

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

139734

**TOZ METALÜRJİSİ ile ÜRETİLEN PARÇALARIN
TAHRİBATSIZ MUAYENESİ**

Fizikçi Ferhat NUTKU

**FBE Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programında
Hazırlanan**

139734

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet TOPUZ

Prof. Dr. Yılmaz TAPTIK
Prof. Dr. Cemalettin Yaman

İSTANBUL, 2003

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TOZ METALÜRJİSİNİN TARİHİ.....	2
2.1 Toz Metalürjisinin Önemi	3
3. TOZ METALÜRJİSİ İLE PARÇA ÜRETİMİ	5
3.1 Tozun Preslenmeye Hazırlanması	5
3.1.1 Toz Tane Büyüklüğünün Ölçülmesi.....	6
3.1.2 Yığılma Yoğunluğu	6
3.1.3 Akıcılık.....	8
3.1.4 Preslenebilirlik.....	8
3.1.5 Tozun Karıştırılması.....	8
3.2 Presleme	9
3.2.1 Sinterlenmemiş Toz Metalürjik Parçalarda Presleme Basıncı Yoğunluk İlişkisi .	10
3.2.2 Presleme Teknikleri.....	11
3.3 Sinterleme.....	12
3.3.1 Sinterleme Fırınları.....	13
3.4 Son İşlemler.....	14
3.5 Toz Metalürjisi Proses Örnekleri	15
4. TOZ METALÜRJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN PARÇALAR	17
4.1 Toz Metalürjik Parçaların Genel Özellikleri	17
4.2 Toz Metalürjik Parçalar	18
4.2.1 Yapısal Parçalar.....	18
4.2.2 Kendinden Yağlamalı Burçlar.....	21
4.2.3 Yüksek Gözenekli Parçalar	22
4.2.4 Yumuşak Manyetik Parçalar	23
4.2.5 Elektriksel Parçalar.....	24
4.2.6 Sert Kesici Takımlar.....	25
5. TOZ METALÜRJİK PARÇALARDA GÖRÜLEN YAYGIN HATA TİPLERİ	26
5.1 Toz Metalürjik Parçaların Boyutsal Değişimi.....	26
5.2 Kalıptan Çıkarma Çatlakları.....	28
5.3 Hetorejen Yoğunluk Dağılımı	29
5.4 Mikrolaminasyonlar	31
5.5 Yetersiz Sinterlenme	32

6.	TOZ METALÜRJİK PARÇALARA UYGULANAN TAHRİBATSIZ MUAYENELER	33
6.1	Toz Metalürjik Parçaların Boyutsal Kontrolü	33
6.2	Toz Metalürjik Parçaların Sertlik Kontrolü.....	34
6.3	Toz Metalürjik Parçaların Yoğunluk Ölçümü.....	38
6.3.1	Gözenekleri Sıvı Geçirgen Olmayan Toz Metalürjik Parçaların Yoğunluk Ölçümü	39
6.3.2	Gözenekleri Sıvı Geçirgen Olan Toz Metalürjik Parçaların Yoğunluk Ölçümü ..	40
6.3.3	Toz Metalürjik Parçalarda Gözenek Oranı ile Mekanik Özellikler Arasındaki İlişki.....	42
6.4	Toz Metalürjik Parçaların Ultrasonik Muayenesi	46
6.4.1	Preslenmiş Parçalarda Ultrasonik Dalgaların Yayılması	46
6.4.2	Sinterlenmiş Parçaların Ultrasonik Muayenesi	47
6.4.3	Toz Metalürjik Parçalarda A-Taraması	48
6.4.4	Toz Metalürjik Parçaların C-Taraması	51
6.4.5	Toz Metalürjik Parçalarda Ultrasonik Hız Ölçümü	53
6.4.6	Toz Metalürjik Parçalarda Ultrasonik Dalga Hızı ile Mekanik Özellikler Arasındaki İlişki	55
6.5	Toz Metalürjik Parçaların X-ışını Radyografisi	62
6.6	Toz Metalürjik Parçaların Sıvı Penetrasyon Muayenesi	63
6.7	Toz Metalürjik Parçaların Manyetik Parçacıklarla Muayenesi	64
6.8	Toz Metalürjik Parçaların Özdirenç Testi	67
6.9	Toz Metalürjik Parçaların Metalografik Muayenesi	71
6.9.1	Gözenek Oranının Metalografik Olarak Belirlenmesi	73
6.9.2	Toz Metalürjik Parçaların Mikrografları	74
7.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	78
7.1	Çekme Çubukları ile Yapılan Deneysel Çalışmalar	78
7.1.1	Çekme Çubuklarının Mikrografları	81
7.1.2	Çekme Çubuklarının Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri	85
7.2	İmalat Parçaları ile Yapılan Deneysel Çalışmalar	86
7.2.1	İmalat Parçalarının Mikrografları	89
8.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	95
	KAYNAKLAR.....	97
	EKLER	100
Ek 1	ISO 4505 referans gözenek mikrografları	101
	ÖZGEÇMİŞ	104

