için gerekli redükleyici etmen kok curufu ya da başka bir karbon kaynağıyla sağlanır. Ek olarak kireçtaşı, kokta bulunan kükürtle reaksiyon vermesi ve demir tozu içindeki empürite olan inklüzyonları önlemek için kullanılmaktadır. Cevher, redükleme ve dönel fırındaki kurutma için hazırlanır. Kok ve kireçtaşı %85’e %15 oranıyla karıştırılır. Bu karışımlar aynı zamanda dönel fırın içinde kurutulur ve sonrasında homojen boyutta kırılırlar (Şekil3.2.a).



Şekil 3.2 Högenäs prosesi akış şeması; a) Cevherin ve kok-kireçtaşı karışımının hazırlanması ve seramik tüplere doldurulması, b) tünel tipi fırın içinde cevher sünger demire redüklenir, c) sünger demir için tavlama fırını d) tavllanmış sünger demir tozunun karıştırılması ve ambalajlanması (Metals Handbook, 1998).

Tünel tipi fırının yüksek sıcaklık bölgesi içinde birçok kimyasal reaksiyon meydana gelmektedir. Kireçtaşının bozunumu karbondioksit üretmektedir ve karbondioksit kok içindeki karbonu karbonmonoksit şeklinde oksitlemektedir. Karbonmonoksit manyetitle reaksiyona girerek ilave karbondioksit ve demiroksit oluşturmaktadır. İleriki aşamada demiroksit karbonmonoksit tarafından metalik demire redüklenmektedir. Metalik demir partikülleri sünger demir keki oluşturmak için sinterlenirler. Ek olarak koka eklenen kireçtaşı ve kok içerisindeki kükürt arasında reaksiyon meydana gelmektedir.

Demiroksitin metalik demire redüklendiği prosesin termodinamiği ve kinetiği defalarca incelenmiştir ancak bu çalışmaların sonuçlarını Högenäs proses şartlarına uygulamak zordur. Redüksiyon işlemi sonunda seramik tüpler içindeki malzemenin oda sıcaklığına soğutulmasıyla demiroksitin %96'sı demire redüklenmektedir. Demir %0.3 C içermektedir. Redüklenmiş demir partikülleri aralarında ve içerisinde gözeneklere sahip içi boşluklu sünger demir silindiri oluşturmak üzere sinterlenirler.

Fırından çıkarılan sünger demir keki arabalarla boşaltma kısmına aktarılırlar. Seramik tüplerden çıkarılan silindirik sünger demir keki yaklaşık olarak 25 mm çapındaki parçalara ayrıldığı dişli kırıcıya bırakılır. Boşaltılan seramik tüpler temizlenir ve birbirini izleyen redüksiyonların gerçekleşmesi için tekrar dolduruldukları doldurma istasyonuna taşınırlar.

Tozların T/M üretim için uygun olan gözenekli yapılarının korunması sırasında, 25 mm çapındaki sünger demir kümesini istenilen parçacık boyut dağılımında üretmek ve manyetik olmayan empüritelerini uzaklaştırmak için bir dizi öğütme, manyetik ayırıştırma ve eleme işleminden geçirilir (Şekil 3.2.b).

Öğütme manyetik ayırma ve eleme sırasında tozun kimyasal bileşiminde sadece çok küçük değişimler olmaktadır. Sonuçta oluşan toz yaklaşık olarak %1 oksijen ve %0.3 karbon içermektedir. Ancak tozda önemli miktarda pekleşme sertleşmesi gerçekleşmiştir. Sonuçta yaklaşık olarak 55 m uzunluğunda konveyör tipi fırında tavllanır (Şekil 3.2.c).

Toz, bir tutma düzeneğiyle kendisini fırın içine taşıyan dayanıklı bir paslanmaz çelik konveyör üzerine konulur. Bu mekanizma fırına hava girişini engeller. Toz yaklaşık 870°C'ye kadar ayrılmış amonyak atmosferinde ısıtılır. Esasen tavlama sırasında toz içeriğindeki karbon uzaklaştırılır ve oksijen içeriği %1 den %0.3 kadar düşürülür. Aynı zamanda öğütme sırasında meydana gelen pekleşme sertleşmesi de azaltılır. Tavlama sırasında tozlar gevşekçe bir şekilde sinterlenirler ancak ambalajlanıp T/M parça üreticilerine nakliyat için hazır olan tozdan nihai ürünü imal etmek üzere az miktarda öğütme ve eleme gereklidir.

Sünger demirin üretimindeki redükleme ve tavlama adımları aslında süreklidir ancak işlemler arasında birçok bekletme sahası vardır. Bu bekletme sahaları, eşleme işlemi sayesinde tekdüze kalitede toz üretimine yardım etmektedir. Eşleme işlemi, tozun bekletme sahası dibinden çekilmesi ve bu sahanın tepesinden geri beslenmesiyle yeniden dolaşımından ibarettir (Metals Handbook, 1998).

3.1.1.2 Högenäs Ancor MH-100 tipik toz özellikleri

Çizelge 3.1 Högenäs prosesiyle üretilen Ancor MH-100 tipi tozun kimyasal bileşimini; çizelge 3.2 aynı tozun görünür ve ham yoğunluğu ile ham dayanımını; çizelge 3.3 ise aynı toza uygulanan elek analizinin sonuçlarını göstermektedir (Metals Handbook, 1998).

Çizelge 3.1 Toz bileşimi (Metals Handbook, 1998)

% Fe	% SiO ₂	% C	%H ₂ kaybı	% S	% P
98,2	0,20	0,01	0,26	0,01	0,01

Çizelge 3.2 Yoğunluk - Ham Dayanım (Metals Handbook, 1998)

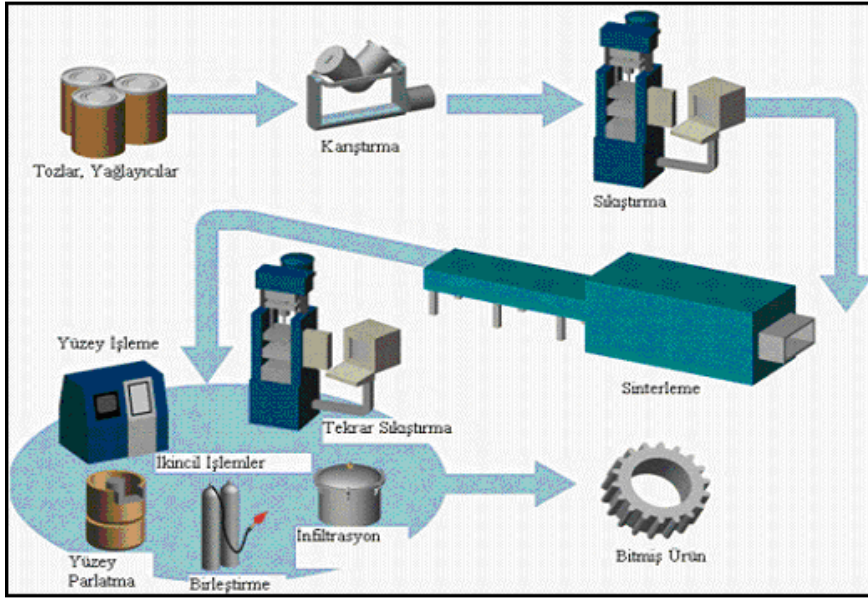
Görünür yoğunluk (gr/cm ³)	414 Mpa'lık sıkıştırma basıncındaki ham yoğunluk (gr/cm ³)	414 Mpa'lık sıkıştırma basıncındaki ham dayanım(Mpa)
2,58	6,42	16,5

Çizelge 3.3 Elek analizi (Metals Handbook, 1998)

Mesh	+ 80	-80+100	-100+150	-150+200	-200+250	-250+325	-325
%	eser	1	18	26	9	24	22

3.2 Toz Metalurjisiyle Parça Üretiminde İşlem Kademeleri

Toz metalurjisi parça üretimi nihai ölçülerde ve hassas boyutlarda parça üretimine imkan verdiğinden çok önemli ve üretim miktarı ile karmaşıklığı göz önüne alındığında oldukça ekonomik sayılabilecek bir üretim tekniğidir. T/M parça üretimi de çeşitli aşamalardan oluşmaktadır. Bunlar, harmanlama, sıkıştırma, sinterleme ve isteğe bağlı işlemlerdir (infiltrasyon, yağ emdirme, çapak alma, vb.). Bu yönteme ait imalat basamakları şekil 3.3'de gösterilmiştir (Baksan ve Gürler, 2003; Babacan, 2006).



Şekil 3.3 Toz metalurjisi yöntemine ait imalat aşamaları (Babacan, 2006)

3.2.1 Harmanlama

İstenilen boyut, şekil ve bileşimdeki ham tozların, alaşım elemanları ve ham tozlarla karıştırılması işlemidir. Bu işlem özel karıştırıcılarla homojen bir harman elde edilinceye kadar sürdürülür (Babacan, 2006). Yağlayıcı olarak metal stearatlar ve mum kullanılır. Yağlayıcı kullanılmasının temel nedeni;

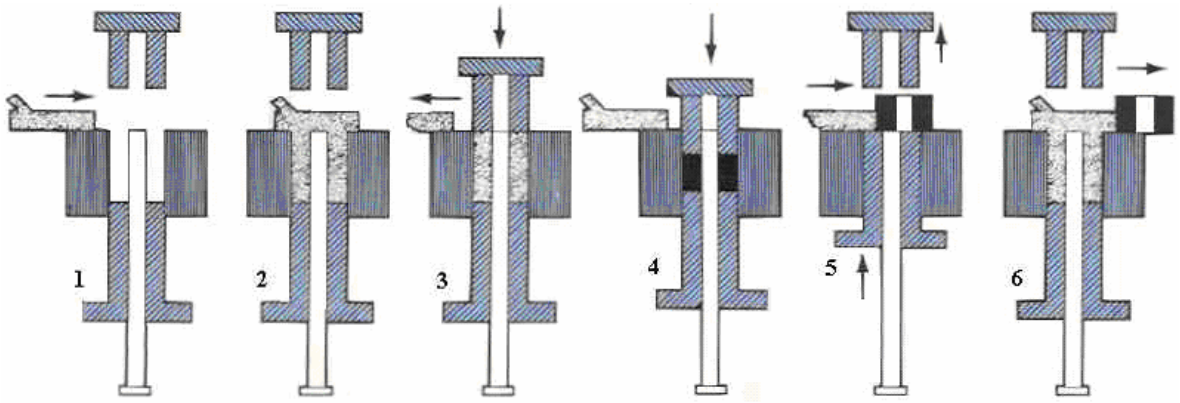
- ✓ Sıkıştırma esnasında tozun kalıp cidarlarına yapışmasını engellemek,
- ✓ Tozların birbiri üzerinde daha rahat kaymasını sağlamak,
- ✓ Preslenmiş parçanın kalıptan çıkışını kolaylaştırmak.

3.2.2 Presleme

Presleme genellikle oda sıcaklığında özel şekilde hazırlanmış çelik kalıpta yapılır. Tozun plastik şekil değiştirme özelliğine göre 1–10 ton/cm² arasında değişen basınç tatbik edilir. Sinterlenmiş cisimlerin fiziksel özellikleri üzerinde yapılan araştırmalardaysa bazen 30 ton/cm² ye kadar ulaşan basınçlar kullanılmıştır (Ersümer, 1970).

Geleneksel toz sıkıştırması işleminde, tek eksen boyunca uygulanan basınç sonucu kalıbı dolduran tozlar preslenerek şekillendirilir. Toz doldurulduktan sonra, üst baskı plakası (dalgiç piston) ile basma gerçekleşir ve toz metal blok parça alt pistonun hareketi ile çıkarılır (Şekil 3.4). Kalıp duvarının aşınmasını engellemek ve tozların kolay sıkışılabilirliği için tozlara ve kalıp duvarlarına yağlayıcı eklenir (Öveçoğlu, 1997).

Tek yönlü preslemede uygulanan basınç arttıkça toz kütleinin yoğunluğu artar. Yani bünyedeki gözeneklilik düşer. Tek yönlü presleme ekonomik bir yöntem olmasına karşın, bazı dezavantajları ve sınırları vardır. Karmaşık şekilli parçalar ile boy/en oranı yüksek ($L/W > 2.5$) metalik parçalarda istenen ham yoğunluklar gerçekleşemez. Bu yüzden karmaşık ve boy/en oranı fazla olan şekillerdeki parçaları basmak amacıyla soğuk izostatik presleme (SİP) ile tozların preslenme işlemleri gerçekleştirilir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen SİP işleminde, tozlar kauçuk bir kalıba doldurularak yağda dolu basma hücresinin içerisine yerleştirilir. Basma pistonu veya dalgıcı sayesinde yağ, kalıba her yönden eşit baskı yapar ve bu sayede basılmış numunelerin her tarafı aynı yoğunlukta olur (Öveçoğlu,1997).



Şekil 3.4 Presleme basamakları (www.mpif.org)

İzostatik presleme, hedeflenene yakın boyut ve şekillerdeki T/M parçalarını üretmek için kullanılır. Geleneksel presleme veya kalıplamadan farklı, izostatik presleme yağ, gaz veya su gibi bir basınçlı sistemde gerçekleştirilir. İzostatik preslemenin faydaları arasında;

- Karmaşık şekil kabiliyeti,
- En aza indirilmiş pahalı toz girişi,
- Azaltılmış malzeme kaybı (karmaşık şekil yapımında),
- Preslenmesi zor parça üretebilme,
- Genellikle bağlayıcı ihtiyacı olmaması,
- Parçayı son şekil ve boyutuna yakın üretebilme,
- Homojen yoğunluk ve özellikler sıralanabilmektedir (German, 1997).

Soğuk presleme ve sonradan sinterleme, sıcak presleme veya basınç altında sinterlemeye nazaran daha pratiktir. Sadece tel çekme haddelerinin, elmas alaşımlarının imali gibi istisnai hallerde kullanılmış olan bu yöntem, tozların veya özel şekilde ısıtılmış kömür, çelik veya

grafit bir matris içine yerleştirilerek sıkıştırılmış parçaların sinterlenmesi esnasında basınç tatbik edilmesinden ibarettir (Ersümer,1970).

3.2.3 Sinterleme

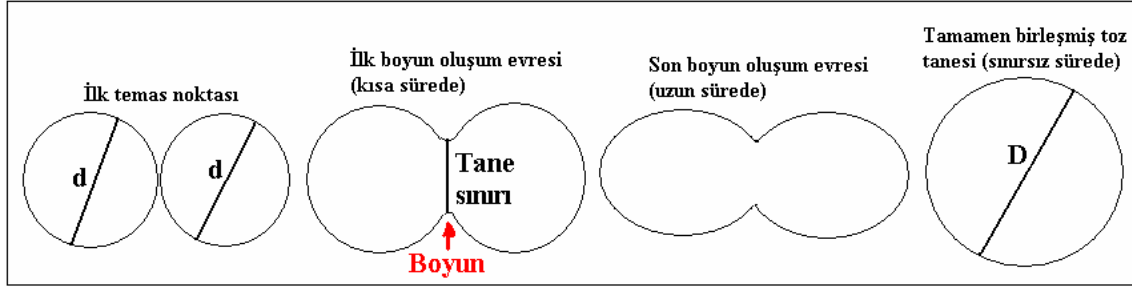
Sinterleme toz metalurjisindeki önemli işlemlerden biridir. Şu an uygulama fırınlarındaki sinterleme, eskiden uygulanan birleştirme işlemi hataları üzerine geliştirilmiştir. Sinterleme preslenmiş parçaların mukavemet kazandığı yüksek sıcaklıklar kullanılarak uygulanan ısı işlemi olarak tanımlanır. Sinterlemenin ana mekanizmaları yüzey ve hacim difüzyonudur (Lawley ve Apelian ,1990; Kara vd.,1995).

Sinterleme işlemi kullanılırken sinterleme esnasında, birleştirme ve sıcaklık şartları istenilen özellikleri elde edebilmek için kontrol altında tutulur. Malzemenin sinterlenmesi esnasında birçok işlem basamakları (oksit indirgenmesi, bağlayıcıların kaldırılması veya kimyasal reaksiyonlar) meydana gelir. Mesela; demirin sinterlenmesi esnasında, oksit indirgenmesi, yağlayıcıların dağılımı, karbon kaybı olması, sıcaklığa bağlı olarak azot çözünübilirliği ile değişir. Yüzeyin gazı dışarı atması Fe_α 'dan Fe_γ 'ya dönüşüm, 900°C üzerindeki sıcaklıklarda tane büyümesi ve sıcaklığa bağlı olarak (bu dönüşüm bronz için 800°C) difüzyon artışı meydana gelir. Aynı zamanda gözenek morfolojisi değişir (Lawley ve Apelian,1990).

Sinterleme süreçlerinde kullanılan sıcaklıklar genellikle sinterlenecek olan parçada katı-hal atom yayınma ve ergime sıcaklığının altında seçilse de, özellikle çok sistemli alaşımlarda sıvı-faz sinterlemesi olarak bilinen bir sıvı fazın varlığı da gerçekleşebilir. Toz parçacıklarının yüksek yüzey enerjileri aşılarak ya da ortadan kaldırılarak gerçekleşen sinterleme sonucu toz taneleri arasında tam ve mükemmel bağlar oluşur, bunun sonucunda içyapıdaki gözeneklilik sıfıra düşer. Hacim başına düşen yüzey enerjisi toz parçacık çapının tersi ile doğru orantılı olduğundan, küçük toz parçacıkları büyüklere kıyasla daha kolay sinterlenirler (Öveçoğlu,1997).

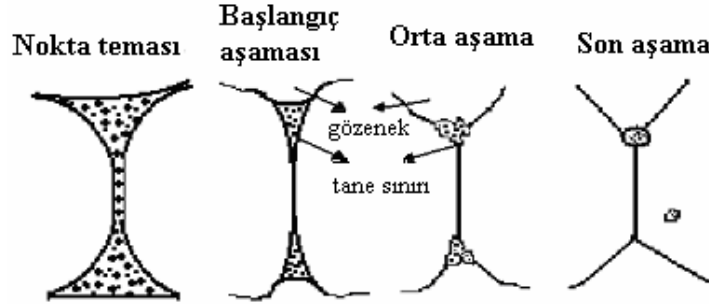
Yapısal değişiklikler başlıca difüzyon prosesleri olan taşıma mekanizması ile sinterleme süresince boyun oluşumuyla meydana gelir. Difüzyon termal bir hareket mekanizması olup atomik yer değiştirmeler için gerekli enerji olarak adlandırılır. Atomik hareket bir atomun enerjisinin aktivasyon enerjisine eşit ya da daha yüksek enerjiye ulaşmasıyla yapı içerisinde sıkı durumundan kurtulup boş bölgeye geçmesiyle oluşur. Difüzyon mekanizması aktif atomların fazla olması nedeniyle yüksek sıcaklıklarda daha hızlı gerçekleşir.

Preslenmiş parçalarda her toz tanesi üzerinde temas noktaları meydana gelir. Temas halindeki taneler arasındaki bağlar sinterleme evreleri ilerledikçe büyür ve birleşir. Her bir temasta, katı-buhar ara yüzeyi oluşarak bir tane sınırı gelişir. Şekil 3.5'te uzun süre sinterleme sonucunda iki partikülün tamamen birleşerek son çapı ilk çapının 1.26 katına eşit büyüklükte tek bir küresel forma dönüşme aşamaları gösterilmektedir (German, 1997).



Şekil 3.5 Sinterlemede toz tanelerinin teması, boyun oluşumu ve tek tane haline gelme

Sinterleme sırasında morfolojik bağların oluşumu ve gözeneklerin kapanması yayınmaya bağlı olarak şekil 3.6'de görüldüğü gibi ilk, orta ve son aşamaları olan bir geometrik sıra takip eder (Öveçoğlu, 1997).



Şekil 3.6 Sinterlemede metalurjik bağ oluşumu ve gözeneklerin kapanması (Kurt, 1992)

Toz taneleri arası boyunun hızlı gelişmesi sinterlemenin ilk aşaması olarak nitelendirilir. Orta evrede gözenekli yapı daha pürüzsüz olur ve parça özellikleri gelişerek taneler birbirine bağlanıp silindirik bir hal alır. Sinterleme evreleri arasında açık ayrımlar yoktur. Orta evre genellikle geniş eğrilik gradyanlarıyla oluşan mikro yapıya karşılık gelir. Büzülme ve boyun büyüklüğü oranlarının her ikisi de küçüktür ve tane boyutu ilk partikül boyutundan daha büyük değildir. Orta evrede, gözenekler daha düzgün ve yoğunluk teorik olarak %70–90 arasındadır. Orta evrede tane büyümesi geç meydana gelir, bu yüzden tane büyüklüğü ilk evredeki toz tane boyutundan daha büyüktür. Sinterlemenin son evresiyle, gözenekler

küreselleşir ve kapanır, böylece tane büyümesi açıktır. Sinterleme sırasında boyutta orta derecede değişim görülür. Birçok malzeme küçüldüğü halde, bakır gibi bazı alaşımlarda boyutta artış görülür. Baskı kalıbı tasarlanırken bu değişimlerin de göz önünde bulundurulması gerekir.

Yüzey difüzyon mekanizması, partikül yüzeyinde kütle akışı meydana gelmesi ve sona ermesi nedeniyle toz taneleri arasında bir değişme (büzülme veya yoğunlaşma) olmaksızın boyun büyümesi meydana getirir. Yüzeysel taşınım mekanizması sinterlemeyi kontrol ettiği sürece, yüzey difüzyonu ve buharlaşma-kondensasyon en önemli etkenlerdir. Yüzey difüzyonu demir içeren çoğu metalin düşük sıcaklık sinterlemelerinde baskındır. Buharlaşma-kondensasyonu yüzey difüzyonu kadar önemli değildir. Ancak Pb gibi düşük stabiliteye sahip metallerin sinterlenmesinde baskındır.

Genelde yüksek sıcaklıklarda daha aktif olan hacim difüzyon mekanizması sinterlemedeki büzülme nedenlerini kontrol eder. Kütle akışı boyundaki değişimle toz taneleri arasında meydana gelir. Hacim difüzyon mekanizması hacimsel difüzyonu, tane sınırı difüzyonunu, plastik akışı ve viskoz akışı içerir. Plastik akış genellikle ısı periyot süresince çok önemlidir, özellikle de ilk dislokasyon yoğunluğu geniş olan kompakt tozlar içindir. Bununla birlikte, yüzey gerilmeleri yeni dislokasyonların oluşması için genellikle yetersizdir. Böylece plastik akışın rolü, dislokasyonların tozun dışına tavlama ile azalır. Cam ve plastikler gibi amorf malzemeler ise malzeme viskozitesine ve tane boyutuna bağlı olan bir oranda tanelerin birleşmesiyle oluşan viskoz akışla sinterlenir. Viskoz akışı bir de tane sınırları üzerinde sıvı fazlara sahip metaller için gereklidir. Tane sınırı difüzyonu kurallara uygun olarak çoğu kristalin malzemelerin yoğunlaşmasında önemlidir ve birçok yaygın metalin yoğunlaşmasında hakimiyeti görünür. Hem yüzey hem de hacim difüzyonu sırasında boyun büyümesi gerçekleşirken, sinterleme süresince iki mekanizma arasındaki temel farklılık yoğunlaşma ya da büzülme açısından görülmektedir (German, 1997).

3.2.4 Sinterleme sonrası yapılan ikincil işlemler

Toz metalurjik parça genellikle sinterlemeden sonra kullanıma hazırdır. Ekonomik bakımdan arzu edilmese de sinterleme sonrası bazı işlemlere gerek duyulabilir. İlk sıkıştırma işleminden farklı bir kalıpta yüzey hassaslığı, yoğunluk ve ölçü hassasiyetini sağlamak amacıyla yapılan sıkıştırma işlemine yeniden presleme adı verilir. Toz metalurjik parçanın gözeneklerini yağ, plastik, vb. metal olmayan bir malzeme ile doldurmak gerekebilir. Gözeneklere düşük ergime noktalı bir metal veya alaşım emdirilerek yoğunluk, mukavemet, sertlik, süneklik ve darbe

dayanımında artış sağlanabilir. Kaplama işlemi yapılmadan önce yüzeydeki gözenekler reçine veya deformasyonla kapatılmalıdır. Buhar işlemi ile demir asıllı parçaların yüzeyleri manyetik demiroksit ile kaplanarak sertlik, basma dayanımı, aşınma ve korozyon dirençleri artırılır. Bu işlem 600°C’de kuru basınçlı buharın parçalara uygulanmasıyla yapılmaktadır (Babacan, 2006). Çizelge 3.4’te sinterleme sonrası yapılan ikincil işlemleri, uygulanma amaçlarını ve uygulandığı parçalar gösterilmektedir.

Çizelge 3.4 İkincil işlemler, uygulandığı parçalar ve uygulanma amaçları (Babacan, 2006)

İkincil İşlemler	Uygulanan Parçalar	Amaç
Tekrar Presleme		
* Baskı	Tüm Parçalar	Yoğunlaştırma, Yüzey şeklini iyileştirmek, Boyutsal kontrol
* Ölçüye getirme	Tüm Parçalar	Boyutsal kontrol
Emdirme		
* Yağ	Yatak parçaları	Yataklarda kendini yağlama
* Reçine	Yapısal parçalar	Talaşlı işlemi kabiliyetini iyileştirir, yüzeyi diğer metallerle kaplanmaya hazırlar, gaz yada sıvı sızdırmazlığı, yağlama
İnfiltrasyon		
	Demir esaslı parçalar	Sertlik ve dayanım artar, gaz yada sıvı sızdırmazlığı
	Yapısal parçalar	Süneklik ve talaşlı işlem kabiliyetini iyileştirir, yüzeyi diğer metallerle kaplanmaya hazırlar

Çizelge 3.4 (Devamı) İkincil işlemler, uygulandığı parçalar ve uygulanma amaçları (Babacan, 2006)

İkincil İşlemler	Uygulanan Parçalar	Amaç
Isıl işlem		
Sertleştirme ve menevişleme	Demir esaslı yapısal	Sertlik ve dayanım artar
Buhar işlemi	Demir esaslı	Yüzey sertliği-aşınma dayanımını arttırmak, gözenek doldurmak, korozyon direncini iyileştirmek
Talaşlı işlem		
Delme ve diş açma	Tüm parçalar	Vida ve bağlantı elemanı montajı
Tornalama	Tüm parçalar	Toleransların eldesi, sıkıştırma ile elde edilemeyen formları oluşturmak
Frezeleme	Tüm parçalar	Oluk-yiv açmak
Zımparalama	Tüm parçalar	Kalıntıları yok etmek, yüzeyleri düzgün ve paralelleştirmek, boyutsal toleransları iyileştirmek

Çizelge 3.4 (Devamı) İkincil işlemler, uygulandığı parçalar ve uygulanma amaçları (Babacan, 2006)

İkincil İşlemler	Uygulanan Parçalar	Amaç
Bitirme		
Çapak Alma	Tüm parçalar	Kalıp ve zımba kaynaklı çapakları gidermek
Fıçıda parlatma	Demir esaslı yapısal	Bilya boyutu, boyut kontrolü ve yüzey bitirme
Kaplama yağa batırma	Demir esaslı	Korozyon direnci
Cu, Ni, Cd, Zn, Cr kaplama	Demir esaslı	Korozyon direnci, görüntü
Kaynak	Demir esaslı (min.6,8 gr/cm ³ yoğunluk)	Birleştirme, montaj
Siyah Oksit	Demir esaslı, reçine emdirilmiş parçalar	Korozyon direnci, boyaya hazırlık
Mekanik Yüzey İşlemleri: Cam boncuklama, tel fırçalama, kumlama, yuvarlama / titreşimli bitirme	Tüm parçalar	Temiz, iyileştirilmiş yüzeyler
Bilya püskürtme	Demir esaslı yapısal, dövme	Yüzeyin yorulma ömrünü iyileştirme

3.2.4.1 İnfiltrasyon

Parça içerisindeki birbirleri ile bağlantılı gözenekler, ana metalin sinterleme sıcaklığından daha düşük bir ergime sıcaklığına sahip bir alaşımla doldurulur. Mesela, bakır esaslı alaşımlar sinterleme esnasında demir esaslı parçalara sızarlar. İnfiltrasyon işlemi parçaları sızdırmaz

yapar ve mekanik özelliklerde artışa sebep olur. Ancak boyut hassaslığı azalır. İnfiltrasyon işlemi bazı ısıt işlemleri kolaylaştırır. Mesela, birbirine bağlı gözenek kalmadığı için yüzey sertleştirme işleminde sertlik derinliği kontrolü kolaylaşır (www.turktoz.gazi.edu.tr).