SİMGE LİSTESİ

A	Kuru numunenin havadaki kütlesi, g
A _b	Parçanın boş kısımlarının kesit alanı
A _p	Gözenek alan oranı
A _t	Parçanın toplam kesit alanı
B	Yağ emdirilmiş numunenin havadaki kütlesi, g
C	Yağ emdirilmiş numunenin ve tel düzeneğin sudaki kütlesi, g
d	Köşegen uzunluğu ortalaması, mm
D	Numunenin yoğunluğu, g/cm ³
D _{eff}	Parçanın efektif çapı
D ₁	Test tozlarında yapılan çubukların boyutsal değişimi
d _k	Hızı bilinen standart malzemede birinci arka yansıma ile n.ci arka yansıma arasındaki uzaklık, mm
d ₁	T/M parçada birinci arka yansıma ile n.ci arka yansıma arasındaki uzaklık, mm
d _s	Hızı bilinen standart malzemede birinci arka yansıma ile n.ci arka yansıma arasındaki uzaklık, mm
d _s	T/M parçada birinci arka yansıma ile n.ci arka yansıma arasındaki uzaklık, mm
D _{st}	Standart tozlardan yapılan çubukların boyutsal değişimi
D _w	Suyun numunenin daldırıldığı zamanki sıcaklıktaki yoğunluğu, g/cm ³
E	Elastiklik modülü, dyne/cm ²
E	Elektrik alanı, N/C
E	Tel düzeneğin sudaki kütlesi, g
E ₀	%100 yoğunluktaki malzemenin elastiklik modülü
F	Tel düzeneğin kütlesi sıfırlanmış, yağ emdirilmiş numunenin sudaki kütlesi
F	Uygulanan deney kuvveti, N
G	T/M parçanın kayma modülü
G ₀	%100 yoğunluktaki malzemenin kayma modülü
I	Sargıdan geçen akım, A
i	Elektrik akımı, A
J	İmalatçıdan gelen yağ emdirilmiş parçanın kütlesi, g
L _D	Kalıp boşluğunun boyu
L _m	T/M parçanın fiziksel olarak ölçülen kalınlığı, mm
L _s	Sinterlenmiş parçanın boyu
L _u	T/M parçanın ultrasonik olarak ölçülen kalınlığı, mm
m ₁	Parçanın havada ölçülen kütlesi, g
m ₂	Parçanın havada ölçülen kütlesi – parçanın suda ölçülen kütlesi
n	Toplam bileşen sayısı
N	Sargının sarım sayısı
n _k	Standart malzemede seyahat sayısı
n ₁	T/M parçada seyahat sayısı
N _p	Gözenekler ile doğruların kesişim sayısı + 1/2 x gözenekler ile doğruların teğet olarak kesişim sayısı
n _s	T/M parçada seyahat sayısı
n _t	Standart malzemede seyahat sayısı
P	Birbirine bağlı gözenek hacim oranı, %
P	Gözenek hacim oranı
P ₁	Yağ hacim oranı, %
R	Sargının iç çapı, mm
S	Gözenekleri doldurmada kullanılan yağın deney sıcaklığındaki özgül ağırlığı