3.2.4.2 Yağ emdirme

Sinterlenmiş parçalara yağ ve diğer metalik olmayan malzemeler emdirilerek korozyona karşı koruma artırılır. Kendi kendine yağlamalı yataklar, sinterlenmiş gözenekli yataklara yağ emdirilmesi sonucu ve sadece T/M yöntemi ile üretilir (www.turktoz.gazi.edu.tr).

3.2.4.3 Boyutlandırma

Boyutlandırma sinterleme sonrası yapılan ilave presleme işlemidir. Ana amaç, boyut hassasiyetini ve beraberinde yüzey kalitesini artırmaktır. Az miktarda plastik deformasyona ihtiyaç olduğu için orta büyüklükteki basınçlara ihtiyaç vardır (www.turktoz.gazi.edu.tr).

3.2.4.4 İkinci presleme

İstenilen mekanik ve manyetik özelliklerin sağlanmasında gerekli olan parça yoğunluğunu elde etmek için bir gözenek azaltma işlemi olan ikinci presleme kullanılır. Preslenmiş parçanın 700–800°C arasında ön sinterlenmesi ile yağlayıcılar yanar ve yeniden kristalleşme meydana gelir. Pekleşme ve iç gerilmeler kaldırıldığından malzeme sünekliğini tekrar kazanır. İkinci preslemeden sonra parçalar ikinci defa sinterlenir (www.turktoz.gazi.edu.tr).

3.2.4.5 Buharlama işlemi

Bu işlem sadece demir esaslı parçalara uygulanabilir. Parçaları 550°C'ye kadar ısıtarak ve onları su buharına maruz bırakarak dış yüzeylerinde ve iç bağlantılı boşluklar boyunca ince bir Fe₃O₄ tabakası oluşturulur. Buharlama işlemi korozyon mukavemeti, sertlik, basmaya karşı dayanım ve aşınma dayanımında artışa sebep olur (www.turktoz.gazi.edu.tr).

3.2.4.6 Talaşlı imalat işlemi

Sinterlenmiş parçaların üretilmesindeki en önemli çekicilik karmaşık şekiller ve dar toleransa sahip parçaların üretilmesi olmasına rağmen, bazı sınırlamalar bulunur. Bundan dolayı frezeleme, delik delme (presleme doğrultusuna dik delikler), dış açma gibi talaşlı imalat operasyonları, kalıpta presleme ile elde edilemeyen şekillerin eldesinde kullanılır. Sinterlenmiş metallerin talaşlı imalatı genellikle aynı bileşimdeki döküm-dövme alaşımlarından daha kolaydır. Bundan dolayı kesme hızı ve kesme takımları optimum sonuçları almak için ayarlanmalıdır. Takım ömrünü artırmak için, MnS gibi işlenebilirliği

artırıcı katkıları toz ile karıştırılabilir. Sinterleme sonrası bu katkıları yapı içerisinde düzgünce dağılmış olarak kalır ve mekanik özellikleri belirgince etkilemez (www.turktoz.gazi.edu.tr).

3.2.4.7 Çapak alma

Bu işlem, presleme ve talaşlı imalattan kaynaklanan çapakları almak için kullanılır. En yaygın metod tamburlamadır ve bazı durumlarda içinde aşındırıcı toz bulunan sıvı ortamlar kullanılır (www.turktoz.gazi.edu.tr).

3.2.4.8 Birleştirme

Karmaşık ve büyük parçalar birleştirme ile üretilebilir. Difüzyonla birleştirme, sinter-birleştirme ve lazer kaynağı gibi birçok birleştirme tekniği vardır (www.turktoz.gazi.edu.tr).

3.2.4.9 Isıl işlem

Alaşımlarda faz dönüşümleri gözenek miktarına değil kimyasal bileşim ve alaşımların homojenliğine bağlıdır. Böylece döküm-dövme alaşımlara uygulanan tüm ısıl işlemler sinterlenmiş malzemeler içinde uygulanabilir. Sertleştirme operasyonu önemli ölçüde mukavemeti ve aşınma direncini artırır, fakat süneklik azalır. Sinterlenmiş parçalarda karbürleme ve karbo-nitrürleme gibi yüzey sertleştirme işlemleri yaygınca kullanılır (www.turktoz.gazi.edu.tr).

3.2.4.10 Yüzey kaplama

İhtiyaç duyulduğu zaman, korozyondan korunma kaplama ile gerçekleştirilebilir. Fakat düşük yoğunluktaki parçalar kaplama öncesi elektrotun boşluklara girmesini önlemek için doyurulmalıdır (www.turktoz.gazi.edu.tr).

4. SİNERLEME ATMOSFERİNİN TOZ METALURJİK YAPILARA ETKİSİ

Farklı tipteki her bir atmosferin kendine has özellikleri mevcuttur ve hepsi sinterlenen malzemeleri farklı şekillerde ve miktarlarda etkilemektedir. Bu özelliklerine bağlı olarak her bir atmosfer farklı işlevleri yerine getirmek için ayarlanmakta ve kullanılmaktadır (Metals Handbook, 1998).

4.1 Sinterleme Atmosferinin İşlevleri

Sinterleme için kullanılan atmosferler birçok işlevi yerine getirmek zorundadır. Sinterleme sırasında;

- ✓ Fırına giren hava engellenmelidir,
- ✓ Bağlayıcı ve yağlayıcı maddeler sinterlenen parçalardan uzaklaştırılmalıdır,
- ✓ Toz partikülleri üzerindeki yüzey oksitleri giderilmelidir,
- ✓ Sinterlenen çelik parçaların merkezinde ve yüzeyindeki karbon kontrol altında tutulmalıdır,
- ✓ Özel uygulamalarda karbon giderilmelidir,
- ✓ Özel uygulamalardaki soğuma sırasında kontrollü oksitlenme sağlanmalıdır,
- ✓ Isı verimli ve homojen bir şekilde parçadan uzaklaştırılmalıdır.

Fırın atmosferleri sinterleme işlemini ve işleme maruz kalan malzemeleri etkilemektedir. Sinterleme hiçbir zaman havada ya da oksijence zengin atmosferlerde yapılmamaktadır. Sinterleme atmosferinin temel işlevi metal parçaları havayla temastaki etkilerden korumaktır. Atmosferler fırın açıklıklarından malzemelere havanın sızmasını önlemek için yeterli basınç ve akış hızında tutulmalıdırlar. Atmosferler parçayı korumanın yanında iletim ve taşınım ile düzgün ısıtma ve soğutma için fırının farklı bölgelerinde homojen ısı transferini sağlamaktadır. Tipik bir sinterleme fırınının işlem bölgeleri çizelge 4.1’de görülmektedir.

Atmosferlerin önemli bir diğer işlevi ise toz metali kompaktlamak için kullanılan hidrokarbon yağlayıcıları yakmak ve uzaklaştırmaktır. Fırının düşük sıcaklık-yağlayıcı giderme bölgesinde uzaklaştırma işlemi sinterlemenin ilk aşamalarında meydana gelmektedir. Oksitleyici gazların atmosferde küçük miktarda bulunması, parçaları oksitlenmeden ya da çelik parçaları dekarbürize etmeden yağlayıcının verimli bir şekilde yakılmasını sağlar. En verimli oksidanlar su ve karbondioksit miktarıyla kontrol edilir (Metals Handbook, 1998).

Çizelge 4.1 Tipik sinterleme fırını şeması (Metals Handbook, 1998)

Fırın Bölgeleri					
Atmosfer İşlevleri	Isı homojen şekilde kolayca nakledilir	Yüzey oksitlerini redükler	Cu ergitme, kaplama yada İnfiltrasyon	Karbon kontrolü	Soğutma
		Karbon difüzyonu	Bağ oluşumu	Soğuma hızı kontrolü	Oksidasyonun önlenmesi yada kontrollü düşük oksidasyon
Atmosfer Bileşimi	Az derecede oksitleyici	Yüksek derecede redükleyici	Redükleyici	Redükleyici	Az redükleyici-nötr yada az oksitleyici
		Karbona nötr	Karbona nötr tercih edilir.	Karbona nötr tercih edilir.	
Sıcaklık Aralığı	425-650 °C	650-1200°C	1040-1120 °C	1120-815°C	815-ortam sic.°C

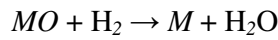
540°C üzerinde bu gibi oksitleyici gazlar olmadan yağlayıcılar ısıl olarak hidrojen ve karbona ayrışma eğiliminde olurlar. Hidrojen gaz olarak tahliye edilir ancak karbon kurumlu bir tortu olarak kalmaktadır. Uygun bir oksitleyici mevcutsa o zaman termal ayrışmadan ziyade kimyasal reaksiyon meydana gelir. Yağlayıcı içindeki karbon, oksitleyici ile birleşir ve karbonmonoksit - karbondioksit gaz karışımıyla uzaklaştırılır.

Sinterleme atmosferinde yağ uzaklaştırma işlemi nemli atmosfer (yoğunlaşma noktası yüksek) kullanıldığı zaman daha verimli olmaktadır. Hava hareketi sağlanmak şartıyla, hava akışı fırın girişine doğru olmalıdır. Yağ uzaklaştırma bölgesinde ideal olarak T/M kompaktların maksimum sıcaklığı 425–650°C arasında değişmelidir.

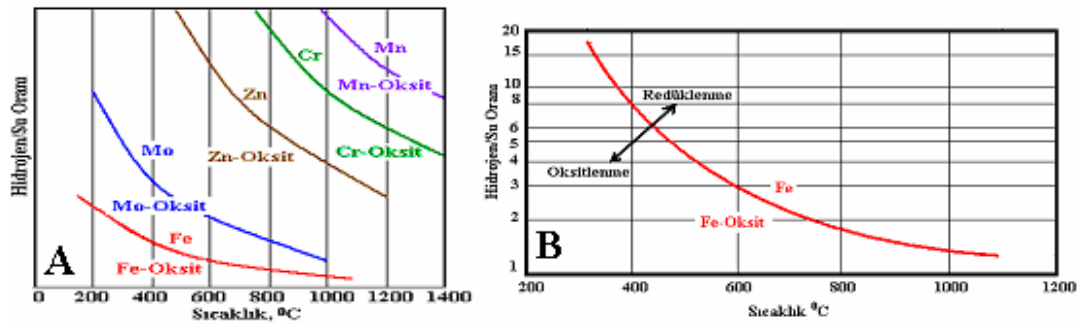
Sinterleme işlemi ilerledikçe yağ uzaklaştırmanın yanında fırın atmosferinin bir diğer görevi de yerine getirilir. Yaklaşık 650°C civarında genelde yağ giderme bölgesinin sonuna doğru ve yüksek sıcaklık bölgesi girişinde (çeliklerde 1120°C) fırın atmosferi metal tozları üzerinde oluşan yüzey oksitlerini soymaya başlamaktadır.

Ön ısıtma bölgesinde fırın atmosferi, temiz metalik yüzey sağlamak amacıyla metal tozları üzerinde oluşan yüzey oksitlerini redüklemelidir; metal toz üzerindeki metalik yüzey T/M kompaktı oluşturmaktadır. Bu durum eklenen grafitin demir tozlarına difüzyonuna izin vermektedir. Böylece soğuma sırasında perlitik mikroyapı oluşur. Grafitin metal tozlarına yayılımı gerçekte parçalar 1040°C'ye ulaştığında tamamlanmaktadır.

1100°C üzerindeki temiz toz tane yüzeyleri tozların daha fazla bağ yapmasını sağlar. Böylece fırın atmosferinin etkisi olarak daha çok oksit redüklenmesi olur. Ayrıca toz taneleri arasındaki gözenekler yuvarlaklaşarak parçanın yapısal bütünlüğünü ve tokluğunu arttırmaktadır. Birçok çalışma koşulu altında metal oksitler (*MO*) metale (*M*) birincil olarak atmosferin hidrojen bileşeni tarafından redüklenirler.

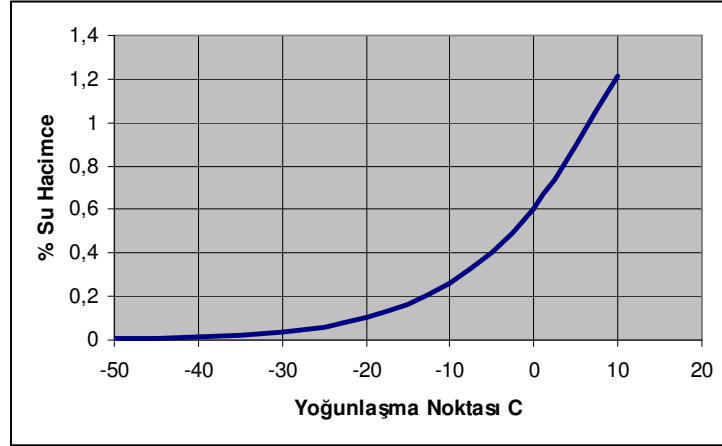


Oksit redükleyici atmosferin etkinliği hidrojenin suya oranıyla saptanabilir (Şekil 4.1.a ve b.).



Şekil 4.1 a) T/M de çok kullanılan elementler için metal-metal oksit dengesi; bakır, kobalt, nikel ve kalay oksitler, demir oksitten daha kolay redüklenir b) Demir-demir oksit dengesi (Metals Handbook, 1998)

T/M sektöründe su içeriği genellikle atmosferin yoğunlaşma noktasının ölçülmesiyle saptanır. Sinterleme atmosferi yoğunlaşma noktasının su içeriği fonksiyonu Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Çizelge 4.2’de ise farklı yoğunlaşma noktalarına isabet eden hacimce su miktarı belirtilmiştir. Hidrojenin suya oranı arttıkça redükleme reaksiyonu daha verimli olmaktadır. Hidrojenin suya oranı atmosferin redükleme verimliliğini belirtmektedir. Ayrıca, verilen yoğunlaşma noktası için sıcaklık arttıkça atmosferin hidrojen içeriği daha fazla redükleyici olmaktadır (Metals Handbook, 1998).



Şekil 4.2 Atmosferin yoğunlaşma noktası - su içeriği fonksiyonu (Metals Handbook, 1998)

Çizelge 4.2 Yoğunlaşma noktası-hacimce su içeriği değerleri (Metals Handbook, 1998)

Yoğunlaşma Noktası °C	Su, % Hacimce
-80	0,00005
-60	0,00106
-40	0,0127
-20	0,1020
0	0,6020
10	1,212
20	2,3080

Sinterleme sırasında kullanılan atmosfer çelik yüzeyindeki ve merkezindeki karbon miktarını kontrol etmektedir. Bu işleyle ilgili reaksiyonlar, öncelikle fırının yüksek sıcaklık ve yavaş soğuma bölgelerinde meydana gelmektedir. Atmosfer yaklaşık 5°C yoğunlaşma noktasına sahip, %60 yanabilir (hidrojen ve karbon monoksit) çok aktif endotermik atmosfer ise çelik yüzeyindeki yaklaşık %0.8'lik bağlı karbon dekarbürize olarak yüksek sıcaklık bölgesinde %0.2 seviyesine iner ve bunun derinliği 0.5–2.5 mm civarındadır (Metals Handbook, 1998).

Dekarbürizasyonun derecesi ve derinliği aktif endotermik atmosferin yoğunlaşma noktasına, sıcak bölgedeki işlem süresine-sıcaklığa ve çelik parçanın gözenekliliğine bağlıdır. Bu parametrelerin yüksek değerlerinde daha çok dekarbürizasyon olmaktadır.

Aktif endotermik atmosferde 1120°C'den 815°C'ye yavaş soğuma sırasında, parça yüzeyindeki karbon miktarı eskiye oranla daha çok veya daha az miktardadır. Yüksek sıcaklık bölgesindeki dekarbürizasyon sonrası yavaş soğuma bölgesinde meydana gelen karbon geri kazanımı endotermik seyreltik azot veya %20 ve daha fazla hidrojen-karbonmonoksit içeren yanıcı metanol (seyreltik azottan ayrılmış) atmosferi gibi diğer aktif atmosferlerde de görülür. Bu nedenle fırının yavaş soğuma bölgesi karbonun geri kazanımına yardımcı olacak şekilde tasarlanmalıdır.

Eğer fırın atmosferi karbona nötr ise, yüksek sıcaklık bölgesindeki dekarbürizasyon ve yavaş soğuma bölgesinde sonradan ortaya çıkan karbon geri kazanımı asla gerçekleşmez veya aktif endotermik bölgede oluşan geri kazanımdan daha az seviyede olur. Nötr atmosferler için karbon potansiyeli sıcaklıkla ilişkili değildir. Sonuç olarak, nötr atmosferler endotermik atmosferlerden farklı olarak T/M çelik parçaların yüksek sıcaklıkta sinterlenmesi için uygun olmaktadır.

Ayrıca farklı karbon oranlarına sahip parçalar, aynı tablada veya rasgele tabla düzeninde fırının düzenlenmesine gerek duyulmadan nötr atmosferde sinterlenebilirler. Çelik parça içindeki karbon miktarı, toza eklenen grafit miktarına ve nötr atmosferin yoğunlaşma noktasına bağlıdır. Daha düşük yoğunlaşma noktasında, daha az karbon kaybı olmaktadır.

Bazı özel sinterleme uygulamalarında örneğin; manyetik ve paslanmaz çelikler ve yüksek süneklikteki demir için sinterleme sırasında karbon mümkün olan en düşük seviyeye redüklenmelidir. Bu tip uygulamalarda karbonmonoksit gibi karbon içeren gaz atmosferlerinden kaçınılmalıdır. Parçanın sinterlenme kalitesine ters bir etki olmadan dekarbürizasyon için nispeten yüksek yoğunlaşma noktaları gereklidir.

Bazı uygulamalarda korozyon dayanımını iyileştirmek ve servis ömrünü arttırmak için 540°C'nin altındaki soğuma sırasında sinterlenmiş parçaları az da olsa oksitleyen atmosferlerin, kontrollü oksidasyon sağlaması istenir (Metals Handbook, 1998).

Atmosferlerin bir görevi de parçadaki ısıyı genellikle suyla soğutulmakta olan fırın duvarlarına verimli şekilde transfer ederek soğumaya yardımcı olmaktır. Isı transferi ışıma, iletim ve taşınım şeklinde gerçekleşir. Işımayla ısı transferi 700°C altında etkili değildir. İletimle ısı transferinin başarısı ise atmosferin, ısı yayan parçaların arasında kalan gazın ve ısıalan fırın duvarlarının ısı iletkenliğine bağlıdır. Hidrojence zengin atmosferler azotça zengin atmosferlerden daha iletkenlerdir. Taşınım ile ısı transferi sıcak ve soğuk bölgeler arasındaki atmosferin dolaşımına veya hareketine bağlıdır. Daha fazla atmosfer dolaşımıyla ısı transferinin hızı artmaktadır. Atmosfer dolaşımı ve yüksek ısı iletken olan gazlar soğumayı iyileştirmektedir. Soğuma bölgesindeki atmosfer dolaşımı, azotça zengin atmosferlerin düşük olan ısı iletkenliğini telafi edebilmektedir.

Bu işlemlerdeki fonksiyonlarına ek olarak atmosferler başka etkilere de sahiptir. Fırını ve fırın parçalarını sinterleme sırasında oluşan kimyasal reaksiyonlardan ve ısı etkilere korunmaktadır. Atmosferler aynı zamanda fırın operatörü için güvenli çalışma sahası sağlamalıdır. Atmosferler ekonomik fiyatlarla güçlük çekmeden uygun bileşimlerde bulunabilir olmalıdırlar (Metals Handbook, 1998).

4.1.1 Atmosfer Çeşitleri

Sinterlemede kullanılan konvansiyonel atmosferler; endotermik gaz, egzotermik gaz, ayrılmış amonyak, hidrojen ve vakum atmosferleridir.

Endüstride en çok kullanılan (%83) endotermik atmosfer doğalgazın kısmi yanması sonucunda elde edilir. Endüstride nadir olarak kullanılan (%5) egzotermik atmosfer ise doğalgazın eksik yanması sonucu elde edilir ve demir dışı metallerin sinterlenmesinde kullanılmaktadır.

Ayrılmış amonyak ve hidrojen atmosferleri doğalgazdan dolaylı olarak elde edilir. Bu atmosferler paslanmaz çelik, manyetik alaşımlar ve bazı özel malzemelerin sinterlenmesinde kullanılmaktadır. Doğalgazdan daha bağımsız ve çok yönlü kullanımı olan azot esaslı atmosferler daha ekonomik olduklarından günümüzde geniş bir kullanım sahasına sahiptirler. Vakum atmosferleri ise çoğunlukla paslanmaz çelik, manyetik alaşımlar, takım çelikleri, karbürler, titanyum, zirkonyum, uranyum, tantalyum, refrakter metaller ve hidrojen-azot-

karbonmonoksit atmosferleri ile reaksiyona girebilen bileşiklerin sinterlenmesinde kullanılmaktadırlar (Wiberg, 1957).

4.2 Demir Esaslı Malzemelerin Sinterlenmesi

T/M parça endüstrisinde preslenmiş ve sinterlenmiş Fe esaslı malzemelerin kullanımı oldukça geniş yer tutmaktadır. Fe esaslı T/M parçalar, Fe tozlarından, alaşımlı çelik tozlarından veya Fe-grafit tozu karışımından, Fe (veya çelik) - Cu tozu karışımından ve Fe-grafit-Cu tozu karışımından elde edilir. Fe esaslı T/M parçaların sinterlenmesi sırasında meydana gelen reaksiyonlar şunlardır;

- Preslenmiş yapı içindeki toz metal partikülleri arasındaki mekanik bağlanmalar metalurjik bağların oluşumunu sağlamaktadır,
- Metal oksitler toza karıştırılan grafit tozları sayesinde karbonla redüklenmektedirler,
- TM parçalar için istenilen nihai karbon bileşimine grafit tozlarının difüzyonuyla ulaşılmaktadır,
- TM parçalarında yoğunlaşma, sinterleme sırasında yapılabilir. Yoğunlaşma derecesi sinterleme parametrelerine ve tozun alaşım durumuna göre değişmektedir. Demir esaslı parçalarda genellikle artan sinterleme sıcaklığı ve süresiyle yoğunlaşma mekanizmasının hızlandığı görülmüştür (Metals Handbook, 1998).

4.2.1 Fe Esaslı Malzemeler için Sinterleme Atmosferleri

Sinterleme atmosferleri birincil olarak, işlem gören malzemelerle fırın iç ortamı arasındaki kimyasal reaksiyonları kontrol etmektedir. Ek olarak, sinterleme atmosferleri sinterlenen malzeme için bir veya daha fazla kimyasal alaşım element kaynağı olabilir. Bu duruma örnek olarak karbürleme fırın atmosferindeki karbonun demirle alaşımlanmasıdır. Sinterleme atmosferi aynı zamanda sinterlenen malzemedeki alaşım elementi kayıplarını engellemektedir. Sinterleme atmosferleri fırın verimini düşüren yağlayıcı buharlarının fırın içerisinde birikmeden uçmasını sağlamaktadır.

Birçok çalışma tecrübesinde seçilen atmosferin en önemli işlevi preslenmiş yapı içindeki metal tozlarının yüzeyindeki oksitlerin redüklenmesine ve demir-çelikteki karbürizasyon ve dekarbürizasyonun kontrolüne yardım etmektir. Demir ve demir esaslı parçaların oksitlenme ve dekarbürizasyonun nedeni; oksijen, su buharı ve sinterleme atmosferindeki uygun olmayan hidrojen/karbonmonoksit oranından kaynaklanan karbondioksittir. Demir oksitler hidrojen, karbonmonoksit ve karbonla redüklenmektedir. Karbonmonoksit ve metan gibi

hidrokarbonlar karbürizasyon nedenleridir.

T/M demir ve çelik malzemelerin ticari amaçlı üretimlerinde sık kullanılan sinterleme atmosferleri; endotermik, egzotermik, ayrıışmış amonyak, saf hidrojen ve azot esaslıdır. Bunlar içinde en çok kullanılan atmosfer endotermik gaz olup bu atmosferi ayrıışmış amonyak atmosferi takip etmektedir (Metals Handbook, 1998).

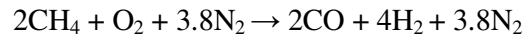
4.2.2 Endotermik ve Egzotermik Atmosferler

Endotermik veya endo gaz, harici bir ısı kamarasında nispeten zengin hidrokarbon gaz karışımlarının ve havanın temiz bir katalizör (örneğin nikel oksit) aracılığıyla tepkimesi sonucunda oluşturulmaktadır.

Egzotermik veya egzo atmosferleri tipik olarak %67–87 azot içermektedir. Geriye kalan kısım ise karbonmonoksit, hidrojen, karbondioksit ve su içermektedir. Egzotermik atmosferler hidrokarbon yakıtların (genelde doğal gaz) hava ile kısmi yanması sonucunda elde edilmektedirler. Hava/doğal gaz oranı 6/1 olduğunda yüksek miktarda karbonmonoksit ve hidrojen içeren zengin bir egzo gaz üretilmektedir. Buna karşılık, hava/doğal gaz oranı 9/1 iken düşük oranda karbonmonoksit ve hidrojen, yüksek oranda karbondioksit ve azot içeren verimsiz bir egzo gaz üretilmektedir.

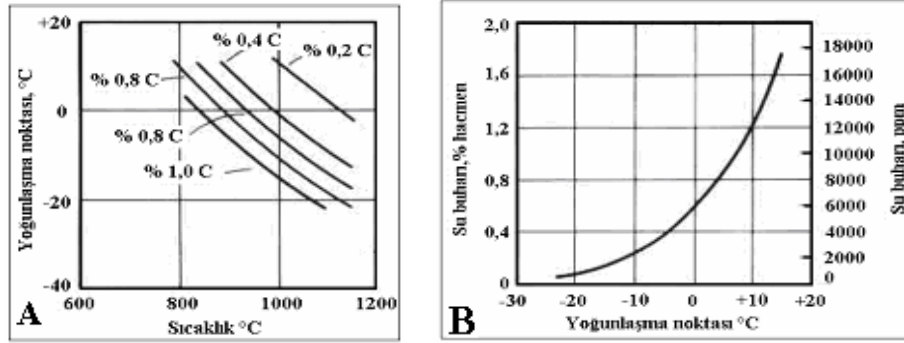
Endotermik ve egzotermik atmosferlerin üretiminde başka hidrokarbonlar kullanılmasına rağmen en çok kullanılanlar metan ve propan esaslı olanlardır. Bu fırın atmosferleri, azot, su buharı, karbonmonoksit, hidrojen, karbondioksit ve metan karışımıdır. Meydana gelen yanmanın derecesi işleme alınan havanın miktarıyla kontrol edilir. Bu hava/gaz oranı işlem gazının özelliklerini belirlemektedir. Tam yanma için metanla endotermik gaz oluşturulmasında hava/gaz oranı yaklaşık 2.4 iken, egzotermik gaz oluşturulmasında bu oran 9.0 ve üzerindedir.

Metandan endotermik tip gaz üretiminde reaksiyon aşağıdaki gibidir;



Bu gaz demir oksiti kolayca redükler. Karbon seviyesinin kontrolü zordur çünkü endotermik gaz potansiyeli sıcaklık ve yoğunlaşma noktasıyla şekil 4.3.a'da görüldüğü üzere değişmektedir. Yoğunlaşma noktası atmosfer gazı kuruluşunun bir ölçüsüdür. Düşük yoğunlaşma noktası, atmosferin daha düşük su buharı içeriğine sahip olduğu anlamındadır. Genellikle düşük yoğunlaşma noktasına sahip gazlar atmosferin redükleme potansiyelini arttırmaktadır. Yoğunlaşma noktası ve su buharı miktarı arasındaki ilişki şekil 4.3.b'de

gösterilmiştir. (Metals Handbook, (1998))



Şekil 4.3 (a) Yoğunlaşma noktasının ve sıcaklığını fonksiyonu olarak endotermik gazın karbon potansiyeli, (b) Su buharı içeriği ve yoğunlaşma noktası arasındaki ilişki (Metals Handbook, 1998)

Egzotermik tip atmosferlerin oluşumu sırasında reaksiyon, kendini destekleyen özelliğindedir ve ısı üretmektedir. Reaksiyon nikel katalizör varlığında, karbonmonoksit ve hidrojene dönüşmemiş artık hidrokarbonun parçalanmasını tetiklemektedir.



Egzotermik atmosferler demiri kolay redüklemeyebilir ve normal sinterleme sıcaklıklarında dekarburizasyon neden olmaktadır. Demir esaslı malzemelerin sinterlenmesindeki gibi kalıntı karbon içeriğinin istenmediği uygulamalarda egzotermik atmosferlerin kullanımları sınırlıdır. Suyun ve karbondioksitin uzaklaştırılması bu koruyucu atmosferin özelliklerini iyileştirmektedir (Metals Handbook, 1998).

4.2.3 Azot Esaslı Atmosferler

Azot esaslı koruyucu atmosferlerin sıvı hava damıtımıyla elde edilmesiyle kullanımları artmaktadır. Bu yöntem sadece sinterlemede değil aynı zamanda ısıl işlemlerde de kullanılmaktadır. Bunun birinci nedeni hidrokarbon yakıtların artmakta olan maliyetleridir.

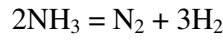
Bu atmosferler temel olarak azot depolama imkânlarıyla ya da doğrudan damıtma kulesiyle elde edilebilmektedirler ve daha önceden kullanılan hidrojen ve/veya karbonmonoksit içeren gazların yerini alabilecek şekilde kullanılabilirler. Tipik kullanımı ya endotermik bir gaz ya da ayrılmış amonyak elde etmek üzere azotun seyreltilmesini içermektedir. Hidrojen içeriği konvansiyonel endotermik gazda %40 olmasına karşın azot esaslı atmosferde toplamda yüzde

olarak çok düşük deęerlere dūřurūlebilmektedir.

Çūnkū toz partikūllerinin yūzeyinde var olan oksitlerin redūksiyonu için elveriřli olan hidrojen miktarı daha azdır, redūksiyon iřleminde yer alan mevcut grafit bu yūzden daha būyūk rol oynamaktadır. Sonuçta sinterlenmiř karbon içerięi aynı kalacaksa daha būyūk miktarda grafit katkısı istenmektedir (Metals Handbook, 1998).

4.2.4 Ayrışmış Amonyak Atmosferleri

Ayrışmış amonyak hacimce %75 hidrojen ve %25 azot içermektedir ve gazlaştırılmış amonyaktan



reaksiyonuyla ūretilmektedir. Ayrıřtırıcıdan doęrudan gelen ayrıřmıř amonyak çok kurudur ve genellikle – 40°C ve daha dūřūk yoęunlařma noktası vermektedir.

Amonyak ayrıřtırıcılar endo ve egzo gaz ūretelerine kıyasla kısmen bakım gerektirmemektedir. Çūnkū ayrıřmıř amonyak çok kuru olup yūzey oksitlerini yūksek oranda indirgemektedir. Sonuç olarak ayrıřmıř amonyak yaygın olarak kararlı oksitlerin yūksek miktarlarda indirgenmesinin istendięi yerlerde kullanılır; ūrneęin paslanmaz çelięin sinterlenmesi. Termodinamik olarak ayrıřmıř amonyakta yūksek deęerdeki hidrojen, karbon çelięini dekarbūrizasyon etmekte ve bununla birlikte fırın içindeki yoęunlařma noktası dūřūk kalırsa dekarbūrleme reaksiyonu kinetik olarak çok yavař gerçekleřmektedir.

Yūzeyinde hiç dekarbūrizasyon olmayan karbon çelięinin sinterlenmesi sırasındaki dekarbūrizasyon reaksiyonu, azot gibi dūřūk yoęunlařma noktalı gazla seyrelmiř ayrıřmıř amonyak sayesinde daha fazla yavařlatılabilir. Çūnkū ayrıřmıř amonyak çok kurudur ve ūn ısıtma būlgesindeki yaędan arındırma iřlemi sırasında yaęlayıcıların optimum yanmasını saęlayamamaktadır. Bununla birlikte ayrıřmıř amonyanın %75'i hidrojen olduęundan ısı iletkenlięi azotça zengin atmosferlerden daha yūksektir.

Yūksek azot içerięine sahip ayrıřmıř amonyak ūretimi havayla reaksiyona giren amonyakla katalitik olarak ya da kısmi yanmayla gerçekleřtirilmektedir. Bu reaksiyonlarda oluřan su, gazdan emilimle uzaklařtırılmaktadır (Metals Handbook, 1998).

4.2.5 Hidrojen Atmosferleri

Metalurjik hidrojenin ūretimi için kullanılan tipik yūntemler sulu ūzeltilerin elektrolizini ve hidrokarbon gazlarının buharla ya da oksijen ile hidrojen-karbonmonoksit karıřımları

oluşturma reaksiyonlarını içermektedir. Sonraki aşamada karbonmonoksit karbondioksit dönüşür ve karışımdan ayrışır. Çizelge 4.3’de görüldüğü gibi hidrojen en etkili indirgeme atmosferidir. Çünkü en büyük hidrojen/su oranına sahiptir. Hidrojen atmosferleri, ayrılmış amonyak atmosferinde de görüldüğü şekilde yoğunlaşma noktası - 40°C’nin altında kaldığı sürece dekarbürizasyon yapmamaktadır. Bu atmosferler benzer şekilde düşük yoğunlaşma noktasından dolayı yağlayıcı buharlarını yakmada da yetersizdirler. T/M endüstrisinde kullanılan tüm atmosferler içinde ısı iletkenliği en iyi olan atmosferler hidrojen atmosferleridir (Metals Handbook, 1998). Hidrojen birincil olarak demir esaslı manyetik malzemelerin sinterlenmesinde kullanılmaktadır. Örnek olarak kalıcı manyetik olan *Alnico* çok kuru olan hidrojen atmosferinde 1300°C’de sinterlenmektedir.

Çizelge 4.3 Başlıca fırın atmosferlerinin bileşimleri (Metals Handbook, (1998))

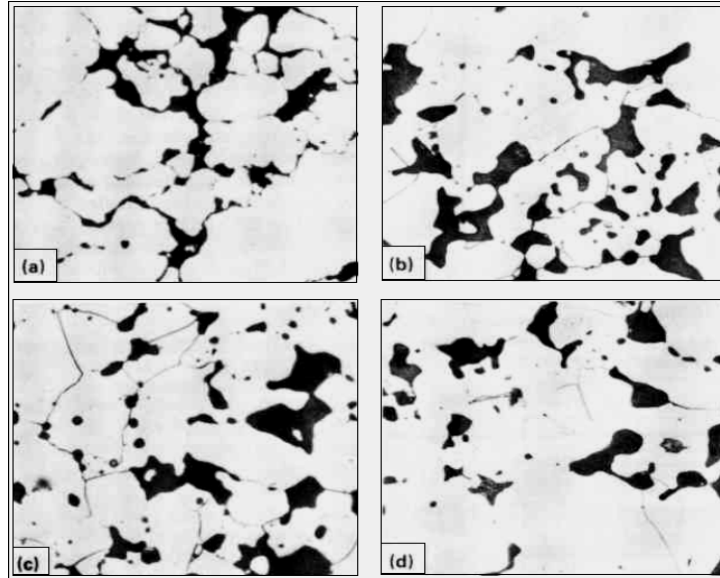
Atm.	AGA Sınıfı	Hava / D.gaz oranı	Yoğ. Nok. °C	Nominal Bileşim % hacim						Kılavuz Oranlar		
				N ₂	H ₂	Su	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂ /H ₂ O	CO/CO ₂	H ₂ /CO
Fakir Ekzoter.	101	9.0	20	84.7	1.2	2.5	1.4	10.2	X	0.5	0.1	0.9
Zengin Ekzoter.	102	6.0	20	69.8	12.2	2.5	10.2	4.9	0.4	4.9	2.1	1.2
Endoter.	302	2.5	5	38.2	40.4	0.8	19.8	0.3	0.5	51	66	2,0
Ayrılmış Met.alkol	X	X	15.5	X	65.6	1.7	32.4	0.4	X	39	81	2,0
Ayrılmış Amonyak	601	X	- 50	25	75.0	0.004	X	X	X	19000	X	X
Hidrojen	X	X	- 60	X	100	0.001	X	X	X	100000	X	X
Azot	X	X	- 60	100	X	0.001	X	X	X	X	X	X

4.3 Demir Tozunun Sinterlenmesi

Demir tozlarının sinterleme mekanizması sırasında, parçacıklar arasındaki temas alanlarında bağ oluşumunu, tanelerin büyümesini, bağlarda oluşan tane sınırlarının göçünü, parçacıklar arasındaki gözeneklerin küreselleşmesini ve küçük gözeneklerin eliminasyonunu içermektedir. Yağlayıcılardan artakalan maddeler, empüriteler, yüzey oksitleri ve partiküller arası zayıf temaslar bağ oluşumunu zorlaştırmaktadır.

Yoğunluk ve ham kompaktın boyutu sinterleme sırasında değişmektedir. Sinterleme sıcaklığı artarken gözenekler azalır ve malzemenin kendisini çekmesi (büzüşme) artar. Sinterleme sıcaklığına bağlı gözenek yapısı şekil 4.4'teki mikroyapılarda görülmektedir. Şekil 4.4.a %0.75 yağlayıcıyla harmanlanıp, preslenerek 6.5 gr/cm^3 yoğunluğa sahip olmuş demir tozunu göstermektedir. Çok taneli demir tozları gözeneklerle tamamen birbirlerinden ayrılmışlardır.

Aynı demir kompaktı 1065°C deki ayrılmış amonyak atmosferinde 30 dakika sinterlendikten sonra partiküller arasında birçok bağ oluşmuştur ancak çok sayıda tane sınırı olduğu gibi kalmıştır. Şekilde görüldüğü gibi 1120°C 'deki sinterleme taneler arası bağların sayısının artmasını sağlamıştır. Ek olarak bazı tane büyümeleri ve gözenek küreselleşmeleri meydana gelmektedir. Son olarak şekilde de gösterildiği gibi 1175°C deki sinterlemeden sonra sadece birkaç partikül sınırı artakalmıştır ve önemli miktarda tane büyümesi, tane sınırı göçü ve küreselleşme ortaya çıkmıştır (Metals Handbook, 1998).



Şekil 4.4 Ayrılmış amonyak atmosferinde 30 dakika sinterlenmiş demir tozlarının porozitesi üzerinde sinterleme sıcaklığının etkisi. Büyütme 300X a) preslenmiş durum b) 1065°C 'de c) 1120°C 'de d) 1175°C 'de sinterlenmiştir.(Metals Handbook, 1998).

4.3.1 Fe-Grafit tozlarının sinterlenmesi

Demir ve grafit tozları karışımlarında

- ✓ Fe-Fe bağları oluşur ve gelişir;
- ✓ Karbon difüzyonuyla C-Fe birleşimi olur;
- ✓ Gözenekler küreselleşir.

Demir içindeki oksijen içeriği demirin grafitle reaksiyona girmesini belirleyen önemli bir faktördür. Sinterleme işlemi esnasında, grafit ve sinterleme atmosferi oksitin büyük kısmını Fe-grafit birleşmesinden önce redüklenmek zorundadır (Metals Handbook, 1998).

4.3.1.1 Bağlı karbonun etkisi

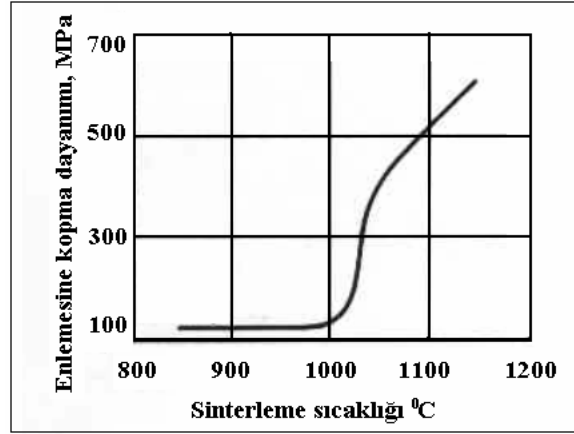
Yapı içindeki bağ oluşumunun yanı sıra sinterlenmiş çelik parçanın özelliklerine çelik içinde oluşmuş bağlı karbon oranının etkisi büyüktür. Sinterleme sırasındaki toplam genleşme doğrudan doğruya bağlı karbon miktarıyla orantılıdır. Dövülmüş çelikteki gibi bağlı karbon miktarının artışıyla sinterlenmiş çeliğin dayanımı hızla artmaktadır.

4.3.1.2 Atmosfer bileşiminin etkisi

Sinterleme sırasında parçaların oksitlenme veya redüklenme, karbürizasyon veya dekarbürizasyona uğrama eğilim hızları sinterleme sıcaklığına ve sinterleme atmosferinin içerdiği çeşitli gazların oranlarına bağlıdır. Sinterleme sırasında oluşan bağlı karbon miktarı üzerinde sinterleme atmosferinin büyük etkisi vardır. Karbon potansiyeli kontrol edilmezse fazla miktarda karbon atmosfere karışır yada yüksek oranlarda karbürizasyon meydana gelir. Karbon potansiyeli su buharının hidrojene, karbondioksitin karbonmonoksit ve metanın hidrojene oranına bağlıdır. Parça içindeki grafit miktarı aynı zamanda fırın atmosferindeki karbon potansiyeline etki etmektedir.

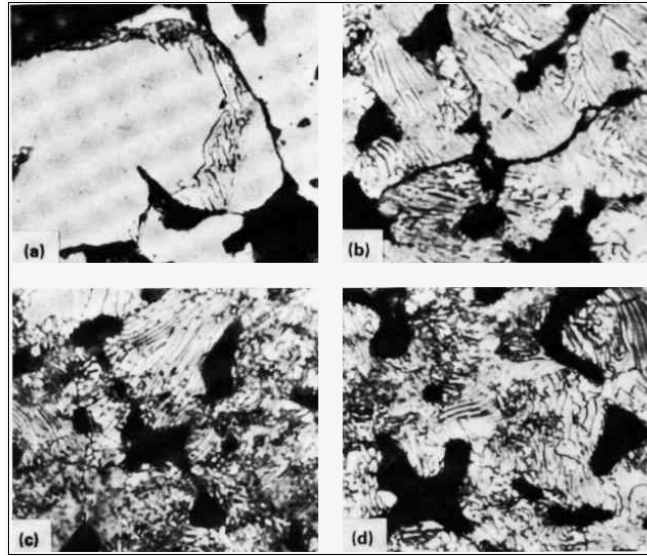
4.3.1.3 Sıcaklığın etkisi

Seçilen sinterleme süresi için sinterleme sıcaklığının oluşan bağlı karbon miktarına etkisi büyük olmasına rağmen, normal sinterleme sıcaklığı ve süresi altında grafit kolayca bağlanmaktadır. Şekil 4.5'te sinterleme sıcaklığının kopma dayanımına etkisi gösterilmiştir. (Metals Handbook, 1998)



Şekil 4.5 Sinterleme sıcaklığının Fe + %1.25 grafitli test çubuklarının enlemesine kopma dayanımı üzerindeki etkisi (6.1 gr/cm^3 yoğunluğa kompaktlanmış ve verilen sıcaklıklarda 30 dakika sinterlenmişlerdir) (Metals Handbook, 1998)

Sinterleme sıcaklığı 900°C 'den 1010°C 'ye çıkarılırken dayanımda artışın meydana gelmediği görülmektedir. Bu sıcaklığın üzerinde ise önemli miktarda artış kaydedilmiştir. Şekil 4.6'da sıcaklığın etkisini araştırmak için kopma dayanımı ölçülen test çubuklarının mikroyapıları görülmektedir.

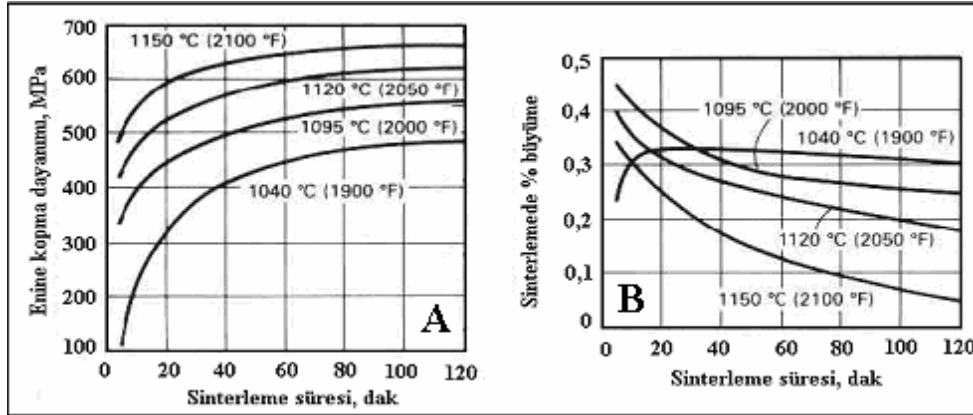


Şekil 4.6 Sinterleme sıcaklığının Fe+ %1.25 grafitli test çubuklarının mikroyapısı üzerindeki etkisi (Dağlayıcı: % 4 pikral + % 5 nitrik asit. Büyütme 800X) a) Sinterleme sıcaklığı 1010°C bağlı karbon %0.1 dayanım 138 MPa b) Sinterleme sıcaklığı 1040°C bağlı karbon %0.75 dayanım 352 MPa c) Sinterleme sıcaklığı 1120°C bağlı karbon %0.75 dayanım 552 MPa d) Sinterleme sıcaklığı 1175°C bağlı karbon %0.75 dayanım 655 MPa (Metals Handbook, 1998)

Düşük sinterleme sıcaklıklarında karbon bağlanmaması perlit yoksunluğuyla kanıtlanmıştır. 1010°C’de az miktarda karbür oluşumu başlamıştır (Şekil 4.6.a), 1040°C’de ise en yüksek bağlı karbon miktarı elde edilmiştir (Şekil 4.6.b). Daha yüksek sıcaklıklardaki ek dayanım kazancı artan sinterlenme nedeniyledir (Şekil 4.6.c 1120°C ve Şekil 4.7.d 1175°C). Artan sinterlenmenin kanıtı tane sınırlarının azalması ve gözeneklerin küreselleşmesidir (Şekil 4.6.c ve d) (Metals Handbook, 1998).

4.3.1.4 Sinterleme süresi

Sinterleme süresi aynı zamanda bağlı karbon oluşma miktarını etkilemektedir. Normalde kullanılan sinterleme süresinde maksimum bağlı karbon miktarına ulaşılır. Dayanım ve boyut değişimi üzerindeki hatırı sayılır etki bir dizi test çubuğunun farklı sıcaklıklarda ve 5–120 dakika arasında değişen sürelerde sinterlenmesiyle ortaya çıkmıştır. Şekil 4.7.a’da sinterleme süresinin enine kopma dayanımına etkisi; şekil 4.7.b’de ise sinterleme atmosferinin boyutsal değişime etkisi görülmektedir (Metals Handbook, 1998).



Şekil 4.7 a) Sinterleme süresine karşı kopma dayanımı değişimini, b) Sinterleme süresine karşı boyutsal değişimi göstermektedir. 30. dakikaya kadar dayanımda hızlı bir artış vardır. İlerleyen sürelerde de dayanımdaki artış devam eder (Metals Handbook, 1998).

4.3.1.5 Soğuma hızının etkisi

Dövme çelikte soğuma hızının dayanım üzerindeki etkisi iyi bilinmektedir. 30 dakika 1120°C’de sinterlenmiş ardından 730°C’den 535°C’ye farklı soğutma hızlarıyla soğutulmuş demir-grafit örnekleri de bunu doğrulamaktadır. Kullanılan üç hızın mekanik özelliklere etkisi çizelge 4.4’te gösterilmiştir. Tipik olarak daha yüksek soğuma hızları artan dayanım ve sertlik değerleri ortaya koymuştur (ASM Metals Handbook, 1998).

Çizelge 4.4 Soğutma hızının demir - grafit numuneleri üzerindeki etkisi 6.1 gr/cm³ ham yoğunluk, 1120°C de 30 dakika sinterleme (Metals Handbook, 1998)

Numune	Soğuma Hızı		Enine Kopma Dayanımı		Sertlik HRB	Perlit Tipi
	°C/dak.	°F/dak.	MPa	ksi		
1	1.9	3.5	462	67	37	çok kaba
2	64	115	565	82	50	ortalama
3	125	225	600	87	57	çok ince

4.4 Fe-Cu Esaslı Tozların Sinterlenmesi

Fe-Cu karışımlarının sinterlenmesi şu aşamaları kapsamaktadır;

- Fe-Fe katı bağ oluşumu
- Cu-Fe katı bağ oluşumu
- Cu'nun ergimesi
- Cu'nun çözünerek katı Fe'ye yayınması
- Sıvı Cu içindeki demirin çözünmesi ve çökeltme oluşumu

Tipik sinterleme sıcaklıklarında (1095–1120°C) %7.5–9 oranında bakır demirde çözünür. Ancak bu Cu içeriğinde ve tipik sinterleme şartlarında ergimiş bakırın bir kısmı çözünmeden kalır ve %3 oranında Fe çözebilir.

Bakırın demir içindeki çözünürlüğü azalan sıcaklıkla düşmektedir ve oda sıcaklığında %0.1'den daha azdır. Bu nedenle sinterleme sıcaklığında demirde çözünen bakır, preslenmiş yapı soğurken çökeler ve sertliği artırır. Daha yüksek soğuma hızları çökeltilerin oluştuğu sıcaklığı aşağı çeker. Böylece çökeltiler daha küçük olur ve sertlik etkileri yükselir.

Demir içindeki bakır çözünürlüğü preslenmiş yapının büyümesine neden olur; serbest bakır içindeki demir çözünürlüğü büzülmeye neden olur. Bu mekanizma sinterlemenin ilk aşamalarında Cu çözünürlüğünün baskın gelmesi ile eş zamanlı olarak devam eder. Örnek olarak %7.5-10 Cu katkısı belirgin miktarda büyümeye neden olur ancak %20 katkı serbest bakır miktarını arttırarak büyüme miktarını %7.5 Cu katkısındaki büyümeden daha fazla engelleyecektir (Metals Handbook, 1998).

4.5 Fe-Cu-Grafit Tozunun Sinterlenmesi

Demir bakır grafit toz karışımının sinterlenmesindeki mekanizma demir grafit ve demir bakır sinterlenmesindeki mekanizmaları kapsamaktadır. Bakır ergime noktasına ulaşmadan önce karbon tamamen yapıya yayılır. Bakırın katı demir içindeki çözünürlüğüne karbonun etkisi azdır ancak karbon bakırın çözünürlüğünü düşürmektedir. Bu nedenle büyüme miktarını azaltan karbonun varlığında arta kalan serbest bakır miktarı yüksektir.

%0.9 grafit ve %5 bakır içeren çelik yapı 1240 MPa maksimum dayanıma ve oldukça gevrek bir yapıya sahiptir. Bu malzeme, daha yüksek tokluk değerlerinin gerekmediği uygulamalarda kullanılabilir. Sinterlenmiş durumdaki Fe-Cu-Grafit kompaktının yüksek dayanımı, bakırın neden olduğu çökelme sertleşmesi ve artan çelik sertleşebilirliği etkisine bağlıdır (Metals Handbook, 1998).

5. OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE TOZ METALURJİSİ

T/M parçaların otomotiv sektöründeki kullanımı her geçen gün artmaktadır. İmalatçılar arasında parçaların kullanımı değiştiğinden, bir otomobildeki toz metalurjik parçaların ağırlık ve sayısını tahmin etmek zordur. Bazı otomobillerdeki aktarma organlarında hiç T/M parça yokken bazıları ise 1 kg kadar demir tozundan faydalanabilirler. Bu da ürünün özelliklerine ve fiyata etki etmektedir.

Otomobillerde toz metalurjisinin kullanımı demir esaslı toz alaşımları ile baskın durumdadır. En çok kullanıldığı alanlar sırasıyla otomatik vites kutuları ve parçaları, direksiyon sistemi ve dişlileri, şase parçaları, fren sistemi şeklindedir.

Alaşım bileşimi, yoğunluk, sinterlemede yapılan işlemler ve ikincil işlemler üreticilere göre büyük farklılıklar gösterebilmektedir. En geleneksel toz metalurjik parçalar yaklaşık 414 – 483 MPa arasında preslenir ve fırında yaklaşık 1120°C’de sinterlenir (Sözen, 2006). Bu bölümde otomotiv sektöründe toz metalurjisi ile imal edilmiş olan bazı otomotiv parçalarına değinilecektir.

5.1 Biyel Kolu

Motorlardaki biyel kolu, yorulma performansı isteyen toz metalurjik parçalar için iyi bir örnektir. Biyel kolu krank mili ile piston üzerine gelen doğrusal kuvveti dairesel harekete dönüştüren bir parçadır. Üzerinde değişken yüklemeler olan motorun en önemli parçalarından birisidir. Halen yılda 25 milyon otomobil biyel kolu *GKN* sinter metal firması tarafından toz dövme yöntemi ile üretilmektedir. 1970’li ve 1980’li yıllarda toz dövme konusunda yürütülen araştırmalar bu yöntemin endüstriyel olarak uygulanabilir hale gelmesini sağlamıştır. Toz dövmede, pişirilmiş T/M çelikler sıcak dövme ile tam yoğun (> %99.9) hale getirilerek kalıcı gözeneklerin kötü etkileri engellenmiş olur. Ancak toz dövme pahalı bir yöntemdir ve sadece pişirme ile biyel kolu üretilmesi oldukça ilgi çekmektedir. *EPMA*’nın 2000 yılı teknoloji geliştirme ödülü, ilk endüstriyel pişmiş biyel kolunu geliştirdiği için *Federal Mogul* firmasına verilmiştir. Biyel kolları %0.85 molibdenli önceden alaşımlı çelik tozundan 1000 MPa basınçta ılık presleme ve 1130°C’de pişirme ile üretilmişlerdir. 7.4 gr/cm³ nominal yoğunluktaki biyel kolları eksenel yükleme şartlarında 320 MPa yorulma mukavemeti sağlamaktadır (Sözen, 2006). Şekil 5.1’de toz metalurjik yöntem ile üretilmiş biyel kolu gösterilmektedir.



Şekil 5.1 TM biyel kolu (www.metaldyne.com)

5.2 Kam Mili

Toz metalurjisinin en modern ve son uygulamalarından biri de kompozit eksantrik mil imalidir. Bu eksantrik miller motorlarda supapların açılıp kapanmasını sağlayan bunu da supapların açılmasını sağlayan bir yüzeye vurarak yaparlar. Bu yüzeyler bu vurma işleminden dolayı aşınmaya çalışırlar. Bu yüzden bu millerin aşınma dayanımlarının artması istenir.

Kam mili olarak da bilinen bu mil; orta karbonlu şafttan, toz metal preslenmiş ve sinterlenmiş kamlar ve sıcak dövülmüş çelik muylu yataklardan oluşmaktadır. Toz metal kamlar aşınma dayanımlı ve yüksek kromlu malzemeden yapılmıştır. Buradaki kamlar için kullanılan alaşım 7.6 gr/cm^3 yoğunlukta, sinterlenmiş ve 550 HV sertlik değerindedir. Yapı $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de sinterlendikten sonra bainit-martenzit matriste dağılmış ince krom-molibden karbürleri içerir (Sözen, 2006). Kamlardaki kimyasal bileşim çizelge 5.1'de gösterilmiştir. Şekil 5.2'de Corvette marka otomobilde kullanılan gözenekli çelik olarak bilinen toz metalurjik kam mili gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 Kamların kimyasal bileşimi (Sözen, 2006)

Cr	Mo	P	Cu	C	Fe	Diğer
% 5	% 1	% 0,5	% 2	% 2,5	% kalan	< % 2



Şekil 5.2 Kam mili (www.corvettemuseum.com)

5.3 Toz Metal Yataklar

Yataklar, toz metalurjisinin otomotivdeki ilk uygulamaları olmuştur. Kaymalı yataklar kullanımları esnasında dışarıdan gelen yükleri karşılarken kuvvet yönündeki hareketi engellemek ve diğer yönlerdeki harekete izin vermekle görevlidirler. Bunu gerçekleştirirken sürtünmeden kaynaklanan enerji kaybını minimuma indirmelidirler. Kaymalı yatak malzemelerinin düşük sürtünme katsayısı, yüksek aşınma direnci, yüksek yük kapasitesi, statik ve dinamik yüklere yeterli dayanım, iyi ısıl iletkenlik özelliği, iyi korozyon dayanımı, yabancı partikülleri gömme özelliği ve düşük ısıl genleşme özelliklerine sahip olmaları gerekir. Uygulamada kaymalı yataklar hidrostatik veya hidrodinamik olarak yağlanırlar. Ancak montaj sonrası yataklara yağ gönderme imkânı yoksa bu durumda yataklara montaj öncesi yeterli yağ emdirilmeli veya yağlayıcı, yatak malzemesi içinde bulundurulmalıdır. Eğer yağlama eksikliğinden dolayı yataklarda kuru sürtünme ortaya çıkarsa büyük konum hataları, dinamik kararsızlıklar, enerji kaybı, aşınma ve beraberinde, yatak bölgesinde sıcaklık artışı meydana gelir. Yataklarda ısıl gerilmelerin doğması uygun olmayan yağlama ve yatak malzemesi seçiminden kaynaklanmaktadır. Düşük ısıl iletkenlik, uygun olmayan sürtünme şartları yatakta aşırı zorlanmalar doğurur. Bu durum yorulma ömrü açısından önem kazanmaktadır. Toz metalurjisi yöntemi ile kendi kendini yağlayan yatakların üretimi yapılmaktadır. Bu yöntemle belli yoğunlukta, gözenekli yataklar üretilerek mevcut gözeneklere yağlayıcılar emdirilmektedir. Üretilen T/M parçaların mekanik özellikleri gözenek miktarına ve dağılımına bağlı olmakla beraber gözenek tipi, miktarı, dağılımı ve toz şekli yatakların kendi kendini yağlama şartlarını iyileştirmek ve emdirilen yağ miktarını düzenlemek üzere kontrol edilmektedir. Ancak aynı parametreler üretilen parçaların mekanik özelliklerini de etkiler. Uygulamalarda sık kullanılan kendi kendini yağlayan toz metal yataklar genellikle demir ve bakır esaslı alaşımlardır. Daha yüksek mekanik özelliklerin elde edilmesini sağlamak için T/M yataklar, tozlar alaşımlandırılarak üretilmektedir. Özellikle Cu esaslı yatak malzemelerinde %8-10 Sn ilave edilerek sürtünme özellikleri iyileştirilmektedir. Bronz yataklar gözenekli T/M parçaların ilk ürünlerindendir. En yaygın kullanılan bronz

kompozisyonu saf bakır ve kalay tozlarının karıştırılmasından oluşan %90Cu + %10Sn'dir. İlave edilen kalay miktarı bronz malzemenin dayanımını da artırmaktadır. Alaşımlandırma tekniği, toz karakteristikleri ve presleme şekilleri yatak malzemesinin yağlama, aşınma ve mikroyapı özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir (Sözen, 2006). Şekil 5.3'te toz metalurjik krank mil yatağının üst kısmı görülmektedir.



Şekil 5.3 Toz metal krank mili yatağının üst kısmı (www.metaldyne.com)

5.4 Vites Kutusu Parçaları

Motorlar ve aktarma organlarında olduğu gibi birçok diğer uygulamada da toz metalurjisi başarıyla uygulanıyor. Maliyeti düşürmesinin yanı sıra, sınırlı toleranslarda çalışabilme imkanı da toz metal çeliklerin mekanik özelliklerinin sürekli gelişmesini sağlıyor. Toz metal çeliklerin mekanik özellikleri ilk olarak yoğunluklarıyla ilişkilidir. Bununla birlikte alaşım seçimi ve mikroyapı da önemli roller oynamaktadır. Geleneksel toz metalurjik parçalar %10'luk bir gözenek ile sınırlandırılmışlardır. Eğer mekanik özellikler uygun yönde arttırılırsa toz metal çeliklerin de uygulanabileceği birçok çekici otomotiv uygulaması vardır.

Birçok koşulda bir makine elemanı üzerine yapılan yüklemeler yüzeyde büyük gerilmeler oluşturur. Ayrıca iş parçasının tam yoğunluğu da bulunmamaktadır. Bu tarz gerilmeler seçici yüzey yoğunluğu ile karşılanabilir. Seçici yüzey yoğunluğu prosesi yüzeyden 0.2 ile 1 mm arasında değişen bir kalınlıkta tam yoğunluğu yani sıfır poroziteyi sağlamakta ve daha derin kısımlarda yoğunluk düşmektedir. Seçici yüzey yoğunluğu prosesi dişliler gibi büyük yükler altında çalışan makine elemanlarına başarıyla uygulanabilmektedir (Sözen, 2006).



Şekil 5.4 Yüzeyi yoğunlaştırılmış T/M bir helisel dişli (Sözen, 2006)

Büyük yükler taşıyan dişliler seçici yüzey yoğunluğunun en çok bilinen ve rastlanan örneklerindendir. Enine haddeleme ile sağlanan seçici yüzey yoğunluğu toz metal dişlilere büyük bir direnç ve gürültüde de iyi bir azalma sağlıyor. Şu anki çalışmalar ve planlar helisel dişlilerin sertliğini ve seçici yüzey yoğunluğunu artırmak ve mikroyapıları ve morfolojilerini değiştirmek üzerinedir. Şekil 5.4'te yüzeyi yoğunlaştırılmış toz metalurjik helisel dişli örneği görülmektedir.



Şekil 5.5 TM vites kutusu parçası (www.ipmd.net)

Şekil 5.5'te 2005 yılında JPMA (Japan Powder Metal Ass.) tarafından ödüllendirilmiş vites kutusu parçaları görülmektedir. Parça 6 adet kabartıdan oluşmuştur. Kabartılar vites değiştirirken dişli geçişini kolaylaştırmak için karşı parçadaki çıkıntılara kılavuzluk etmektedir. Parça üzerinde göreceli olarak ince olan kabartılara dikkat edilmelidir. Çünkü toz

sıkıştırma işleminde parça boyunca homojen yoğunluk dağılımı istenir ve sıkıştırma sırasında ve parça taşınması sırasında çatlak oluşmamalıdır. Aynı zamanda sinterleme ve ısıtma işlem adımlarında da parça çarpılmasını önlemek için optimizasyon yapılmıştır.

5.5 Toz Metalurjisinin Otomotivdeki Diğer Uygulamaları

Daha önceden de belirttiğimiz gibi otomotiv endüstrisindeki toz metalurjik parçaların sayısını bilmek zordur. Çünkü bu parçalar üreticiden üreticiye değişmektedir. Bu bölümde diğer bilinen toz metalurjik otomotiv parçaları hakkında genel bilgi verilmektedir.

T/M parçaların otomotivdeki kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu kullanım alanlarına farklı bir örnek olarak motorlardaki supap teknolojileri, hidrolik doğrultu kontrol sistemleri, elektronik sistemler, ABS ve hava yastığı gibi güvenlik sistem parçaları örnek verilebilir (Sözen, 2006).

Doğrultu kontrol sistemindeki dişliler de bazı üreticiler tarafından toz metalurjisi ile imal edilmektedir. Ayrıca amortisör pistonu, piston kolu kılavuzu gibi bazı şase parçaları da 1950'lerden sonra toz metalurjisi ile üreilmeye başlanmıştır. Ayrıca ABS gibi bazı frenleme teknolojilerinde kullanılan sensör rotorları da toz metalurjisi ile imal edilmektedir (Sözen, 2006). Şekil 5.6'da toz metalurjik yöntemle üretilmiş ABS sensör rotoru görülmektedir.



Şekil 5.6 Toz metal ABS sensör rotoru (www.jagbits.com)

1970'lerden önce su atomizasyon yöntemi ile üretilen yüksek saflıktaki tozlar, diferansiyel piston dişlisinin ve otomatik vites kutularındaki güneş dişlisinin en az karbürize çelik kadar hatta daha sağlam bir şekilde imal edilmesini mümkün kılmıştır. Fakat bu işlem ekonomik olmadığı için toz metalurjisi ile imalata devam edilememiştir (Sözen,2006).

Tam yoğunlukla imal edilmiş otomatik vites kutusundaki çember dişli de sıcak şekil verilmiş toz metalurjik parçalara örnektir. Bu tür parçalara ilk olarak sıkıştırma ve sinterleme ile kaba şekil verilir. Daha sonra parça yağlanır ve indüksiyon fırınında tekrar ısıtılır. Daha sonra bir kalıpta sıcak şekil verilerek imal edilirler. Bu işlemden sonra parça karbürize edilir ve sinterlenir (Sözen, 2006). Şekil 5.7’de sıcak şekil verilmiş toz metalurjik çember dişli görülmektedir.



Şekil 5.7 Sıcak şekil verilmiş T/M çember dişli (www.metalpowderproduct.com)

Otomatik vites kutusu parçaları, yakıt pompası dişlileri, kavrama baskı plakası gibi parçalar yıllardır toz metalurjisi teknolojisi ile üretiliyor, hatta yakıt pompası dişlileri bütün üreticiler tarafından sadece toz metalurjisi ile üretilmektedir. Pompa dişlilerinin uzun ömürlü olmaları üretilebilirliklerinin ve güvenilirliklerinin bir kanıtı sayılmaktadır (Sözen, 2006). Şekil 5.8’de toz metalurjik yakıt pompası dişlileri görülmektedir. Şekil 5.9’da ise toz metalurjik kavrama göbeği ve baskı plakası görülmektedir.



Şekil 5.8 T/M yakıt pompası dişlileri (www.rockmetalproduct.com)



Şekil 5.9 T/M kavrama göbeği ve baskı plakası (www.ipmd.net)

Ayrıca manuel daimi temaslı vites kutularında vites değiştirmede kullanılan, hangi vitesin dişlisi kullanılacaksa o dişlinin aktarma organlarına ve hareket sistemine bağlanmasını sağlayan dişliler arasındaki hız farkını konik yüzeyleriyle sürtünme prensibine göre azaltan senkromeç mekanizması da toz metalürjisi yöntemi ile imal edilmektedir. Malzeme olarak da demir- karbon- bakır alaşımı tozlar kullanılmaktadır (Sözen, 2006). Şekil 5.10'da ülkemizde toz metalurjik yöntemle üretilmiş senkromeç dişlisi görülmektedir.



Şekil 5.10 T/M senkromeç dişlisi (www.sintermetal.com)

Otomotiv sektöründe kullanılan T/M parçaların sayısını bilmek zordur. Çünkü üreticilere göre parçalar çok fazla değişiklik göstermektedir. Ayrıca parçalarda kullanılan tozlarda da üreticiden üreticiye farklılıklar bulunmaktadır. Çizelge 5.2'de bazı bilinen T/M parçalar ve bu parçalarda kullanılan tozlar verilmiştir (Sözen, 2006).

Çizelge 5.2 T/M otomotiv parçaları ve parçalarda kullanılan tozlar (Babacan, 2006)

Kullanılan T/M Parça	Kullanılan Toz
Dinamo regülâtörü, kontaklar	Platin alaşımı, demir
Yataklar	Bakır, kurşun, kalay, demir, grafit, bronz
Yakıt pompa parçaları	Demir, bakır, takım çeliği
Filtreler	Paslanmaz çelik, bronz
Amortisörler	Demir, Alüminyum
Buji	Demir
Buji (korozyondan koruma)	Çinko
Vites kutusu parçaları	Demir, bakır, çelik
Fren balataları	Çinko

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar bölümünde *TOZ METAL A.Ş.* tarafından *RENAULT* marka araçlar için tasarlanmış olan iç rotor dişlilerinin üretim koşullarının optimize edilmesi amacıyla yapılmış çalışmalara yer verilmiştir. Bu çalışmada sinterleme atmosferinin üretilmiş rotor dişlilerinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi detaylı olarak araştırılmıştır. Sinterleme atmosferi olarak kullanılan endogazın hava / doğal gaz oranı değiştirilerek değişik karbon potansiyelinde işleme tabii tutulmuş parçaların nihai özellikleri ile proses parametreleri arasındaki ilişki saptanılmaya çalışılmıştır.

Karakterizasyon işlemi amacıyla yapılan çalışmalar iki ana kısımdan oluşmaktadır. Öncelikle rotor dişli parçalarının üretiminde kullanılan metal tozunun karakterizasyonu için elek analizi, görünür yoğunluk testi, akışkanlık testi ve mikroyapı incelemesi yapılmıştır. Daha sonra preslenmiş ve sinterlenmiş tozların parça haline geldikten sonraki özelliklerini ortaya koyacak yoğunluk tayini, görüntü analizi, mikroyapı analizi, kimyasal analiz, sertlik ölçümü, korozyon testi ve aşınma testi uygulanmıştır.

6.1 Toz Numuneye Uygulanan Testler

TOZ METAL A.Ş firmasının İsveç *HÖGENÄS* firmasından tedarik etmiş olduğu 69.02.48 kodlu Cu katkılı Fe tozu numunesi testlerde kullanılmıştır. Tedarik edilen toza sırasıyla; elek analizi, akışkanlık ve görünür yoğunluk testleri yapıldıktan sonra JEOL 5410 LV marka ve model tarama elektron mikroskopuyla (SEM) tozun mikroyapı görüntüleri alınmıştır.

6.1.1 Elek analizi

MPIF 05 standart numarasıyla belirtilen elek analizi toz tanelerinin ortalama tane boyutlarının hesaplanmasında kullanılan yöntemdir. Elek analizi deneyi için gerekli parametreler değişik elek açıklıklarına sahip elekler, titreşim cihazı, hassas terazi ve normal terazidir. Standarta göre 100gr toz numune tartılarak deneye tabi tutulmaktadır (MPIF,2006).

Deneyde kullanılan eleklerin açıklık ölçüleri en üstten en alta doğru sırasıyla; 250µm, 150µm, 125µm, 75µm'dir. Elekler silindirik ve iç içe geçebilecek şekildedir. Eleklerin en altında ise bir tava mevcut olup tavada biriken tozlar en alta yerleştirilmiş olan en küçük elek açıklığına sahip 75 µm'lik elekten geçebilen tozlardır. Üst üste yerleştirilen elekler ve tava *OCTAGON* marka titreşim cihazına yerleştirilerek 15 dakika titreştirilmiştir. Şekil 6.1'de elek analizi düzeneği görülmektedir.



Şekil 6.1 Titreşimli elek cihazı ve eleklerin yerleşiminin şematik görünümü.

15 dakika sonunda düzeneden çıkartılan her bir elekte kalan ve tavada biriken tozların ağırlıkları hassas terazi ile ölçülmüştür. Elek analizi sonunda eşitlik (6.1) kullanılarak toz tane boyutu hesaplanmıştır.

$$d_0 = \Sigma \Delta R \cdot \frac{d_a}{100} \quad (6.1)$$

d_0 ; Toz tane boyutu (mm)

ΔR ; Elek üstü miktarı (% hacimce)

d_a ; Her elek gözü için ortalama tane boyutu (mm)

6.1.2 Akışkanlık deneyi

MPIF 03 no'lu standarta göre akıcılık testi, *Hall* aparatı kullanılarak metal tozlarının serbest bir şekilde akış hızının hesaplanması için uygulanır.

Akıcılık deneyi *Hall* akış metre hunisi, huni tutucu ve kronometre ile gerçekleştirilmektedir. MPIF 01 Standardına göre huniye konulması gereken metal toz numune 50 gr ağırlığında olmalıdır. Ayrıca tartılan metal tozlarının nemli olmamasına dikkat edilmelidir (MPIF,2006). Akıcılık testinde kullanılan *Hall* düzeneği şekil 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 *Hall* düzeneği.

Hassas terazide tartılan 50 gr ağırlığındaki toz numune huniye doldurularak, huniden serbest akışına izin verilerek, hunideki toz bitene kadar geçen süre kronometre ile ölçülmüştür. MPIF standardına göre saf demir tozu için bu değer 31 saniye olup deneyde kullanılan toz numune Cu katkılıdır (Ranganathan ve Hill, 2004).

6.1.3 Görünür yoğunluk deneyi

MPIF 04 standardına göre yapılan bu testte de *Hall* aparatı kullanılır. Huniden akan toz 25 cm³ lük silindirik yoğunluk kabını doldurana kadar serbest halde akar. Kap dolduktan sonra fazlalık toz sıyrılarak daha önceden darası alınmış olan yoğunluk kabının ağırlığı tartılarak kap içerisindeki tozun ağırlığı bulunur. Eşitlik (6.2) kullanılarak görünür yoğunluk değeri hesaplanmaktadır (MPIF,2006).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (6.2)$$

ρ ; Yoğunluk (gr/cm³)

m ; kütle (gr)

V ; Hacim(cm³)

6.1.4 Toz partiküllerinin SEM incelemesi

TOZ METAL A.Ş. tarafından *HÖGENÄS* firmasından tedarik edilen tozlar karbon bant üzerine yerleştirilerek şekil 6.3'te görülen 5410 LV model kodlu *JEOL* marka tarama elektron mikroskopuyla kimyasal analizi ve mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Toz numuneler karbon bant üzerine yerleştirilerek incelenmiştir ve EDS ölçümlerinde numune içerisindeki karbon miktarını karbon bant etkilediği ve mevcut değerden yüksek değerler elde edildiği için spektrumdaki karbon piki ihmal edilmiştir.

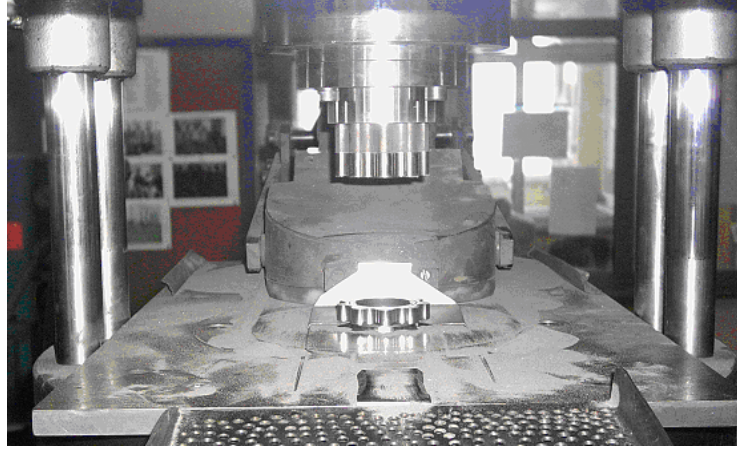


Şekil 6.3 Tarama elektron mikroskobu (JEOL 5410 LV)

6.2 Parçaya Uygulanan İşlemler ve Deneyler

Deneysel çalışmalarda *TOZ METAL A.Ş.* tarafından Fransız *Renault* firması için üretilen yağ pompası iç rotor dişlisi kullanılmıştır. Dişliler geleneksel T/M işlem süreci ile üretilmiş olup deneysel çalışma amacıyla farklı karbon potansiyellerine sahip sinterleme atmosferleri kullanılarak sinterlenmiştir. Bu çalışmadaki amaç farklı sinterleme atmosferlerinin parça yapısı ve özelliklerine etkisinin araştırılmasıdır.

İsveç *HÖGENÄS* firmasından hazır olarak gelen toz karışımı presleme kalıbına yerleştirildikten sonra şekil 6.4'te görülen *TPA-100 FRAY* marka presleme cihazında 96 ton kuvvetle preslenmiştir. Preslenen parçanın yüzey alanı 16.65 cm^2 olup presleme basıncı 576.6 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.4 TPA-100 FRAY marka presleme cihazı ve preslenmiş parça

Preslemeden çıkan parçalar şekil 6.5'te görülen MAHLER marka konveyör tipi fırında sinterlenmiştir. Sinterleme işlemi sırasında kullanılan parçalanmış doğal gaz (CH_4) atmosferinin hava/doğal gaz oranı 16/6 olup, C potansiyelleri %0.2, %0.4, %0.6 ve %0.8 olarak seçilmiştir. Farklı karbon potansiyelleri hava/doğal gaz oranı değiştirilerek elde edilmektedir.



Şekil 6.5 MAHLER marka sinterleme fırını ve sinterlenmeye giren parçalar

Sinterleme işleminde parçalar ilk olarak fırının bağlayıcı giderme bölgesine girmektedir. Bu bölgenin sıcaklığı yaklaşık 600°C 'dir. Bağlayıcılar yapıdan uzaklaştırıldıktan sonra parçalar fırının sinterleme bölgesine girmektedir. Sinterleme bölgesinin sıcaklığı 1120°C olup parçalar 30 dak. boyunca bu bölgede kalmaktadır. Daha sonra sıcaklığı 46°C olan soğutma bölgesine

geçen parçalar bu bölgeyi 85°C sıcaklıkta terk etmektedir. Soğutma bölgesinde parçalar 14°C/dak soğutma hızıyla yaklaşık 70 dakikada soğumaktadır. Sinterleme fırını bant hızı yaklaşık 140 mm/ dak.'dır.

6.2.1 İç rotor dişlisinden diş çıkarılması

Fabrikadan alınan iç rotor dişlilerinden metalografik inceleme, yoğunluk tayini, sertlik ölçümü, kimyasal analiz, yüzeysel porozite ölçümü, aşınma miktarı ölçümü ve görüntü çekimi yapılmak üzere şekil 6.6'da görülen *Standart* marka mekanik testere ile diş kesilmiştir.



Şekil 6.6 *Standart* marka mekanik testere

6.2.2 Yoğunluk ölçümü

Mekanik testere ile kesilen diş parçalarının havadaki ağırlıkları hassas terazi ile sudaki ağırlıkları ise hassas teraziye eklenen sepet aparatı ile 22°C oda sıcaklığında ölçülmüştür. *Archimedes* prensibi esasına dayanarak yoğunluklar hesaplanmıştır. Ölçülen yoğunlukların teorik yoğunluğa oranı ile parçaların doluluk oranı hesaplanabilir. Doluluk oranı bilinirse parçanın sahip olduğu hacimsel gözenek miktarı da bilinebilir. Parçaların yoğunluklarının hesaplanmasında eşitlik (6.3) kullanılmıştır.

$$\rho_{ölçülen} = \frac{G_{hava}}{(G_{hava} - G_{suda})} \quad (6.3)$$

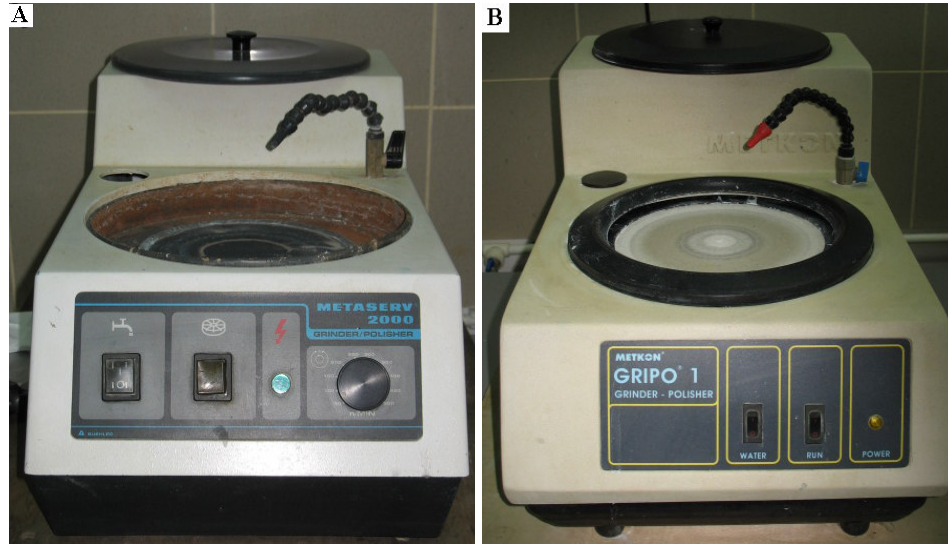
$\rho_{ölçülen}$; Ölçülen yoğunluk değeri

G_{hava} ; Parçaların havadaki ağırlıkları

G_{suda} ; Parçaların sudaki ağırlıkları

6.2.3 Metalografik hazırlık

Metalografik hazırlama sırasında tutuş kolaylığı sağlamak amacıyla farklı karbon potansiyeline sahip atmosferlerde sinterlenen parçalardan çıkarılan dişler önce soğuk monte yapılmıştır. Soğuk monte işlemi için öncelikle monte kalıbı yağlanır; daha sonra sıvı haldeki monte malzemesi ve sertleştirici madde bir kaptaki karıştırıldıktan sonra kalıp içine yerleştirilen diş üzerine bu karışım boşaltılarak montenin sertleşmesi için 3 saat beklenmiştir. Kalıptan çıkarılan monteler şekil 6.7A'da görülen *METASERV 2000* marka zımpara cihazında zımparalanmıştır. Zımparalama işleminde sırasıyla 120–240–320–400–800–1000 meshlik zımparalar kullanılmıştır. Zımparalamanın ardından şekil 6.7B'de görülen *METKON GRIPO 1* marka parlatma cihazında diş parçaları 3-6-9 μm 'lik elmas pasta kullanılarak parlatılmıştır.



Şekil 6.7 Metalografik hazırlık cihazları a) Zımparalama cihazı b) Parlatma cihazı

6.2.4 Görüntü analizi

LEICA marka görüntü analiz cihazı bir çeşit ışık mikroskobu olup metalografik olarak hazırlanan diş parçasının mikro-makro yapı incelemelerinde ve yüzeyindeki açık kalıntı gözenek miktarının belirlenmesinde kullanılır. Metalografik olarak hazırlanan diş parçalarının yüzey görüntüleri alınarak ve yüzeysel gözenek oranları görüntü analiz cihazının yardımcı yazılım programı ile ölçülmüştür. Bu yazılımla parçanın yüzeyindeki gözenek miktarı ölçülürken, mikroskoptan bilgisayar ekranına yansıtılan görüntüde gözenekler koyu renkte görülmektedir. Gözeneklerin olmadığı dolu bölgeler bilgisayar ekranında açık renkte gözükmemektedir. Koyu görüntü veren gözenek adacıklarının bütün alana (gözenek + dolu bölge) oranı, yüzeysel açık kalıntı gözenek oranını vermektedir. Bu oran yüzeysel

gözeneklilik olarak adlandırılır. Şekil 6.8’de görüntü analiz cihazı ve bilgisayar düzeneği görülmektedir.



Şekil 6.8 *LEICA* marka görüntü analiz cihazı ve bilgisayar düzeneği

Yüzeysel gözeneklilik değerleri hacimsel gözeneklilik hakkında bilgi vermediğinden yeterli değildir. Oysaki parçanın gerçek gözeneklilik değerleri hacimsel gözenek değerleridir. Eşitlik (6.3) ile hesaplanan $\rho_{ölçülen}$ değerlerin teorik yoğunluğa oranları hacimsel doluluk oranlarını vermektedir. Bu prensiple düzenlenmiş eşitlik (6.4) ile parçaların hacimsel gözeneklilik değerleri hesaplanmaktadır. .

$$\%Gözenek_{Hacimsel} = 100 \cdot \frac{\rho_{Teorik} - \rho_{ölçülen}}{\rho_{Teorik}} \quad (6.4)$$

6.2.5 Kimyasal analiz

Farklı karbon potansiyeline sahip atmosferlerde sinterlenmiş ve metalografik olarak hazırlanmış parçalara *HILGER Analytical* marka optik emisyon spektrometresinde kimyasal analiz yapılmıştır. Optik emisyon spektrometresine ait görüntü şekil 6.9’da verilmiştir. Spektrometre metallerin içerdikleri alaşım elementi yüzdesini ölçmeye yarayan cihazdır. Spektrometre, alaşımın içindeki metal yüzdesini elektrotlar arasından verilen elektronun oksijeni yakmasını önlemek için argon gazı atmosferinde ölçer. Elektronun enerji seviyesindeki değişim sonucunda ortaya çıkardığı radyoaktif dalganın konkav yüzeyden geçerken kırılma açısından yararlanarak, daha önceden girilmiş referanslara göre element yüzdelelerini saptar.



Şekil 6.9 *HILGER Analytical* marka Optik Emisyon Spektrometresi

Üzerinde işlem yapılacak malzemenin yüzeyinin pürüzsüz olması gerektiği için numune yüzeylerine zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmalıdır.

6.2.6 Tarama elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları

Metalografik olarak hazırlanan parçalar tarama elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir. İncelemelerde dış parçasının üst kenar, merkez ve alt kenar bölgelerinden görüntü alınmıştır. Sinterlenmemiş parçaların SEM’de görüntüleri incelenirken 20kV’luk gerilim kullanılmıştır. Görüntüsü alınan her parçaya EDS analizi uygulanarak kimyasal kompozisyonlarına bakılmıştır. Sinterlenmemiş parçaların görüntüleri şekil 6.3’te görülen *JEOL* marka ve 5410 LV model kodlu cihazın compo modunda alınmıştır.

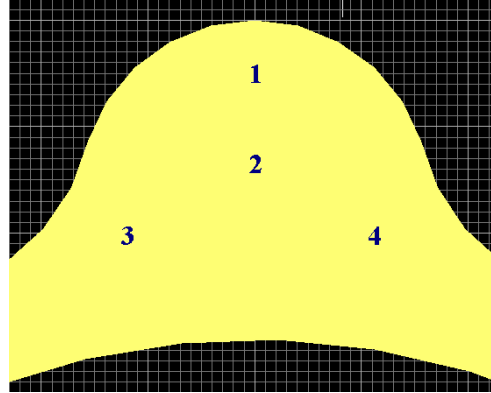
6.2.7 Sertlik ölçümleri

Sertlikler Rockwell-B ve MikroVickers yöntemleriyle ölçülmüştür. Sertlik ölçümünde şekil 6.10A’da görülen *WILSON* marka Rockwell sertlik cihazı ve 6.10B’de görülen mikrovickers sertlik cihazı kullanılmıştır. MPIF 43 Standardı doğrultusunda Rockwell B sertlik testi T/M parçalar üzerinde kesin sonuç vermektedir. Standarda göre F-0008-35 (alaşımsız çelik) 70 HRB, FC-0208-50 (Bakırlı çelik) 81 HRB sertliğe sahiptir (MPIF, 2006). Rockwell sertlik cihazı ile parça yüzeyinden alınan sertlik değeri gözenek ve anafaz bölgelerini içerdiğinden genel bir sertlik değeridir. Mikrovickers cihazı ile yapılan sertlik ölçümü sadece anafaz bölgesinin sertlik değerini belirtmektedir.



Şekil 6.10 A) Rockwell sertlik cihazı B) Mikrovikers sertlik cihazı

Parçaların farklı bölgelerinden ölçümler alınmıştır. Grafik haline getirilen sertlik değerleri farklı bölgelerden alınan sertlik değerlerinin ortalamasıdır. Bu farklı bölgeler şekil 6.11’de görülmektedir.



Şekil 6.11 Diş profili ve sertlik alınan bölgeler 1.diş üstü, 2.merkez, 3.sol kenar, 4.sağ kenar

Cihazda kullanılan batıcı bilya ucun çapı 1.59 mm olup yük 100 kp ve bekleme süresi 27 saniyedir. Sertlik deneyi ile ölçülen HRB sertlik değerleri parçaları karşılaştırmak amacıyla grafik haline dönüştürülmüştür.

6.2.8 Korozyon Deneyi

MPIF 62 standardında yer alan MIM (metal enjeksiyon kalıplama) yöntemi ile üretilmiş olan paslanmaz çelik numunelere %2'lik sülfürik asit (H_2SO_4) çözeltisi kullanılarak yapılan korozyon deneyindeki düzenek referans alınmıştır. Uyguladığımız deneyde parçalar %3.5'luk sodyum klorür (NaCl) çözeltisinde teste tabi tutulmuştur (MPIF, 2006). Şekil 6.12'de kurulan korozyon test düzeneği görülmektedir.



Şekil 6.12 Korozyon deney düzeneği

Deney düzeneğinde her bir parça için 400ml'lik beherler kullanılmıştır. Kullanılan çözelti için gerekli NaCl kütlesi 17.5gr olarak hesaplanmıştır. Çözelti hazırlanırken önce 17.5gr ağırlığındaki NaCl behere yerleştirilip, üzerine toplam hacmi 400ml olacak şekilde damıtık su ilave edilmiştir. Deney düzeneğine yerleştirilen parçalar kesilmemiş, bütün haldeki iç rotor dişlileri olup beher tabanına temas etmeden ve çözelti içinde asılı kalacak şekilde yerleştirilmişlerdir.



Şekil 6.13 Nüve DS 030 laboratuvar tipi etüv

Uygulanan korozyon deneyi toplam 96 saat sürmüş olup her 24 saatte bir parçalar çözelti içinden çıkartılarak Şekil 6.13'te görülen *Nüve* marka *DS 030* model laboratuvar tipi etüvde 200°C sıcaklıkta 1 saat süreyle kurutulmuştur. Kurutulan parçalar tekrar korozyon test düzeneğine yerleştirilmeden önce tartılarak ağırlıkları kaydedilmiş ve parçaların fotoğrafları çekilmiştir. Korozyon deneyinden önce her parçanın ağırlıkları ölçülüp kaydedilerek bu değerler deney boyunca ölçülen ağırlık değişimleri ile karşılaştırılmıştır.

6.2.8.1 Korozyon Hızı Hesaplamaları

Korozyon hızı hesaplamaları için parçanın toplam yüzey alanına ihtiyaç vardır. Toplam yüzey alanı *TOZ METAL A.Ş.* tarafından 88,6cm² olarak bildirilmiştir. Eşitlik (6.5) yardımıyla parça için korozyon hızı *mgr / gün · dm²* cinsinden hesaplanır. Korozyon hızı hesaplamasında sadece %0.2C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenen parçada 72.- 96.saat arasındaki meydana gelen ağırlık değişimi dikkate alınmıştır.

$$H = K \cdot \frac{\Delta G}{t \cdot A \cdot \rho} \quad (6.5)$$

K ; Korozyon hızı katsayısı ($2,4 \cdot 10^6 \cdot \rho$)

ΔG ; Ağırlık değişimi (*gr*)

t ; Süre (*saat*)

A ; Toplam yüzey alanı (*cm²*)

ρ ; Yoğunluk (*gr/cm³*)

H ; Korozyon hızı-*md* (*mgr / gün · dm²*)

6.3 Aşınma Deneyi

DIN 50320 standartına göre aşınma, cisimlerin yüzeylerinden mekanik etkenlerle mikro taneciklerin koparak ayrılması nedeni ile istenmeyen bir değişikliğin meydana gelmesidir. Aşınma mekanik, kimyasal veya elektrokimyasal etkenlerin tribolojik sistem içinde etkileşimleri ile meydana gelir. Aşınmanın başlaması ve devam etmesi için sürtünme olması şarttır. Sürtünen iki yüzeyin temas alanına mekanik etkileşim alanı denir. Yüzeylerin gerçek temas alanı görünen temas alanında küçüktür. Yüzey etkileşimi malzeme yüzeyindeki pürüzlerde olur. Yüklemin şekli ve değeri temas alanını, dolayısıyla aşınmayı etkileyen iki

önemli faktördür. Yükün değeri arttıkça gerçek temas alanı artar. İki cismin birbirine göre yaptığı hareketin yönü ve miktarı, aşınma miktarını ve aşınma cinsini belirler. Bunların yanı sıra sıcaklığında aşınmaya büyük etkisi vardır.

Tribolojik sistem elemanları arasında meydana gelen aşınmanın değişik türleri vardır. Aşınma yağlayıcı tipi, sıcaklık, yük, hız, malzeme, ürünün yüzey bitirme işlemi ve sertlik gibi özelliklerinin değiştirilmesinden etkilenmektedir.

Aşınma deneylerinde çoğunlukla *Pin-On Disk* cihazı kullanılmaktadır. Yöntem, genellikle kayma aşınmasını araştırmak amacıyla kullanılmakta olup ismini dönen bir diske temas eden pimden alır. Pim veya disk deneye tabi tutulan parça olabilir. Pimin temas ettiği yüzey küresel, düz veya aşınma elemanlarını içeren herhangi bir uygun geometriye sahip yüzey olabilir. Tipik bir *Pin-On Disk* deneyinde aşınma meydana geldikçe, sürtünme katsayısı da sürekli olarak tesbit edilir. Deney sonunda numune yerinden çıkartılarak ağırlık farkından veya kalınlık farkından faydalanılarak aşınma miktarı hesaplanmaktadır. Aşınma mekanizmasındaki değişimleri sürtünme katsayısındaki değişimler belirler.

Çalışmamız kapsamında uyguladığımız aşınma deneyi sırasında kullandığımız cihaz şekil 6.14'te gösterilmektedir. Cihazımız *Mahmuz Makina A.Ş* tarafından kendi tasarladığımız şekilde imal edilmiştir.



Şekil 6.14 Aşınma deney cihazı

Cihaz üzerinde manuel hız ayarı, tur göstergesi ve dijital aşınma kuvveti göstergeleri mevcuttur. Aşınma kuvveti numune tutucuya temas eden yük hücresi (load cell) vasıtasıyla tespit edilmektedir. Numune, hareket eden numune tutucuya yerleştirildikten sonra aşındırıcı disk üzerinde merkezden istenilen uzaklığa yerleştirilebilmektedir. Hareketli tabla üzerindeki cetvel yardımıyla disk merkezi ile numunenin temas yüzey merkezi arasındaki uzaklık okunmaktadır. Deney sırasında kullanılacak ağırlıklar disk şeklinde olup numune tutucunun bulunduğu kola takılmaktadır. Cihazımızın bilgisayar bağlantısı mevcut olup yük hücresinden alınan veriler indikatörde gösterilmekte ve bu değerler 2 saniyede bir bilgisayardaki program tarafından excel dosyası olarak kaydedilmektedir. Bilgisayarın kaydettiği veriler ham veri olup gerekli hesaplamalar yapılarak istenilen sonuçlara ulaşmak mümkündür. Aşınma deneyinde kullandığımız numuneler silindirik olup farklı karbon potansiyellerine sahip ortamlarda sinterlenen rotor dişlilerinden çıkartılan tek bir dişin tornalanmasıyla elde edilen pimlerdir.

Ağırlık değişimleri deney esnasında cihaz durdurularak numune çıkartılıp şekil 6.15'te görülen hassas terazide ağırlık ölçümü yapılarak kaydedilmiştir. Her numune için alınan yol 1000 metre olduğundan her 100 metreye denk gelecek çevrim sayısında numune ağırlığı tespit edilmiştir. Deney sırasında parçalarda abrasiv aşınma olmuştur.



Şekil 6.15 Hassas terazi

Deney bitiminde her ağırlık değişimi için aşınma hızı hesaplanarak ortalamaları alınmıştır. Aşınma hızını hesaplariken eşitlik (6.6) kullanılmıştır.

$$A = \frac{\Delta m}{L \cdot \rho \cdot F} \quad (6.6)$$

A; Aşınma hızı (mm³ / Nm)

Δm ; Ağırlık farkı (gr)

L; Alınan yol (m)

ρ ; Yoğunluk (gr/cm³)

F; Etkiyen kuvvet (N)

7. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARI

7.1 Elek analizi

Çizelge 7.1 iç rotor pompası yapımında kullanılan Fe esaslı başlangıç tozuna ait elek analiz sonuçlarını özetlemektedir. Ortalama partikül büyüklüğü eşitlik (6.1) kullanılarak 0.0879 mm hesaplanmıştır.

Çizelge 7.1 Elek analizi tablosu

Elek göz açıklığı d (mm)	Elek üstü miktarı, ΔR (% hacim)	Toplam elek üstü miktarı, R (%)	Toplam elek altı miktarı, D (%)	Her göz için ortalama tane boyutu, d_a (mm)
0.250	0	0	100	0.275
0.150	0.05	0.05	99.95	0.200
0.125	23.41	23.46	76.54	0.1375
0.075	43.00	66.46	33.54	0.100
Tava	33.54	100	0	0.0375

7.2 Akışkanlık deneyi

Hall düzeneği kullanılarak yapılan deney sonunda kronometre ile ölçülen toz akış süresi $t = 30$ saniyedir. MPIF satndartında saf demir tozunun akış süresi 31 saniye olarak verilmiştir. Akışkanlık deneyinde kullandığımız *TOZ METAL A.Ş* tarafından tedarik edilen ve metal tozu ise Cu katkılıdır. Cu katkısı akışkanlık değerine fazla etki yapmamıştır.

7.3 Görünür yoğunluk deneyi

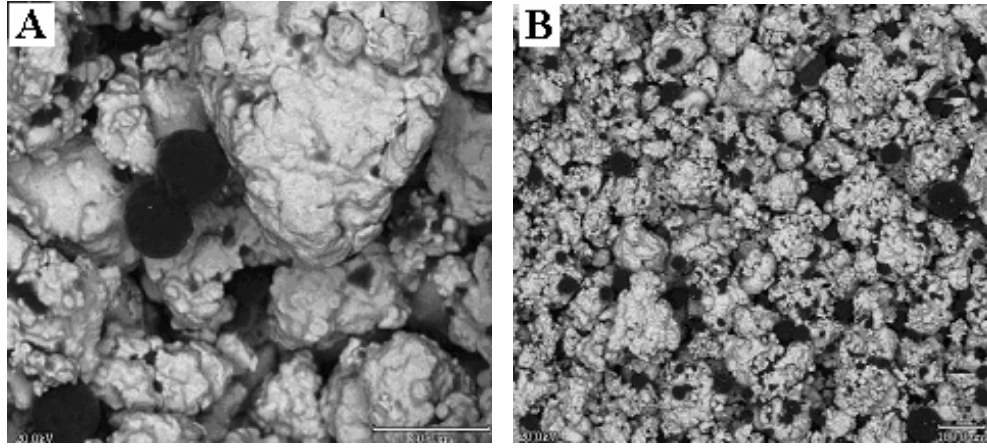
Çizelge 7.2 iç rotor pompasının yapımında kullanılan tozdan alınan numunenin görünür yoğunluk değerini göstermektedir. Görünür yoğunluk değeri hacim ve ağırlık değerlerine bağlı olarak eşitlik (6.2) kullanılarak 3.476 gr/cm^3 hesaplanmıştır.

Çizelge 7.2 Ağırlık ve hacim değerlerine göre görünür yoğunluk

Ağırlık (m) ,gr	Hacim (V) ,cm ³	Yoğunluk (ρ) ,gr/cm ³
86.898	25	3.476

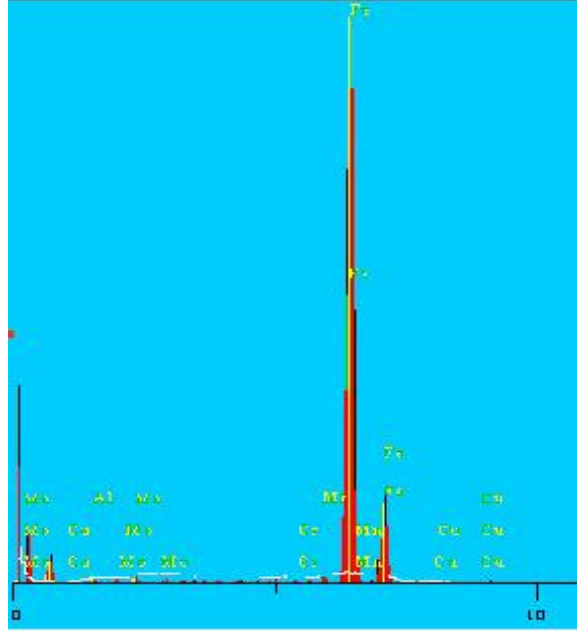
7.4 Toz partiküllerinin SEM incelemesi

Karbon bant üzerine yapıştırılan toz numunesinden alınan görüntüler 20kV gerilimde 100X ve 500X büyütmede alınmıştır. Şekil 7.1’de alınan görüntüler görülmektedir. Görüntülerde Fe tozlarının yanısıra siyah küreler halinde grafitler görülmektedir.



Şekil 7.1 Toz numunenin SEM mikroyapı görüntüleri A) 500X, B)100X

Görüntüler alınırken SEM’e bağlı LaB6 filamanlı EDS (Electron Dispersive Spectrum) ünitesi kullanılarak toz numuneye kimyasal analiz yapılmıştır. EDS analizine ait spektrum şekil 7.2’de ve çizelge 7.3’te ise EDS analizinin sonuçları verilmiştir. Analiz neticesinde metal toz ana olarak Fe, Cu ve Mn elementlerini içermektedir. Ayrıca çizelge 7.4’te HÖGENÄS firması tarafından yapılan toz numuneye ait kimyasal analiz görülmektedir.



Şekil 7.2 EDS ile elementlerin spektral dağılımı

Çizelge 7.3 EDS ile tozun kimyasal analizi

Element	Çizgi	Yoğunluk (c/s)	% Miktar
Mn	Ka	16.42	2.013
Fe	Ka	473.09	91.339
Cu	Ka	3.41	1.238

Çizelge 7.4 HÖGENÄS tarafından yapılan toz numuneye ait kimyasal analiz

Cu	C-grafit	MnS	Amide Wax TM	Fe
% 1.60	% 0.63	% 0.50	% 0.89	Kalan

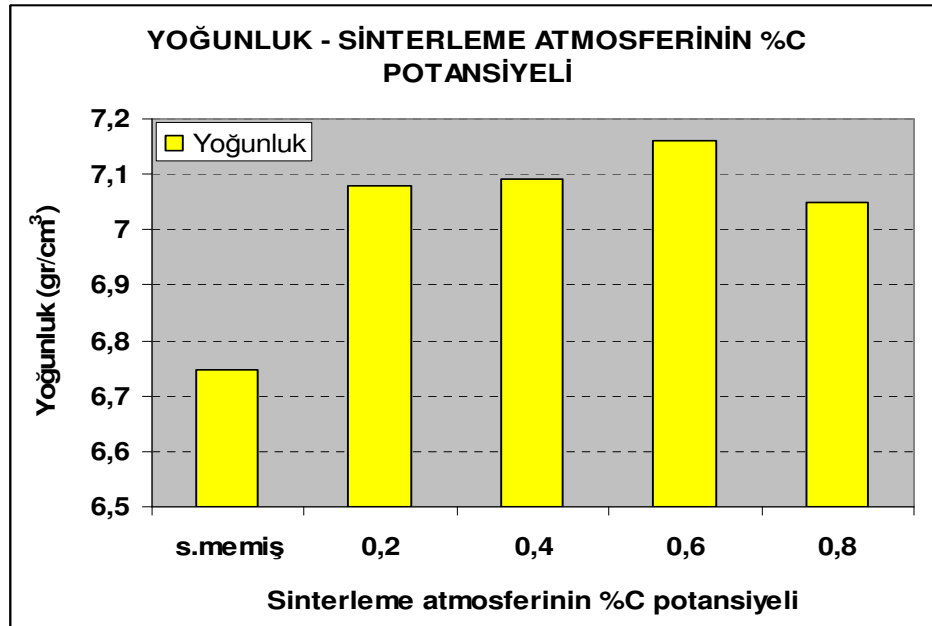
7.5 Dişlilerin Yoğunluk Ölçümü

Archimedes yöntemi kullanılarak ölçülen yoğunluk değerleri çizelge 7.5'te gösterilmiştir. Çizelge 7.5'te gösterilen yoğunluk değerleri kullanılarak Şekil 7.3'teki grafik oluşturulmuştur. Çizelge 7.5'te görüldüğü gibi en düşük yoğunluk değeri sinterlenmemiş parçada görülmektedir. Bu parça sinterleme işlemi görmediği için tozlar sadece presleme sonrasında aldıkları kompakt halde durmaktadırlar. Ölçülen değerler içinde en yüksek yoğunluk değerine

%0.6C atmosferinde sinterlenen parça sahiptir. Normal üretim şartlarında sinterleme fırınına girmeye hazır haldeki kompakt parça %0.6C içermekte ve parça aynı karbon potansiyeline sahip atmosferde sinterlendiğinden herhangi bir karbon kaybına veya artışına rastlanmamaktadır. Dolayısıyla bu atmosferde sinterlenen parçalarda sinterleme işleminin etkisi maksimum seviyededir. Kompakt haldeki toz taneleri bu sinterleme atmosferinde en iyi şekilde kaynaşarak taneleri arası boşlukları minimum seviyeye indirmektedirler. Dolayısıyla parçanın sahip olduğu yoğunluk değeri yüksek çıkmaktadır.

Çizelge 7.5 Parçaların havadaki ve sudaki ağırlıklarına bağlı yoğunluk değerleri

% C (Atmosfer)	Havada Ağ.(gr)	Suda Ağ. (gr)	Yoğunluk gr/cm ³
Sinterlenmemiş	14.24	12.13	6.748
0.2	14.53	12.47	7.08
0.4	16.16	13.88	7.09
0.6	14.52	12.49	7.16
0.8	16.15	13.85	7.05



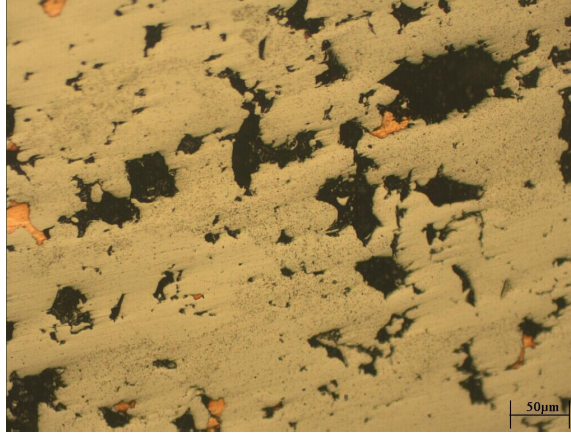
Şekil 7.3 Yoğunluğun sinterleme atmosferinin % C potansiyeline bağlı değişimi

7.6 Görüntü analizi

7.6.1 Dağlama öncesi yapı görüntüleri ve gözeneklilik ölçümü

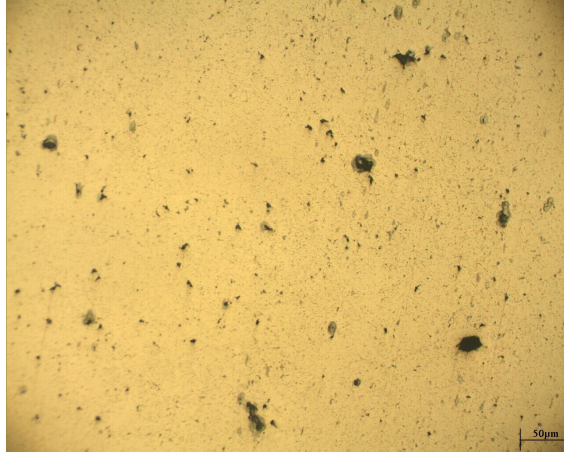
Görüntü analiz cihazıyla farklı atmosferlerde sinterlenmiş olan iç rotor parçasından çıkartılan dışların görüntüleri alınmıştır. Görüntülerdeki koyu renkli bölgeler gözenekleri, sarı renk ağırlıklı olan bölgeler ise dolu matrisi göstermektedir. Şekil 7.4’de sinterlenmemiş parçanın görüntüsü, şekil 7.5, 7.6, 7.7 ve 7.8’de sırasıyla % 0.2-0.4-0.6-0.8C potansiyeline sahip atmosferlerde sinterlenmiş parçaların 10X büyütmede alınmış görüntüleri verilmiştir.

Şekil 7.4’te sinterlenmemiş parçada yüzeysel gözenekler büyük ve çok sayıda mevcuttur. Parlak sarı renkli bölgeler Cu içermektedir. Gözeneklerin büyük oluşu parçanın metalografik olarak hazırlanması sırasında, gözenek içlerinde su kalmasına neden olmakta ve yüzeyde su lekeleri meydana gelmektedir.



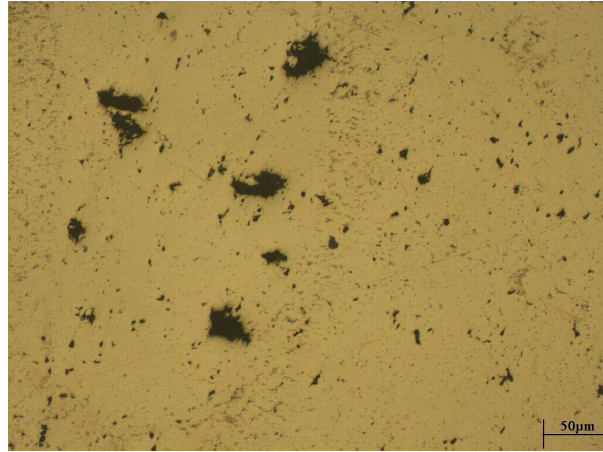
Şekil 7.4 Sinterlenmemiş parçanın 10X büyütme görüntüsü

Şekil 7.5’te görülen %0.2C atmosferinde sinterlenen parçaya ait görüntüde gözeneklerin boyutları sinterleme sonrası küçülmüştür; ancak parça içinde ve yüzeyinde halen çok sayıda küçük gözenek mevcuttur. Parçanın gerek hacimsel gözenek miktarının yüksek değerde olması gerekse yoğunluk değerinin düşük çıkması da bunun kanıtıdır.



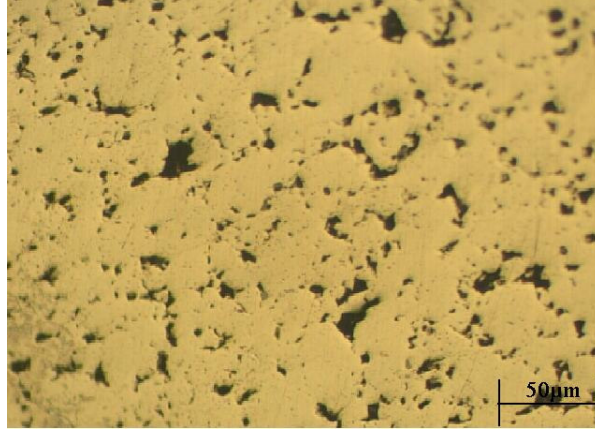
Şekil 7.5 %0.2 C atmosferde sinterlenmiş parçanın 10X büyütme görüntüsü.

Şekil 7.6'da görüldüğü gibi sinterleme atmosferinin karbon potansiyeli %0.4 seviyesine çıkartıldığında parçanın yüzeyindeki gözenek miktarı azalmaktadır. Küçük boyutlu gözeneklerin azalmasının yanında orta büyüklükte az sayıda gözenek mevcuttur. Bu parça için hesaplanan hacimsel gözenek değerinde %0.2C karbon potansiyelinde sinterlenen parçadan düşük olması gözenek miktarının giderek azladığının bir kanıtıdır.



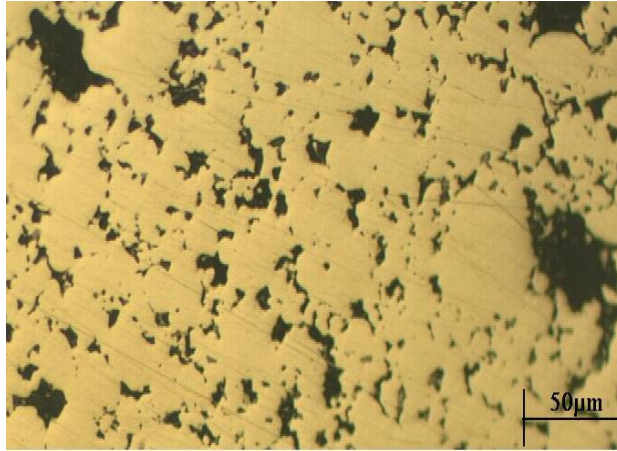
Şekil 7.6 %0.4 C atmosferde sinterlenmiş parçanın 10X büyütme görüntüsü

Şekil 7.7'deki parça yüzey görüntüsünde oldukça fazla sayıda yüzeysel gözenek görünmesine karşın bu parçanın hacimsel gözenek değerinin en düşük seviyede olması sinterleme atmosferinin parçanın sinterlenmesinde maksimum verim sağladığı anlaşılır.



Şekil 7.7 %0.6 C atmosferde sinterlenmiş parçanın 10X büyütme görüntüsü

Şekil 7.8’de görülen %0.8C atmosferinde sinterlenen parçada hem yüzeysel hem de hacimsel gözenek miktarı oldukça yüksektir. Bu durum sinterleme sırasında parçadaki mevcut gözeneklerde gaz sıkışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Gözeneklerin içinde sıkışan gaz sinterlemenin etkinliğini azaltmakta ve parça verimli şekilde sinterlenmemektedir. Bu parçanın ölçülen yoğunluğunun düşük çıkması da bu durumun bir sonucudur.



Şekil 7.8 %0.8 C atmosferde sinterlenmiş parçanın 10X büyütme görüntüsü

Görüntü analiz cihazıyla ölçülen yüzeysel gözenek değerleri çizelge 7.6’da verilmiştir. Her bir numune için 11 adet ölçüm yapılmıştır. Çizelgede belirtilen ortalama yüzeysel gözenek değerleri hesaplanırken, ölçülen en yüksek ve en düşük değerler dikkate alınmamıştır. Çizelgede mavi renkle gösterilen değerler en düşük, kırmızı renkle gösterilen değerler en yüksek ölçüm değerleridir.

Çizelge 7.6 Yüzeysel gözenek değerleri

ÖLÇÜM	Sinterlenmemiş	% 0.2 C	% 0.4 C	% 0.6 C	% 0.8 C
1	11.23	0.32	3.95	2.68	4.80
2	3.76	0.29	4.02	4.40	2.14
3	8.82	0.23	7.80	2.96	3.15
4	10.85	0.64	4.91	2.27	2.93
5	16.48	0.51	6.57	3.27	2.58
6	22.99	0.92	6.27	2.25	2.67
7	12.31	0.60	6.58	3.91	1.82
8	19.39	0.70	7.77	2.16	2.59
9	18.58	0.52	6.64	2.14	1.89
10	28.89	0.43	6.27	2.06	0.94
11	20.53	0.42	5.66	2.89	1.23
ORT.%	15.68	0.49	6.07	2.48	2.33

Ölçülen yüzeysel gözenek değerlerine göre en düşük yüzeysel gözenekliliğe %0.2C atmosferinde sinterlenen parça sahiptir. Ancak yüzeysel gözeneklilik değerleri tüm parça hakkında sağlıklı sonuç vermediğinden her parça için eşitlik (6.4) kullanılarak hacimsel gözeneklilik değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan hacimsel gözeneklilik değerleri çizelge 7.7’de görülmektedir. Hacimsel gözenek değerlerine bakıldığında en düşük değer %0.6C atmosferinde sinterlenen parçada görülür. Daha önce de belirtildiği gibi bu parçada sinterleme işleminin etkisi maksimum olduğundan hacimsel gözenek değerinin de en düşük seviyede çıkması beklenen bir durumdur.

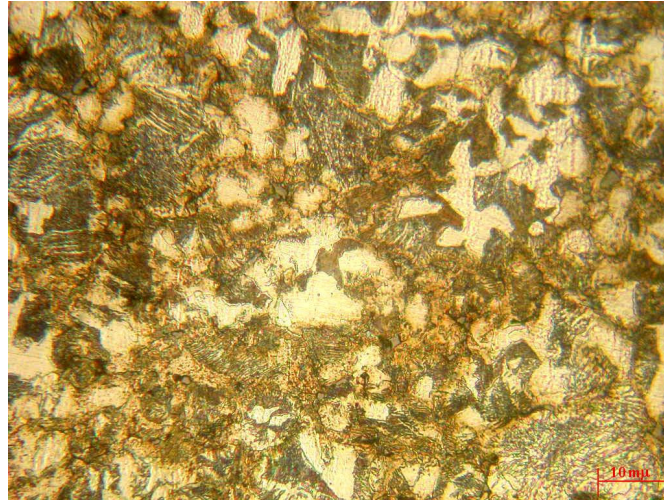
Çizelge 7.7 Teorik yoğunluğa ve ölçülen yoğunluğa bağlı hacimsel gözenek değerleri

% C atmosfer	ρ_{Teorik}	$\rho_{Ölçülen}$	% Gözenek Hacimsel
Sinterlenmemiş	7.81	6.748	13.70
0.2	7.81	7.08	9.34
0.4	7.81	7.09	9.21
0.6	7.81	7.16	8.32
0.8	7.81	7.05	9.73

7.6.2 Dağlanmış yapı görüntüleri

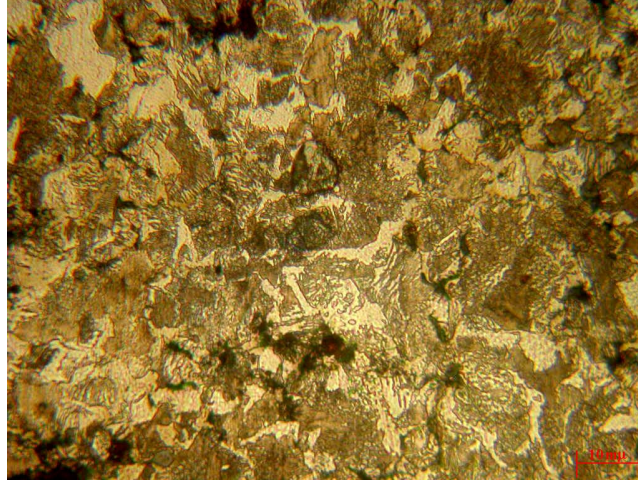
Farklı karbon potansiyellerinde sinterlenen dişli parçalarına Nital 2 (%2 HNO₃, %98 Etil alkol) kullanılarak dağlama işlemi yapılmıştır. Dağlama sonrasında çekilen yüzey fotoğrafları şekil 7.9, 7.10, 7.11 ve 7.12’de görülmektedir.

Şekil 7.9’da %0.2C potansiyelinde sinterlenen parçanın dağlama sonrası yüzey görüntüsü verilmektedir. Mikroyapı incelemesi neticesinde ağırlıklı olarak ferrit, ortalama değerlerde perlit ve Widmanstätten yapı gözlenmiştir.



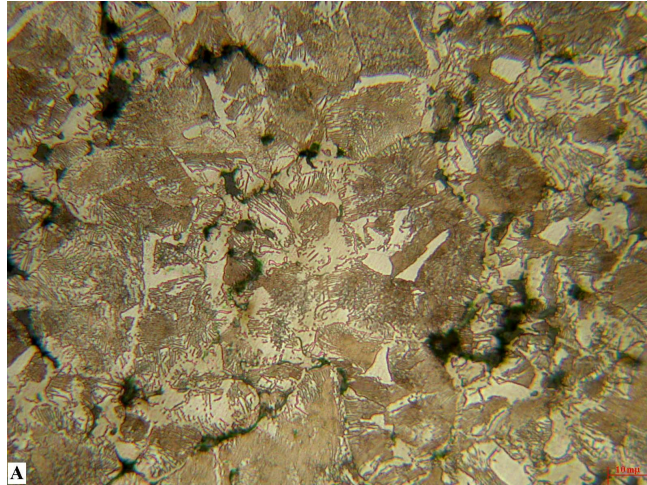
Şekil 7.9 %0.2 C atmosferinde sinterlenen parçanın dağlanmış görüntüsü (40X büyütme)

Şekil 7.10'da %0.4C potansiyelinde sinterlenen parçanın dağlama sonrası yüzey görüntüsü verilmektedir. Mikroyapı incelemesi neticesinde ferrit, perlit ve Widmanstätten yapı gözlenmiştir. Ferrit bölgelerin miktarı %0.2C atmosferinde sinterlenen parçadakinden daha az ve perlit bölgelerinin miktarı daha fazladır. Widmanstätten yapının taraksı görünümü daha belirgindir.

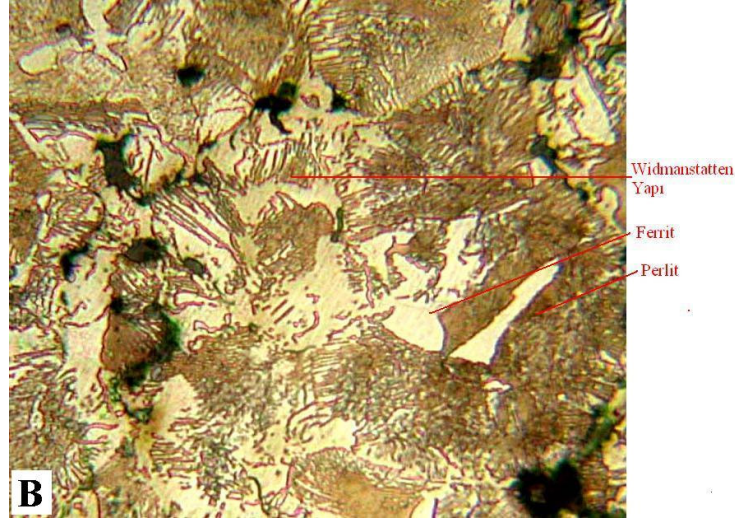


Şekil 7.10 %0.4 C atmosferinde sinterlenen parçanın dağlanmış görüntüsü (40X büyütme)

Şekil 7.11'de %0.6C potansiyelinde sinterlenen parçanın dağlama sonrası yüzey görüntüsü verilmektedir. Mikroyapı incelemesi neticesinde ferrit, perlit ve Widmanstätten yapı gözlenmiştir. Yapıda ağırlıklı olarak perlit bölgeleri ve az miktarda ferrit bölge görülmektedir. Taraksı şekle sahip Widmanstätten yapıda net şekilde gözlenmektedir.

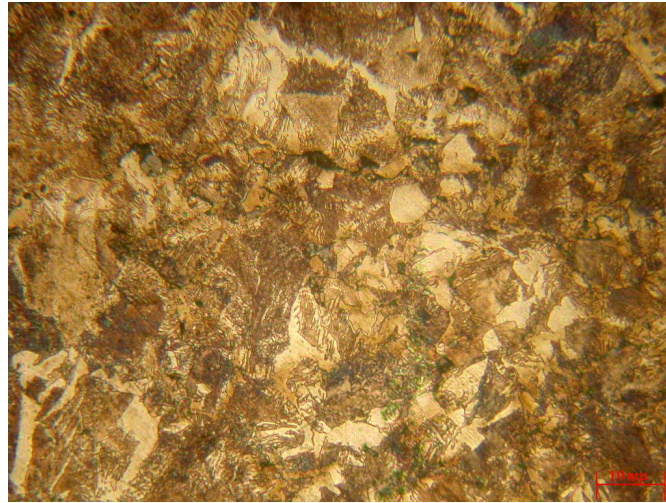


Şekil 7.11 A) %0.6 C atmosferinde sinterlenen parçanın dağlanmış görüntüsü (40X büyütme)



Şekil 7.11 B) %0.6 C atmosferinde sinterlenen parçadaki yapıların görüntüsü

Şekil 7.12’de %0.8C potansiyelinde sinterlenen parçanın dağlama sonrası yüzey görüntüsü verilmektedir. Mikroyapı incelemesi neticesinde ferrit, perlit ve Widmanstätten yapı gözlenmiştir. Yapıda yüksek miktarda perlit bölgeleri, çok az miktarda ferrit bölgeleri ve Widmanstätten yapı mevcuttur.



Şekil 7.12 %0.8 C atmosferinde sinterlenen parçanın dağlanmış görüntüsü (40X büyütme)

7.7 Kimyasal analiz

Optik emisyon spektrometresi ile ölçülen kimyasal analiz sonuçlarında ana faz olarak Fe, katkı elementi olarak Cu tespit edilmiştir. Bunların yanısıra C ve Mn elementleri tespit

edilmiştir. Optik emisyon spektrometresi ile alınan kimyasal analiz sonuçları daha sonra SEM mikroskopunda tekrarlanarak teyit edilmiştir. Optik emisyon spektrometresi ile elde edilen kimyasal analiz sonuçları çizelge 7.8’de görülmektedir.

Çizelge 7.8 Optik emisyon spektrometresi kimyasal analiz sonuçları

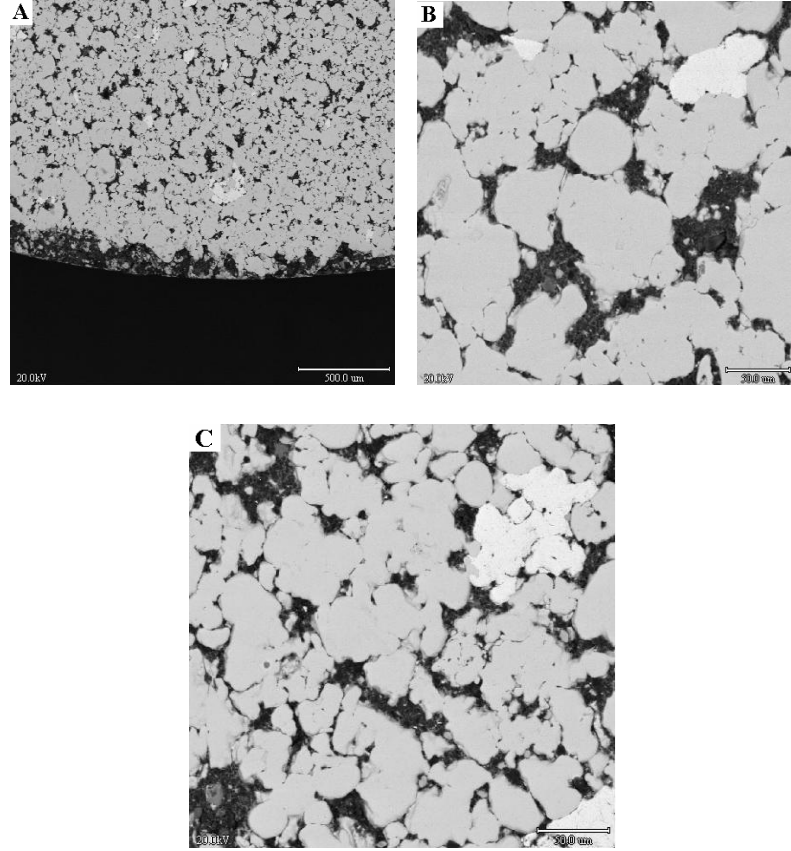
% Element	Sinterlenmemiş	% 0.2 C	% 0.4 C	% 0.6 C	% 0.8 C
Fe	96.05	97.38	96.43	97.117	95.84
C	0.707	0.277	0.468	0.635	1.07
Mn	1.48	0.405	0.397	0.548	0.426
Cu	1.21	1.47	2.21	1.70	2.16

7.8 Tarama elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları

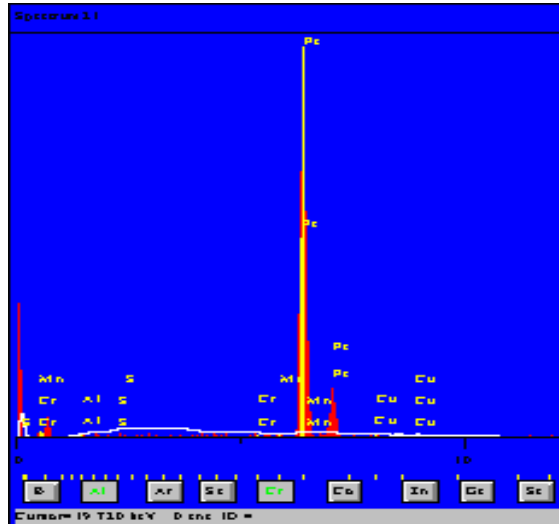
Tarama elektron mikroskopunda öncelikle parçaların görüntüleri alınmış ardından her parçaya kimyasal analiz uygulanmıştır. Ancak yapılan kimyasal analiz sonuçlarında ölçülen C değerleri dikkate alınmamıştır. Çünkü parçalar cihaz içinde karbon bant üzerinde yapışık durumda olduğundan analiz sırasında cihaz karbon banttı da veri topladığından ölçülen karbon değerleri hatalı çıkmaktadır.

Şekil 7.13’te sinterlenmemiş parçaya ait mikroyapı görüntüleri görülmektedir. Her üç görüntüde de üç renk hâkimdir. Gri renkli bölgeler Fe esaslı ana faz, beyaz renkli bölgeler Cu ve siyah renkli bölgeler ise gözenekleri ifade etmektedir. Her üç görüntüde toz taneleri arasındaki gözeneklerin ne kadar çok ve büyük olduğunu göstermektedir. Bu durum parçanın yoğunluğunun en düşük seviyede ve hacimsel gözenek miktarının maksimum seviyede ölçülmesinin kanıtıdır.

Şekil 7.14’te sinterlenmemiş parçaya yapılan EDS analizi neticesinde elde edilen spektrum görülmektedir. Çizelge 7.9’de ise bu spektruma ait kimyasal analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 7.13 Sinterlenmemiş parçanın farklı bölgelerindeki mikroyapı görüntüleri A) Diş üst kenarı 50X, B) Diş merkezi 350X, C) Diş dibi 350X



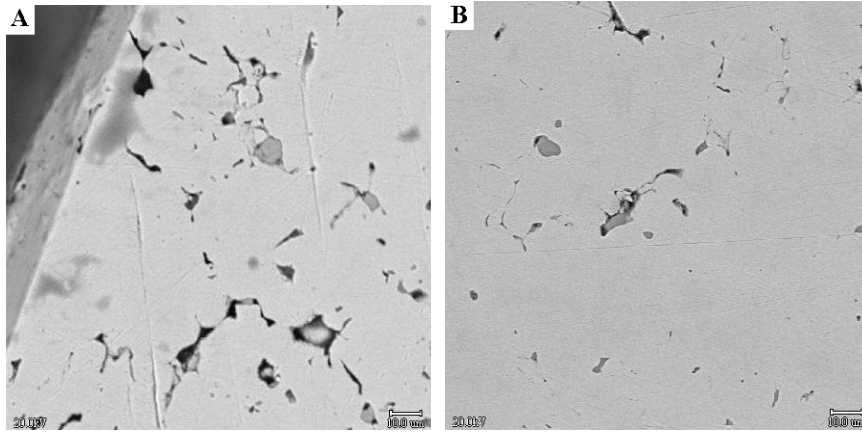
Şekil 7.14 Sinterlenmemiş parçanın EDS analiz spektrumu

Çizelge 7.9 Sinterlenmemiş parçanın EDS ile ölçülen kimyasal analiz verileri

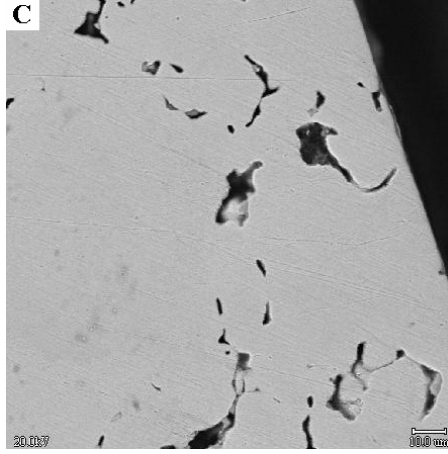
Element	Çizgi	Yoğunluk (c/s)	% Miktar
Mn	Ka	6.23	0.758
Fe	Ka	472.16	96.383
Cu	Ka	4.95	1.918

%0.2C potansiyeline sahip parçanın görüntüleri de 20kV gerilim altında alınmıştır. İncelemeler yine dışın üst kısmı, dışın merkez kısmı ve dış dibi bölgesinde yapılmıştır. %0.2C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın görüntüleri cihazın BSE modunda alınmıştır. BSE (Back Scattered Electrons) modunda geri saçılan elektronlardan faydalanılmaktadır. Şekil 7.15'te %0.2C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın SEM görüntüleri verilmiştir. Parçadaki gözenekler özellikle dışın üst ve alt kısımlarına toplanmıştır. Parçanın merkezinde gözenek miktarı daha azdır.

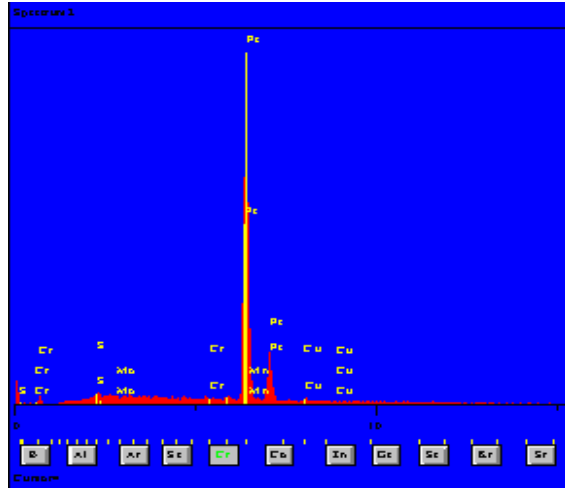
Şekil 7.16 SEM görüntüsü alınan parçanın EDS analizi sonucunda elde edilen kimyasal analiz spektrumunu göstermektedir. Çizelge 7.10 ise parçanın EDS ile ölçülen kimyasal analizinin sayısal verilerini göstermektedir. Analizde de anlaşıldığı gibi ana element Fe katkı elemanı Cu'dır.



Şekil 7.15 %0.2 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın farklı bölgelerindeki mikroyapı görüntüleri A) Dış üst kenarı 750X, B) Dış merkez bölgesi 750X



Şekil 7.15 (Devamı) %0.2 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın farklı bölgelerindeki mikroyapı görüntüleri C) Diş dibi 750X

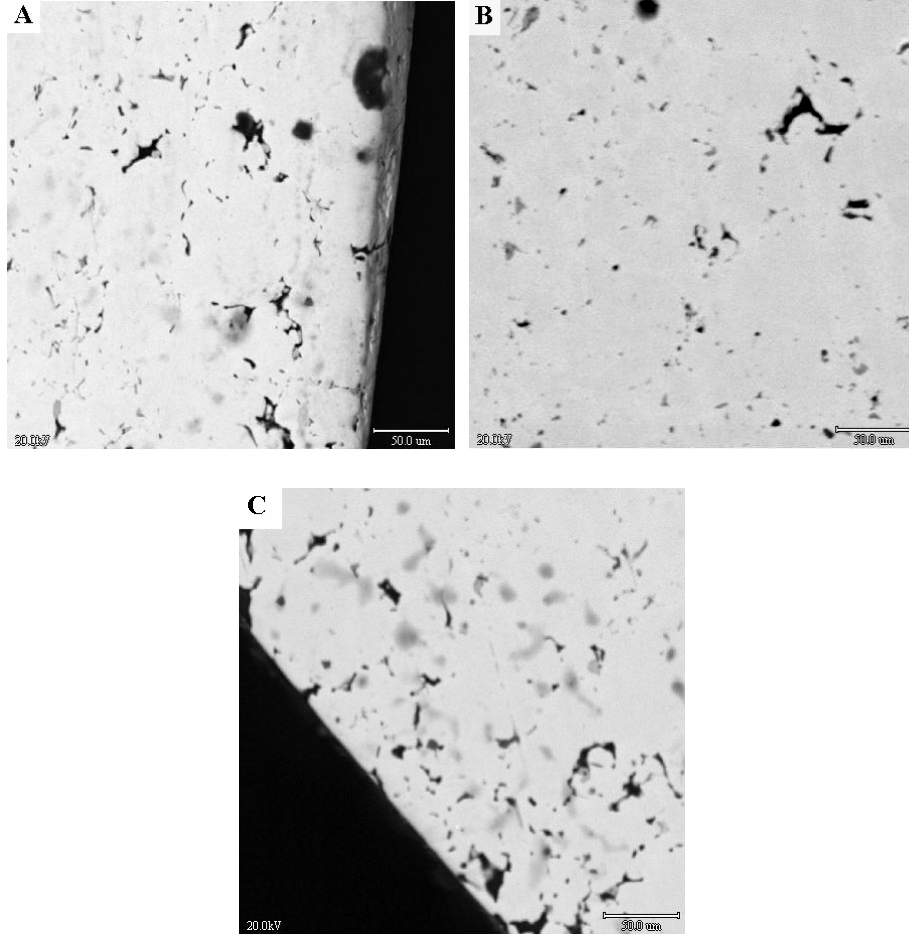


Şekil 7.16 %0.2 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın EDS analiz spektrumu

Çizelge 7.10 %0.2 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın EDS ile ölçülen kimyasal analiz verileri

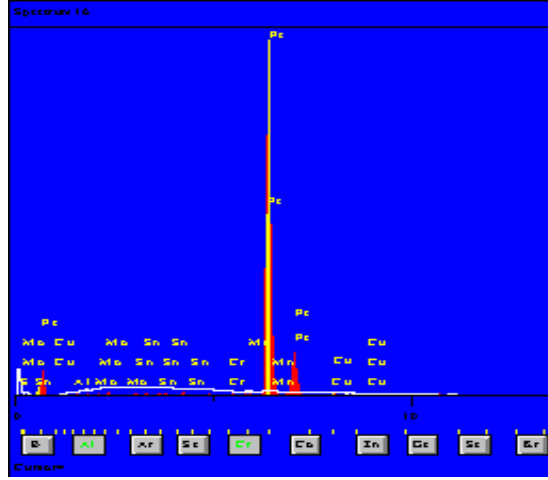
Element	Çizgi	Yoğunluk (c/s)	% Miktar
Mn	Ka	12.22	0.789
Fe	Ka	895.45	95.150
Cu	Ka	10.70	2.152

% 0.4C potansiyeline sahip parçanın görüntüleri de 20kV gerilim altında alınmıştır. İncelemeler yine dışın üst kısmı, dışın merkez kısmı ve dış dibi bölgesinde yapılmıştır. %0.4C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın görüntüleri BSE modunda alınmıştır. Şekil 7.17’de %0.4C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın SEM görüntüleri verilmiştir. Parçadaki gözenekler özellikle dışın üst ve alt kısımlarında dıştan parça kopmasna neden olacak kadar büyük boyutlarda mevcuttur. Merkezde ise daha küçük boyutlarda ancak çok miktarda gözenek mevcuttur.



Şekil 7.17 %0.4 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın farklı bölgelerindeki mikroyapı görüntüleri A) Dış üst kenarı 750X, B) Dış merkez bölgesi 750X, C) Dış dibi 750X

Şekil 7.18 SEM görüntüsü alınan parçanın EDS analizi sonucunda elde edilen kimyasal analiz spektrumunu göstermektedir. Çizelge 7.11’de ise parçanın EDS ile ölçülen kimyasal analizinin sayısal verilerini gösterilmektedir. Analizde görüldüğü gibi Cu katkı elementinin miktarı oldukça yüksektir.



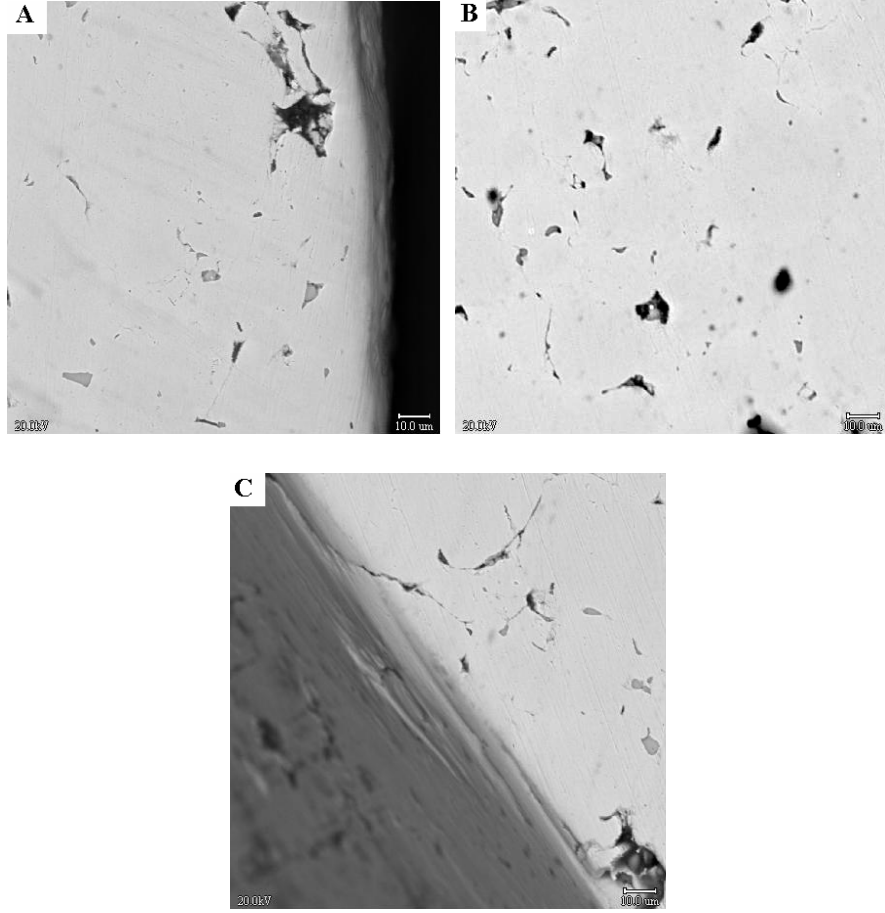
Şekil 7.18 %0.4 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın EDS analiz spektrumu

Çizelge 7.11 %0.4C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın EDS ile ölçülen kimyasal analiz verileri

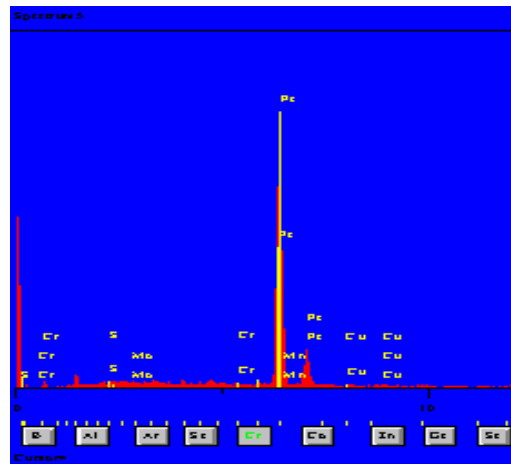
Element	Çizgi	Yoğunluk (c/s)	% Miktar
Mn	Ka	7.29	0.528
Fe	Ka	803.14	96.551
Cu	Ka	6.10	1.389

%0.6C potansiyeline sahip parçanın görüntüleri de 20kV gerilim altında alınmıştır. İncelemeler yine dışın üst kısmı, dışın merkez kısmı ve dış dibi bölgesinde yapılmıştır. %0.6C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın görüntüleri BSE ve Compo modunda alınmıştır. Şekil 7.19'da %0.6C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde gözeneklerin miktarı oldukça azdır. Parçanın üst kısmında ve alt kısmında orta boyutlu gözenekler mevcut olup merkezdeki gözenekler diğer parçalara göre daha azdır. Parçada sinterleme işleminin etkisinin ne kadar iyi olduğu görülmektedir. Şekil 7.19'da A Compo, B ve C'de ise BSE modunda görüntü alınmıştır.

Şekil 7.20 SEM görüntüsü alınan parçanın EDS analizi sonucunda elde edilen kimyasal analiz spektrumunu göstermektedir. Çizelge 7.12 ise parçanın EDS ile ölçülen kimyasal analizinin sayısal verilerini göstermektedir.



Şekil 7.19 %0.6 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın farklı bölgelerindeki mikroyapı görüntüleri A) Diş üst kenarı 750X (Compo), B) Diş merkez bölgesi 750X (BSE), C) Diş dibi 750X (BSE)

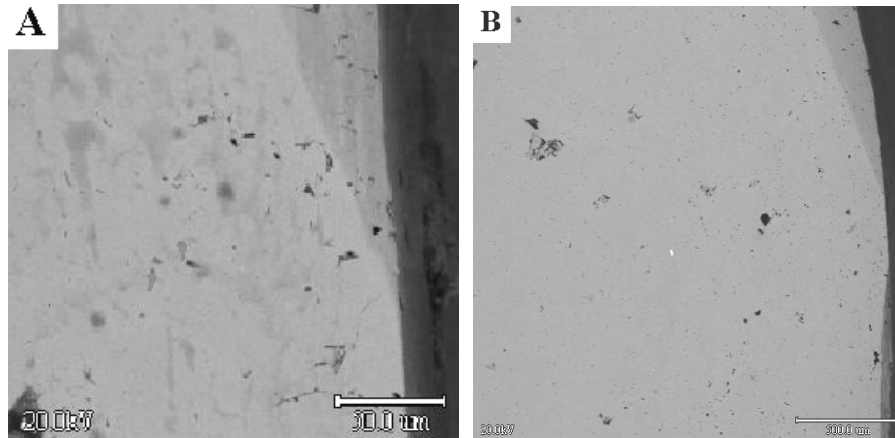


Şekil 7.20 %0.6 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın EDS analiz spektrumu

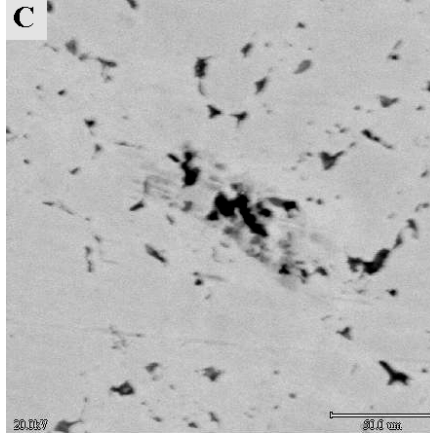
Çizelge 7.12 %0.6C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın EDS ile ölçülen kimyasal analiz verileri

Element	Çizgi	Yoğunluk(c/s)	% Miktar
Fe	Ka	246.71	95.627
Cu	Ka	3.04	2.233
Mn	Ka	2.54	0.595

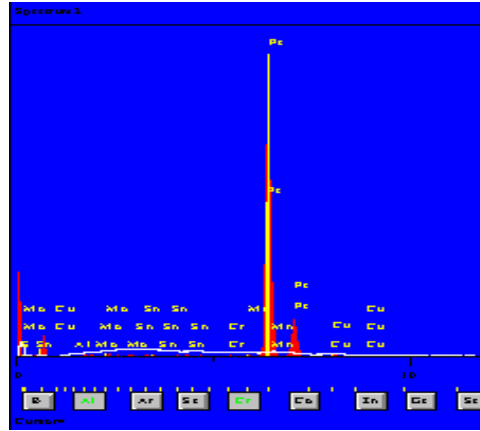
%0.8C potansiyeline sahip parçanın görüntüleri de 20kV gerilim altında alınmıştır. İncelemeler dışın üst kısmı ve dışın merkez kısmında yapılmıştır. %0.8C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın görüntüleri Compo modunda alınmıştır. Şekil 7.21’de %0.8C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın SEM görüntüleri verilmiştir. Gözeneklerin miktarı fazla ancak küçük boyutludur. Parçanın merkezinde büyük boyutlarda gözenekler mevcuttur. Sinterleme sırasında gözeneklerin içinde sıkışan gaz parçanın sinterlenem kabiliyetini düşürmüştür. Şekil 7.22 SEM görüntüsü alınan parçanın EDS analizi sonucunda elde edilen kimyasal analiz spektrumunu göstermektedir. Çizelge 7.13 ise parçanın EDS ile ölçülen kimyasal analizinin sayısal verilerini göstermektedir.



Şekil 7.21 %0.8 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın farklı bölgelerindeki mikroyapı görüntüleri A) Dış üst kenarı 750X, B)Dış üst kenarı 75X



Şekil 7.21 (Devamı) %0.8 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın farklı bölgelerindeki mikroyapı görüntüleri C) Dış merkezi 750X



Şekil 7.22 %0.8 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın EDS analiz spektrumu

Çizelge 7.13 %0.8 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenmiş parçanın EDS ile ölçülen kimyasal analiz verileri

Element	Çizgi	Yoğunluk(c/s)	% Miktar
Mn	Ka	7.86	0.544
Fe	Ka	845.25	96.273
Cu	Ka	4.69	1.010

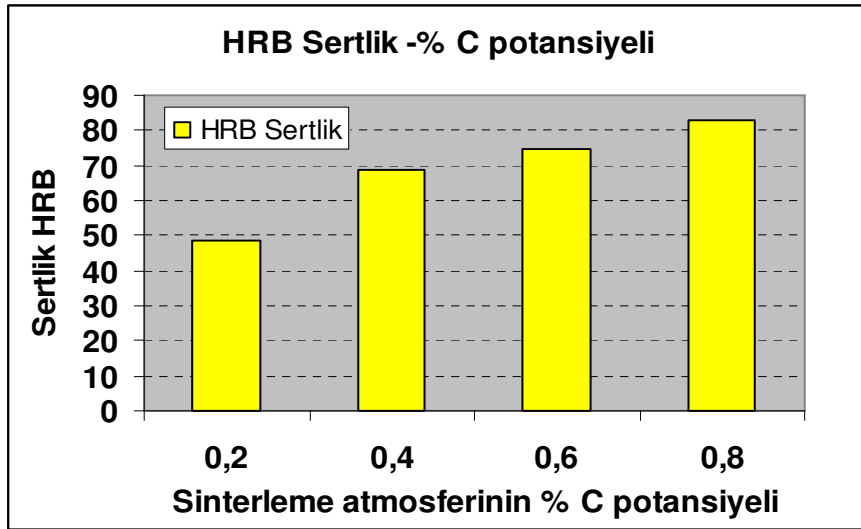
7.9 Sertlik ölçümleri

Şekil 6.11’de gösterilen bölgelere göre parça yüzeylerinden ölçülen sertlik değerleri ve her parça için hesaplanan HRB sertlik değerleri çizelge 7.14’te gösterilmektedir.

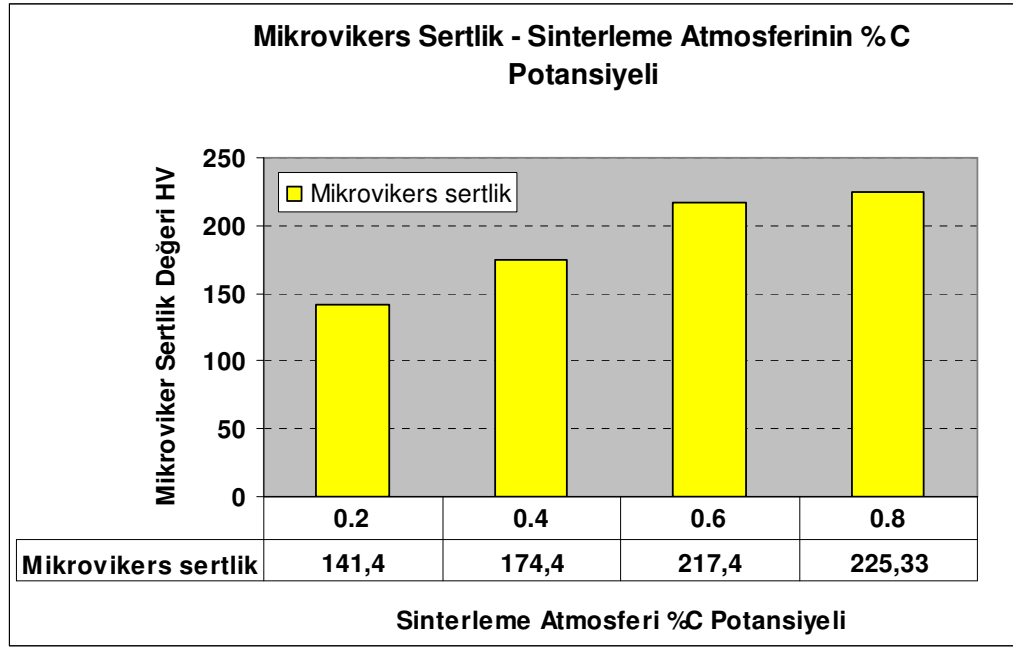
Çizelge 7.14 Bölgelere göre ölçülen sertlik değerleri ve ortalama değerler

% C Pot.	Diş dışı	Merkez	Sol kenar	Sağ kenar	Ortalama
0.2	45	53	46	51	48.75
0.4	66.5	70	66	73.5	69
0.6	75	73	76	76	75
0.8	75	96	80	80	82.75

Bu çizelgede belirtilen değerlere bağlı olarak çizilen sertlik grafiği şekil 7.23’te görülmektedir. HRB sertlik değerleri parça yüzeyinin genel sertlik değerini belirtmektedir. Çünkü sertlik ölçümü gözenek ve anafaz bölgelerine birarada uygulanmıştır.



Şekil 7.23 Sertlik(HRB) – sinterleme atmosferi %C potansiyeli



Şekil 7.24 Mikrovikers (HV) – sinterleme atmosferinin %C potansiyeli

Şekil 7.24'te parçaların anafaz bölgelerinden ölçülen mikrovikers sertlik değerlerini göstermektedir. Ölçülen mikrovikers sertlik değerleri dişli parçalarının anafaz bölgelerinin sertliğini göstermektedir. Bu değerler HRB sertlik yöntemiyle ölçülen değerleri teyit etmektedir. Sinterleme atmosferinin artan karbon potansiyeline bağlı olarak parçaların sertliği de artmaktadır.

Yapılan ölçümlerde, sinterleme atmosferinin C potansiyeli arttıkça parçaların sertlik değerlerinin arttığı da görülmüştür. Sinterleme işlemi %0.6C atmosferinin altındaki karbon değerlerinde yapıldığında parçalarda sertlik değerleri düşük çıkmıştır. Çünkü bu parçalar sinterleme esnasında dekarbürizasyona uğrayarak karbon kaybetmişlerdir.

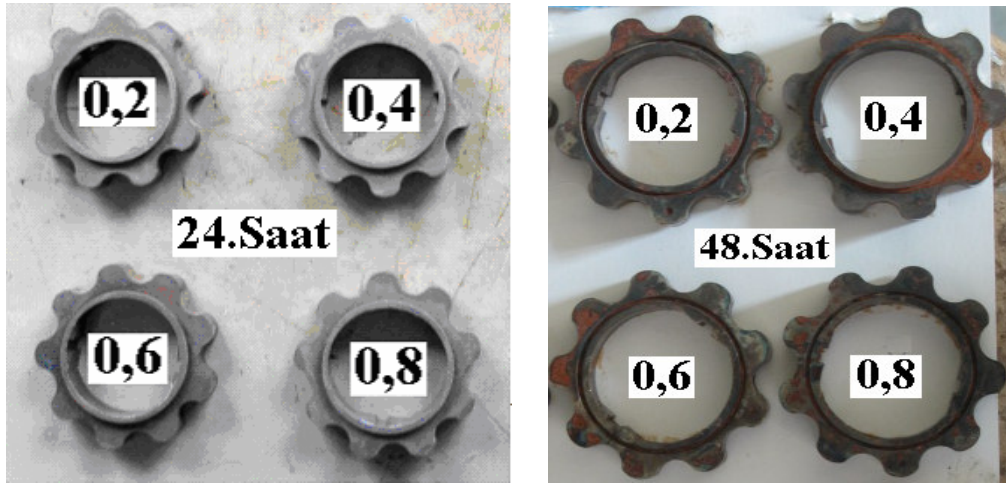
Daha yüksek karbon potansiyeline (%0.8C) sahip atmosferde sinterlenen parçada sertlik değeri en yüksek değerde ölçülmüştür. Çünkü sinterleme atmosferinin sahip olduğu karbon potansiyeli parçadan yüksek olduğundan parça karbürizasyona uğrar ve parçanın C miktarı artar. Parçanın karbürizasyona uğraması için yeterli sinterleme sıcaklığı ve süresi mevcuttur. Parçanın karbon miktarının arttığı optik emisyon spektrometresi ile yapılan kimyasal analiz sonucunda da belirlenmiştir.

7.10 Korozyon Deneyi

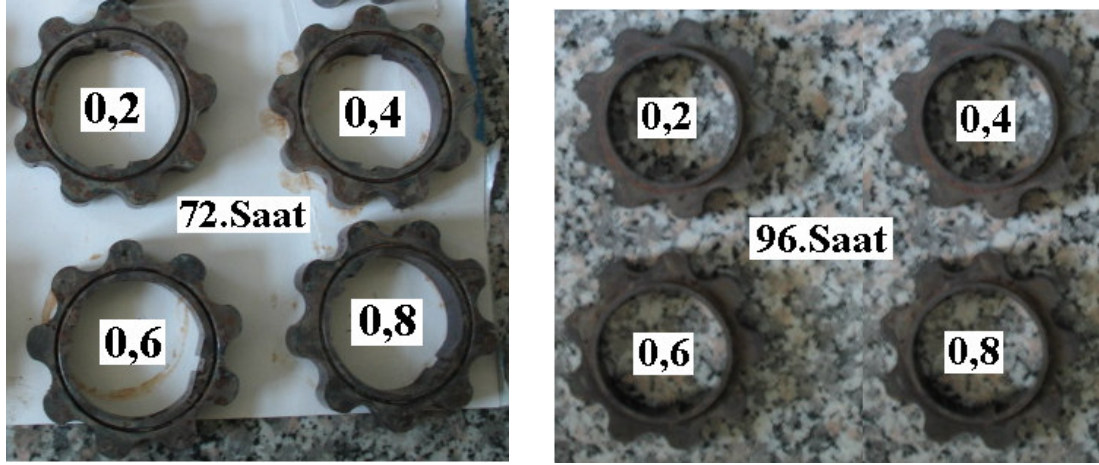
Korozyon deneyi iç rotor dişlilerinin tek dişlerine değil tüm parçaya uygulanmıştır. Deney öncesinde ölçülen parça ağırlıkları (M_0) çizelge 7.15'te görülmektedir. Deney süresince her 24 saatte bir ağırlığı ölçülmek üzere düzeneğe çıkarılan parçaların görüntüleri şekil 7.25'te görülmektedir. Deneyin sürdüğü 96 saat boyunca sadece %0.2C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenen parçada 72.saatten sonra korozyona uğrama eğilimi görülmüştür. Diğer karbon atmosferlerinde sinterlenen parçalarda deneyin sonlandırıldığı 96.saatin sonuna kadar herhangi bir korozyona uğrama ile karşılaşmamıştır. Tüm parçalarda deney süresince ağırlık artışı görülmüştür.

Çizelge 7.15 Korozyon deneyi öncesi ölçülen parça ağırlıkları

C Potansiyeli	% 0.2 C	% 0.4 C	% 0.6 C	% 0.8 C
M_0 (gr)	142.04	142.51	142.319	142.432

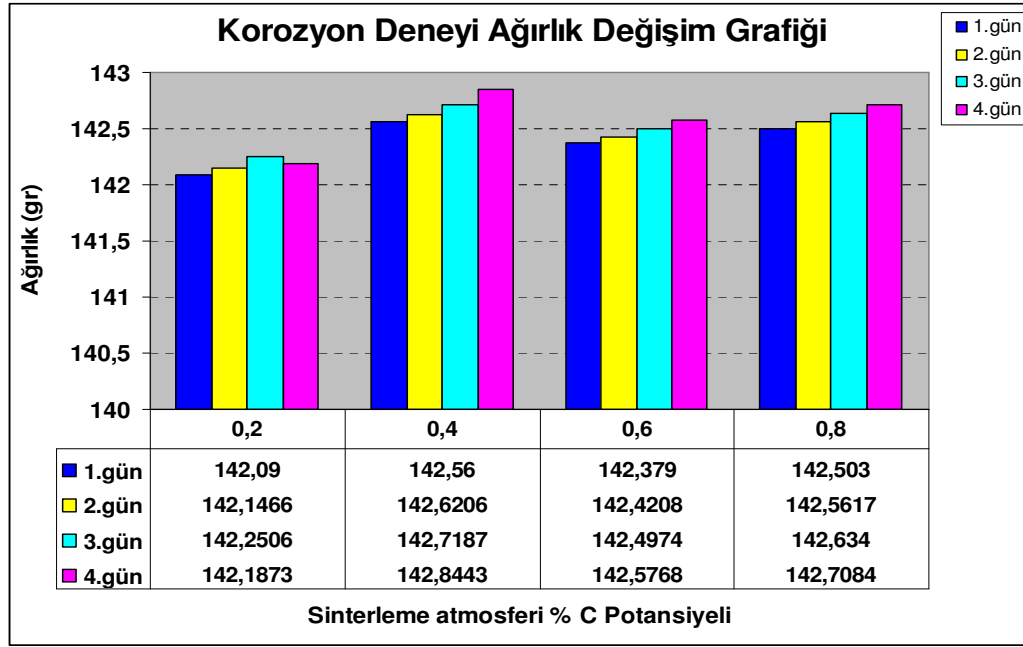


Şekil 7.25 24. ve 48. saat sonunda parçaların fotoğrafları



Şekil 7.25 (Devamı) 72. ve 96. saat sonunda parçaların fotoğrafları

İlk ağırlık ölçümü sonrasında parçalar çözeltiye konulmuştur. 24 saat sonra çözeltiden çıkartılıp kurutulan parçaların ağırlıkları tekrar ölçülmüştür. 24 saat sonraki ölçüm 1.gün, 48 saat sonraki ölçüm 2.gün, 72 saat sonraki ölçüm 3.gün, 96 saat sonraki ölçüm 4.gün olarak adlandırılmıştır. Her parça için ölçülen ağırlık değerleri ve ağırlık değişimlerini gösteren grafik şekil 7.26'de görülmektedir. Bu grafikte görüldüğü gibi %0.2 C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenen iç rotor parçasında ağırlık 72.saatın sonuna kadar artmakta ancak 96.saat sonunda parçanın ağırlık kaybettiği tespit edilmiştir. 96.saat sonrasındaki ağırlık 48. saat sonrasındaki ağırlıktan büyüktür. Buradan şu sonuca varılabilir; 72.saat sonuna kadar parça yüzeyinde ve gözenekler içinde oksitler oluşmakta ancak 72-96.saat arasında parça yüzeyinden oksit kaybetmeye başlamıştır. Söz konusu parçanın gözenek yapısı ve dekarburizasyon nedeniyle parçanın korozyon dayanımının azaldığı söylenebilir. Diğer farklı karbon potansiyeline sahip parçalarda korozyon deneyi boyunca ağırlık azalması görülmediğinden parçaların korozyona uğrama hızı hesaplanmamıştır. Sadece %0.2C potansiyelinde sinterlenen parça için korozyon hızı hesaplanmış olup hesaplanan değer çizelge 7.16'da görülmektedir.



Şekil 7.26 Korozyon deneyi boyunca ölçülen ağırlıklara bağlı grafik

Çizelge 7.16 Korozyon hızı

Atmosfer %C Potansiyeli	K	ΔG (gr)	t (saat)	$A(\text{cm}^2)$	$\rho(\text{gr/cm}^3)$	$H(\text{mdd})$
0.2	$2,4 \cdot 10^6 \cdot \rho$	0.0663	24	88.6	7.08	71.44

%0.2C atmosferinde sinterlenen parça diğer atmosferlerde sinterlenen parçalara göre daha yüksek oranda dekarbürizasyona uğradığı için bu parçanın korozyona uğrama hızı da yüksek değerdedir.

7.11 Aşınma Deneyi

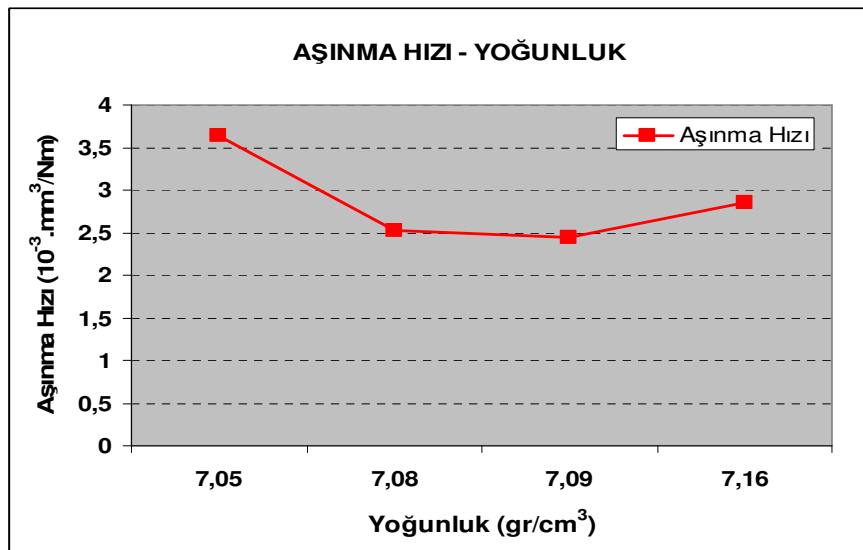
Aşınma deneyi sonunda her parça için eşitlik (6.6) kullanılarak ortalama aşınma hızı hesaplanmıştır. Hesaplanan aşınma hızı değerleri ve şekil 7.27 ve şekil 7.28'deki grafiklerin çiziminde kullanılan parçalara ait yoğunluk ve sertlik değerler çizelge 7.17'de görülmektedir.

Çizelge 7.17 Aşınma deneyi grafik verileri

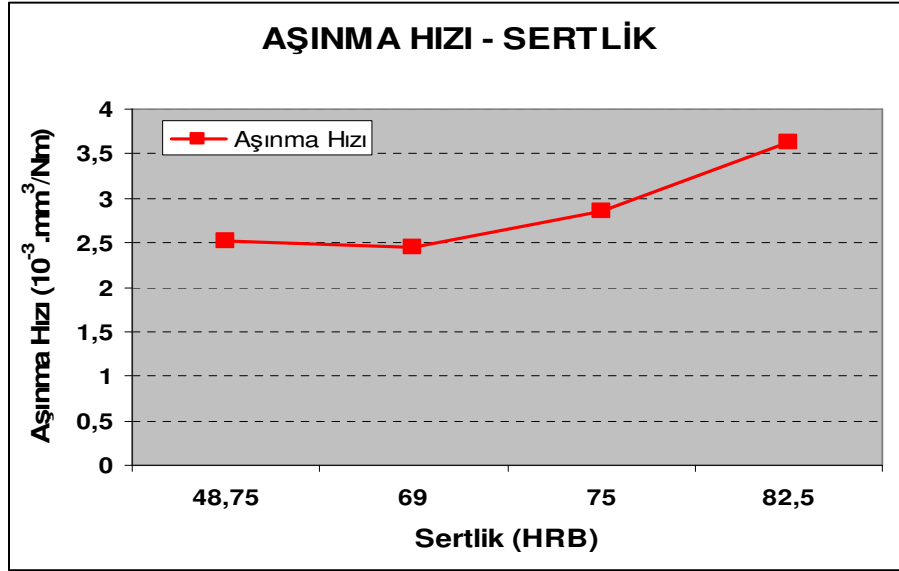
Numune no	2	4	6	8
Yoğunluk (gr/cm ³)	7.08	7.09	7.16	7.05
Sertlik (HRB)	48.75	69	75	82.5
Ortalama Aşınma Hızı 10 ⁻³ mm ³ /Nm	2.51716	2.445272	2.852825	3.637064

Şekil 7.27 ve 7.28 aşınma deneyi sonrasında çizilen grafikleri göstermektedir. Şekil 7.27'deki grafikte aşınma hızı yoğunluğun fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekil 7.28'deki grafikte ise aşınma hızı sertliğin fonksiyonu olarak çizilmiştir

Şekil 7.27 incelendiğinde yoğunluğu en düşük olan %0.8C atmosferinde sinterlenen parçanın en çok aşındığı görülmektedir. Şekil 7.28 incelendiğinde de sertliği en yüksek olan %0.8C atmosferinde sinterlenen parçanın en çok aşındığı görülmektedir. Bu parça sertliği yüksek olmasına rağmen çok fazla hacimsel gözenek içerdiğinden aşınma miktarı fazladır. Ayrıca yapılan mikroyapı incelemeleri neticesinde %0.8C atmosferinde sinterlenen parçada kırılabilirliğe neden olan Widmanstätten yapı gözlenmiştir. Bu yapının varlığı nedeniyle parçanın aşınma dayanımı düşmektedir. Benzer durum %0.6C potansiyelinde sinterlenen parçada da mevcuttur.



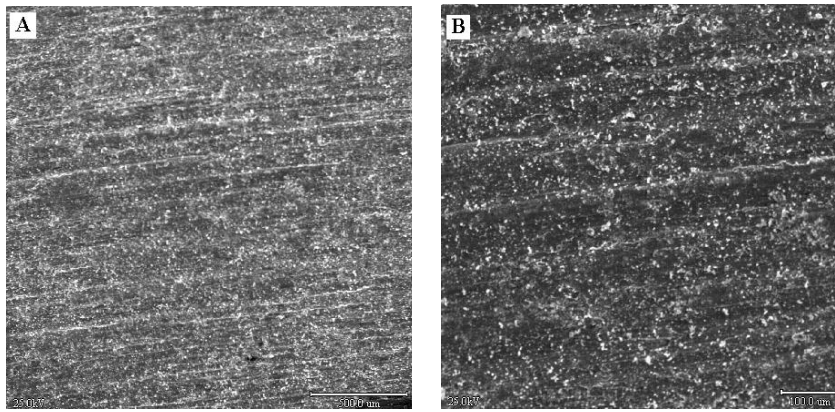
Şekil 7.27 Aşınma hızının yoğunluk değerine bağlı değişimi



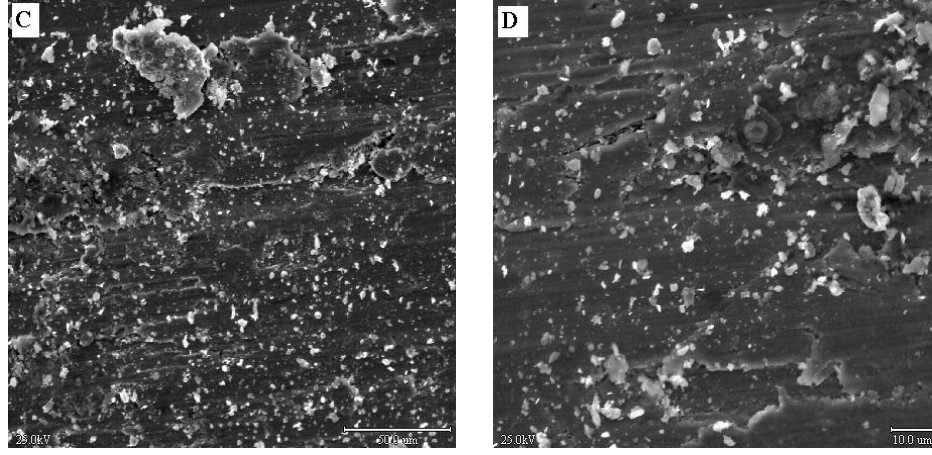
Şekil 7.28 Aşınma hızının sertlik değerine bağlı değişimi

Aşınma deneyinden sonra deneye tabi tutulan silindirik parçaların aşınmaya maruz kalan temas yüzeylerinin tarama elektron mikroskopunda mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir. Mikroyapı görüntüleri 25kV'luk gerilimde, 50 – 150 – 500 - 1000X büyütmelerde çekilmiştir. Aşınma numunelerine ait mikroyapı görüntüleri şekil 7.29, 7.30, 7.31, 7.32'de görülmektedir.

Şekil 7.29'te %0.2 C atmosferinde sinterlenen parçanın aşınma deneyi sonrasında çekilen mikroyapı fotoğraflarını göstermektedir. Özellikle 1000X büyütme çekilen mikroyapı fotoğrafında aşınarak kopan ve yüzey üzerinde kalan parçacıklar rahatça görülebilmektedir. Fotoğraflarda beyaz renkle görülen kısımlar Cu içermektedir.

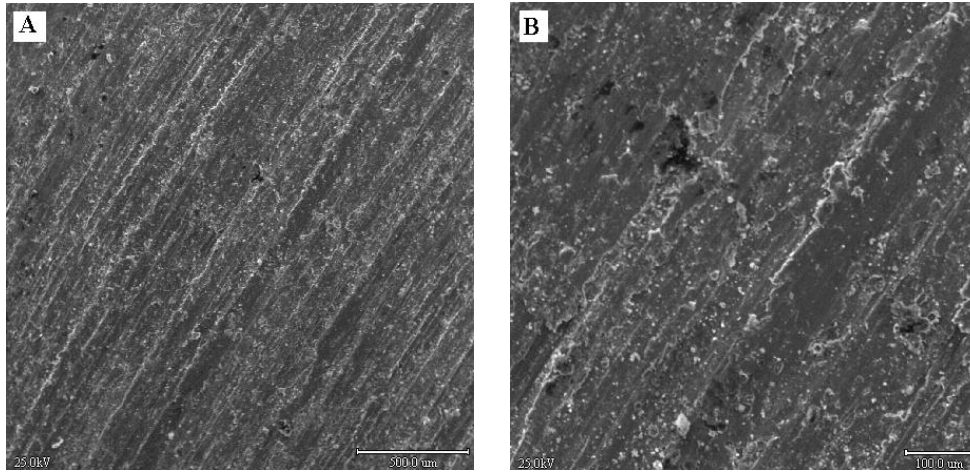


Şekil 7.29 %0.2 C atmosferinde sinterlenen parçanın aşınma mikroyapıları A) 50X, B)150X,

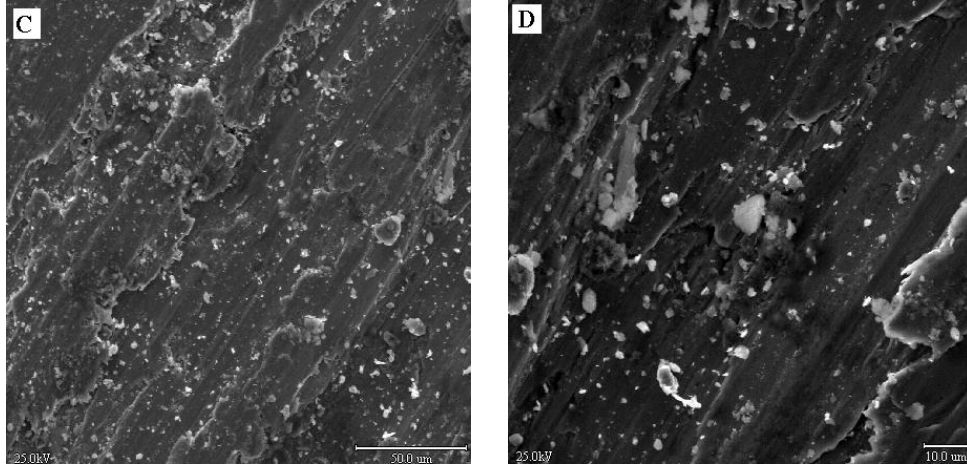


Şekil 7.29 (Devamı) %0.2 C atmosferinde sinterlenen parçanın aşınma mikroyapıları C)500X, D)1000X

Şekil 7.30'da %0.4 C atmosferinde sinterlenen parçanın aşınma deneyi sonrasında çekilen mikroyapı fotoğraflarını göstermektedir. Özellikle 1000X büyütme çekilen mikroyapı fotoğrafında aşınarak kopan ve yüzey üzerinde kalan parçacıklar rahatça görülebilmektedir. Fotoğraflarda beyaz renkle görülen kısımlar Cu içermektedir.

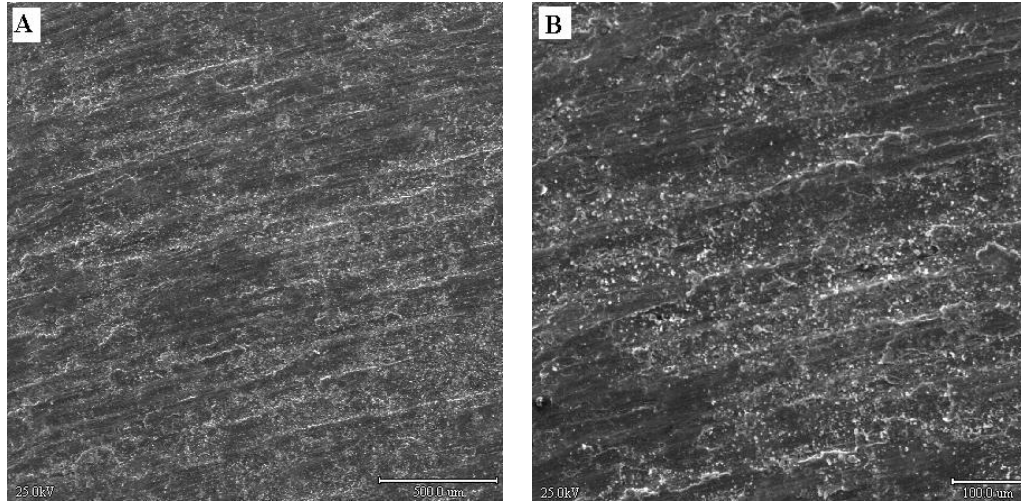


Şekil 7.30 %0.4 C atmosferinde sinterlenen parçanın aşınma mikroyapıları A)50X, B)150X

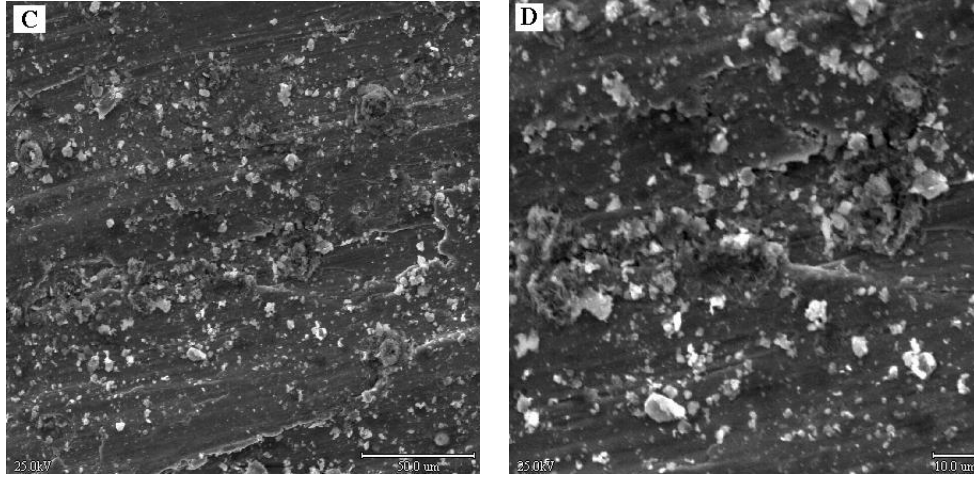


Şekil 7.30 (Devamı) %0.4 C atmosferinde sinterlenen parçanın aşınma mikroyapıları C)500X
D)1000X

Şekil 7.31’de %0.6 C atmosferinde sinterlenen parçanın aşınma deneyi sonrasında çekilen mikroyapı fotoğraflarını göstermektedir. Özellikle 1000X büyütme çekilen mikroyapı fotoğrafında aşınarak kopan ve yüzey üzerinde kalan parçacıklar rahatça görülebilmektedir. Fotoğraflarda beyaz renkle görülen kısımlar Cu içermektedir.

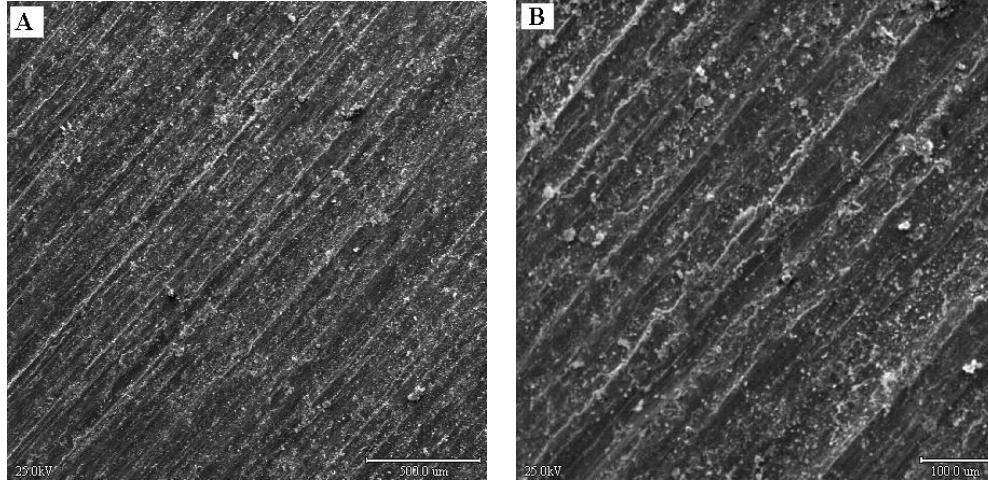


Şekil 7.31 %0.6 C atmosferinde sinterlenen parçanın aşınma mikroyapıları A) 50X,
B)150X

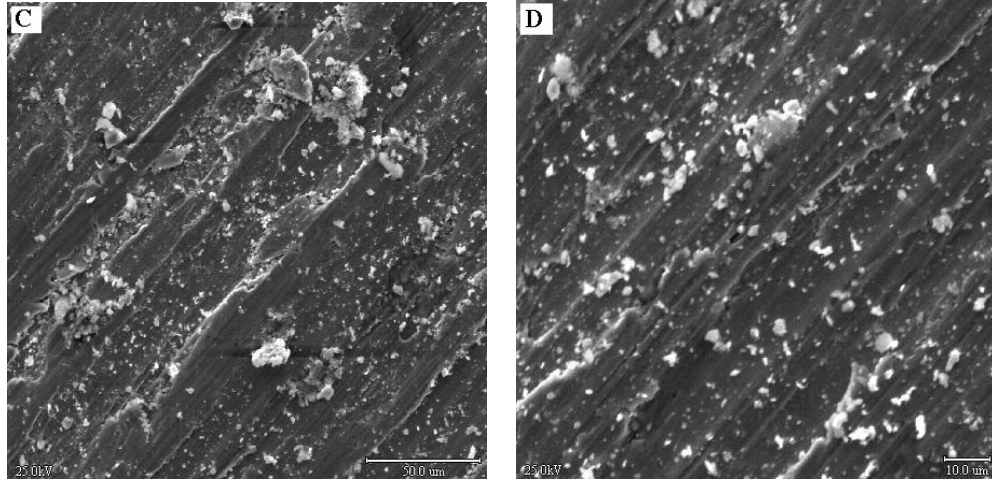


Şekil 7.31 (Devamı) %0.6 C atmosferinde sinterlenen parçanın aşınma mikroyapıları C)500X
D)1000X

Şekil 7.32'de %0.8 C atmosferinde sinterlenen parçanın aşınma deneyi sonrasında çekilen mikroyapı fotoğraflarını göstermektedir. Özellikle 1000X büyütme çekilen mikroyapı fotoğrafında aşınarak kopan ve yüzey üzerinde kalan parçacıklar rahatça görülebilmektedir. Fotoğraflarda beyaz renkle görülen kısımlar Cu içermektedir.



Şekil 7.32 %0.8 C atmosferinde sinterlenen parçanın aşınma mikroyapıları A)50X,
B)150X



Şekil 7.32 (Devamı) %0.8 C atmosferinde sinterlenen parçanın aşınma mikroyapıları C)500X, D)1000X

Parçalara uygulanan aşınma deneyleri ön çalışma olup; bu konudaki deneysel çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmada verilen aşınma deney verileri Aralık 2007 tarihine kadar olan deneyleri içermektedir. Aşınma deneyine ait ayrıntılı sonuçlar Haziran 2008 tarihinde Amerika Birleşik Devletlerin’de düzenlenecek olan PM 2008 konferansında yayınlanacaktır.

8. GENEL SONUÇLAR ve GELECEK ÇALIŞMALAR

TOZ METAL A.Ş firmasının talebi üzerine gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında firma tarafından sağlanan otomotiv yağ pompası iç rotor dişli parçaları çeşitli deneylere tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler neticesinde farklı karbon potansiyeline sahip atmosferlerde sinterlenen bu parçaların fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri hakkında sonuçlara ulaşılmıştır. Deneysel çalışmada parçaların üretiminde kullanılan toz tanelerinden de örnek alınarak gerekli deneyler gerçekleştirilmiştir.

Çalışmamıza öncelikle üretimde kullanılan toz tanelerine sırasıyla elek analizi, akışkanlık testi, görünür yoğunluk testi, tarama elektron mikroskobunda görüntü analizi ve kimyasal analiz uygulanmıştır.

- Elek analizi sonucunda üretimde kullanılan toz partiküllerinin tane boyutu (d_{0}) 0.0879 mm hesaplanmıştır.
- Akışkanlık testi sonucunda toz partiküllerinin akış hızı 30 saniye ölçülmüştür.
- Görünür yoğunluk testi sonucunda toz partiküllerinin hesaplanan yoğunluk değeri 3.476 gr/cm^3 tür.
- EDS programında uygulanan kimyasal analiz neticesinde toz partiküllerinin bünyesinde Mn ve Cu alaşım elementleri ile yüksek oranda Fe elementi tespit edilmiştir.

Firma tarafından tedarik edilen ve bu çalışmada kullanılmak üzere farklı karbon potansiyeline sahip atmosferlerde sinterlenen yağ pompası iç rotor dişlilerine gerekli deneylerin uygulanabilmesi için öncelikle iç rotor parçalarından mekanik testere yardımıyla diş çıkartılmıştır. Çıkartılan dişlere sırasıyla uygulanan deneyler şunlardır; yoğunluk tayini, metalografik hazırlık, görüntü analiz cihazı ile yüzeysel porozite tayini, kimyasal analiz, tarama elektron mikroskobu analizleri, sertlik ölçümü, korozyon deneyi, aşınma deneyi. Bu deneylerden sertlik ölçümü, korozyon ve aşınma deneyleri sinterlenmemiş parçaya uygulanmamıştır. Çünkü sinterlenmemiş parça bu deneyler için gerekli dayanım koşullarına sahip değildir.

- Parçalara ait hesaplanan yoğunluk değerleri çizelge 7.5'te ve şekil 7.3'de görülmektedir. Deney sonunda en yüksek yoğunluk değeri olan 7.16 gr/cm^3 'e sahip parçanın %0.6C atmosferinde sinterlenen parça olduğu anlaşılmıştır.

Yoğunluk deneyi sonunda sinterlenen parçalar içinde en düşük yoğunluk değeri olan $7,05 \text{ gr/cm}^3$ 'e sahip olan parçanın %0.8 karbon atmosferinde sinterlenen parça olduğu belirlenmiştir.

- Yağ pompası iç rotor dişlerine uyguladığımız görüntü analizi ile parçaların yüzeysel gözenek değerlerini ölçme imkânımız olmuştur. Ölçümlerin sonuçları çizelge 7.6'da görülmektedir. Ayrıca yüzeysel gözenekliliğin tam olarak anlaşılabilmesi için yüzey görüntüleri de alınmıştır. Bu görüntüler şekil 7.4, 7.5, 7.6, 7.7 ve 7.8'de görülmektedir. Görüntülerde de net şekilde en fazla ve büyük gözeneklerin sinterlenmemiş parçada olduğu görülür. Ayrıca şekil 7.9, 7.10, 7.11 ve 7.12'de parçaları dağlandıktan sonra alınan görüntüleri mevcuttur. Bu görüntülerde net şekilde mikroyapı içindeki Widmanstatten yapısı görülmektedir.
- Toz metalurjik olarak üretilen parçalarda hacimsel gözeneklilik daha büyük önem taşımaktadır. Her parça için hesaplanan hacimsel gözeneklilik değeri çizelge 7.7'de gösterilmiştir. Bu çizelgeye bakıldığında sinterlenen parçalar içinde en düşük hacimsel gözenekliliğe sahip parçanın %0.6 karbon atmosferinde sinterlenen parça olduğu görülür. Sinterlenen parçalar içinde en yüksek hacimsel gözeneklilik %0.8C atmosferinde sinterlenen parçada görülür.
- Optik emisyon spektrometresi ile parçalara uygulanan kimyasal analiz sonuçları çizelge 7.8'de görülmektedir. Analiz sonuçlarında parçalardaki ana elementin Fe ve katkı elementinin Cu olduğu görülmüştür.
- Monte malzemesinden çıkartılarak yüzeyi iyice parlatılan diş parçaları tarama elektron mikroskobunda 2 tür analize tabi tutulmuştur. Diş parçaların öncelikle mikroyapı analizi alınarak parçaların mikroyapısında yer alan fazlar tespit edilmiştir. Parçalardan alınan mikroyapı görüntüleri şekil 7.13, 7.15, 7.17, 7.19 ve 7.21'de görülmektedir.
- Görüntüleri alınan parçalara EDS programı ile kimyasal analiz uygulanarak mikroyapının kimyasal durumu anlaşılmıştır. Analiz sonuçları çizelge 7.14, 7.16, 7.18, 7.20 ve 7.22'de görülmektedir.
- Diş parçalarına uygulanan HRB sertlik deney sonuçları çizelge 7.14 ve şekil 7.23'te grafik halinde görülebilir. Şekil 7.24'te ise anafaz sertliğini gösteren mikrovickers sertlik grafiği görülebilir. Yapılan ölçümlerde en yüksek sertlik

değerine sahip parçanın %0.8C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenen parça olduğu görülmüştür. En düşük sertlik değeri %0.2C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenen parçada ölçülmüştür.

- Korozyon deneyi neticesinde 96 saat boyunca sadece %0.2 karbon potansiyeline sahip atmosferde sinterlenen parçada 72.saatten sonra korozyona uğrama eğilimi görülmüştür. Tüm parçalarda deney süresince ağırlık artışı görülmüştür.
- Korozyon deneyi esnasında parçalarda meydana gelen ağırlık değişimi şekil 7.26'daki grafikte görülmektedir. En fazla ağırlık artışı %0.4C ve %0.8C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenen parçalarda görülmüştür. En az ağırlık artışı ise %0.6C atmosferinde sinterlenen parçada görülmüştür.
- Aşınma deneyi sırasında tüm parçalarda abrasiv aşınma görülmüştür. En çok aşınma, yoğunluğu en düşük ancak sertliği en yüksek olan %0.8C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenen parçada ölçülmüştür. Yoğunluğu en yüksek olan %0.6C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenen parça ise ikinci en çok aşınmanın ölçüldüğü parçadır. Bu parçalarda mevcut olan Widmanstatten yapı, parçaların aşınma dayanımını azaltarak aşınma hızının yüksek değerlerde olmasına neden olmuştur. Aşınma deneyi sonucunda her parça için hesaplanan ortalama aşınma hızı değeri çizelge 7.17'de görülmektedir.
- Eğer iç rotor parçası kullanılacağı yerde aşınmaya maruz kalmayacaksa diğer tüm deneylerde en iyi sonuçları veren %0.6C potansiyeline sahip atmosferde sinterlenen parça tercih edilmelidir.
- Uygulanan çalışmada sadece sinterleme atmosferinin karbon potansiyeli değiştirilmiştir. Bu çalışma daha değişik koşullarda da uygulanabilir.
 1. Sinterleme atmosferinin karbon potansiyeli sabit tutularak sinterleme süresi vesıcaklığı değişken olabilir,
 2. Dişli parçalarının kırılğan olmasına neden olan Widmanstatten yapının giderilmesi için sinterleme sonrası soğutma hızı değiştirilebilir.
 3. Sinterleme atmosferi azot atmosferi olarak değiştirilebilir,
 4. Parçaların presleme basıncı artırılarak kompakt parçadaki gözenek miktarı düşürülebilir.

KAYNAKLAR

- Baksan, B., Gürlü R., (2003), Toz Metalurjisinin Savunma Sanayisinde Uygulanması, Osmangazi Üniversitesi, Metalurji Enstitüsü, Eskişehir
- Bakkaloğlu, A., (2000), Toz Metalurjisi Ders Notları; 44
- Babacan, E., (2007), Bakır Esaslı Toz Metalurjik Balata Malzemesinin Üretimi, Lisans Tezi, YTÜ Kimya Metalurji Fakültesi (yayımlanmamış), 42-51
- Boz.M.,(1999), “Toz Metalurjisi ile Üretilmiş Bronz Esaslı Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Gazi Üniversitesi, FenBilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi ; 60-85
- Ekşi, A., (1996) Metal Tozu Üretim Teknikleri, Endüstriyel Teknoloji , Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Ankara, 2:2
- Ersümer, A., (1970), Toz Metalurjisi Sert Metal Sinterleme, İTÜ Matbaası, İstanbul; 35-50
- German, R.M., (1997), Powder Metallurgy Science, Metal Powder Industries Federation, Powder Metallurgy, 28-30; 242-246
- Kara, H., Çelebi, İ.M., Aslanoğlu, Z., Öveçoğlu, M.L., (1995) “Elementel Volfram ve Karbon Tozlarının Mekanik Alaşımlama, Sinterleme Süreçleri ve Karakterizasyonu”, 8. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 6-9 Haz.1995, İstanbul ; 607-613
- Kurt, A., (1992), Toz Metal Bronz Yatak Malzemelerin Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (yayımlanmamış); 20-55
- Lawley, A.ve Apelian, D., (1990) Process Control in Powder Metallurgy: Advances in Powder Metallurgy, Metal Powder Industries Federation, Princeton, N.J., 3:6
- Metals Handbook, (1998) Volume 7, Powder Metallurgy; 14-19, 79-82, 214-215, 272-275, 278-279, 286, 339-345, 360-366, 617-620,
- MPIF, (2006), Standard Test Methods for Metal Powders and Powder Metallurgy Products
- Öveçoğlu, M.L., (1997) “Toz Metalurjisi Tarihsel Gelişim, Üretim Aşamaları ve Yeni Eğilimler”,9.Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 11-15 Haz.1997, İstanbul; 449-470
- Ranganathan, G; Hill, S, (2004), “Wear Characterization of small PM Rotors and Oil Pump Bearings”, Tribology International, 37:1-9
- Sözen, M., (2006), Toz Metalurjisinin Otomotiv Endüstrisindeki Yeri, Lisans Tezi,YTÜ Kimya Metalurji Fakültesi (yayımlanmamış), 32-46
- Uygur, M. E., (1986) “ Toz metalurjisi Seminer Notları”, SEGEM, İstanbul; 5-8
- Wiberg, Ö., (1957) Högenas Iron Powder Handbook, Section E, Chapter 40, 2-17

İNTERNET KAYNAKLARI

- [1] www.mpif.org
- [2] http://www.struers.com/production_of_powder_metallurgy_parts.html
- [3] http://www.turktoz.gazi.edu.tr/ttmd_tr.html

- [4] http://www.mpif.org/other_info/student.html
- [5] www.metaldyne.com
- [6] www.corvettemuseum.com
- [7] www.ipmd.net
- [8] www.rockmetalproduct.com
- [9] www.wikipedia.com
- [10] www.metalpowderproduct.com
- [11] www.jagbits.com

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı	Zeynep Nihan Yadelı	
Doğum tarihi	03.02.1981	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1996-2000	Fenerbahçe Süper Lisesi
Lisans	2001-2005	Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Metalurji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2005 -2008	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Müh. Anabilim Dalı, Malzeme Programı