t_b	Ucun içeri batma derinliği, mm
t_k	Standart malzemenin kalınlığı, mm
t_l	T/M parçanın kalınlığı, mm
t_s	T/M parçanın kalınlığı, mm
t_t	Standart malzemenin kalınlığı, mm
V_i	i. bileşenin yüzde miktarı / 100
v_k	Standart malzemede boyuna ultrasonik dalganın yayılma hızı, mm/s
V_l	Boyuna ultrasonik dalganın hızı, mm/s
v_l	Standart olarak seçilen kalibrasyon bloğunda boyuna ya da enine ultrasonik dalganın yayılma hızı
v_l	T/M parçada boyuna ultrasonik dalgaların hızı, mm/s
V_l	T/M parçada boyuna ultrasonik dalgaların yayılma hızı
V_{l0}	%100 yoğunluktaki malzemede boyuna ultrasonik dalgaların yayılma hızı
V_s	Enine ultrasonik dalganın hızı, mm/s
v_s	T/M parçada enine ultrasonik dalgaların hızı, mm/s
V_s	T/M parçada enine ultrasonik dalgaların yayılma hızı
V_{s0}	%100 yoğunluktaki malzemede enine ultrasonik dalgaların yayılma hızı
v_t	Standart malzemede enine ultrasonik dalganın yayılma hızı, mm/s
v_x	T/M parçada boyuna ya da enine ultrasonik dalganın yayılma hızı, m/s
x	Ölçeğin x eksenindeki kare sayısı
y	Ölçeğin y eksenindeki kare sayısı
v	T/M parçanın poisson oranı
v_0	%100 yoğunluktaki malzemenin poisson oranı
ρ	Özdirenç, $\Omega.m$
ρ	Toz metalürjik parçanın yoğunluğu, g/cm^3
ρ_0	Gözeneksiz malzemenin teorik yoğunluğu (%100 yoğunluk)
ρ_i	i. bileşenin yoğunluğu
ρ_l	Suyun veya kullanılan sıvının test sıcaklığındaki yoğunluğu, g/cm^3
σ	İletkenlik, $1/\Omega.m$

KISALTMA LİSTESİ

ASM	American Society for Metals
ASTM	American Society for Testing and Materials
ISO	International Organization for Standardization
SEM	Tarama elektron mikroskobu
T/M	Toz metalürjisi, toz metalürjik



Şekil 3.1	Preslenmiş demir, nikel, bakır ve volfram parçalarda presleme basıncı yoğunluk ilişkisi	11
Şekil 3.2	Sinter fırınının ısısal ve atmosferik özellikleri	13
Şekil 4.1	Toz metalürjisi ile üretilmiş çeşitli burçlar	19
Şekil 4.2	Toz metalürjisi ile üretilmiş yağ pompası dişlileri	19
Şekil 4.3	Toz dövme ile üretilmiş biyel kolları	21
Şekil 4.4	Yüksek gözenekli filtreler	23
Şekil 4.5	Yumuşak manyetik parçalar	24
Şekil 4.6	Elektrik motoru fırçaları	25
Şekil 5.1	1120°C'de sinterlenmiş, preslenmiş yoğunluğu 6.8 g/cm ³ olan üç malzemede görülen büzölmeler	27
Şekil 5.2	%0.9 grafit, %0.75 çinko stearat, içeren bakırla karıştırılmış demir tozlarının 1120°C'de 30 dakika ayrılmış amonyak ortamında sinterlenmesi sonucunda görülen boyutsal değişimleri	27
Şekil 5.3	%90 Cu - %10 Sn içeren bronzun çeşitli sıcaklıklarda, 15 dakika, hidrojen atmosferinde sinterlenmesi sonucu görülen boyutsal değişimleri	28
Şekil 5.4	Kalıptan çıkarma çatlağı	29
Şekil 5.5	Silindirik nikel parçanın yoğunluk dağılımı	30
Şekil 5.6	Presleme yöntemi ile yoğunluk arasındaki ilişki	30
Şekil 5.7	Çok basamaklı parçalarda presleme yöntemi ile yoğunluk arasındaki ilişki....	31
Şekil 5.8	Mikrolaminasyonlar.....	31
Şekil 6.1	Vickers sertlik testinde oluşan iz	37
Şekil 6.2	Yoğunluk ölçmede kullanılan düzenek	39
Şekil 6.3	Elastik büyüklüklerin gözenek hacim oranına göre değişimi.....	46
Şekil 6.4	Ultrasonik hız ölçüm cihazının şeması	48
Şekil 6.5	Ultrasonik dalgaların şiddet zaman grafiği.....	49
Şekil 6.6	A-taramasında görülen büyük gözenek veya süreksizlik	50
Şekil 6.7	Standart referans blokları.....	50
Şekil 6.8	Ultrasonik C-taramasının çalışma diyagramı	51
Şekil 6.9	Değişik miktarlarda gözenekliliğe sahip SiC plaka	52
Şekil 6.10	Doğrusal taramada yansıyan dalga enerjilerinin gözenek miktarı ile değişimi	52
Şekil 6.11	SiC plakanın C-taraması. Gri bölgeler gözenekliliğin yüksek olduğu kısımlardır.....	52
Şekil 6.12	Parçanın arka cidarından yansıyan dalgaların görüntüsü	53
Şekil 6.13	Preslenmiş ve sinterlenmiş parçaların yoğunlukları ile ultrasonik dalga yayılma hızı arasındaki ilişki	55
Şekil 6.14	İşlenmemiş MPIF Standart 10 çekme çubuğunun boyutları	56
Şekil 6.15	Ultrasonik hızın çekme dayanımı ile değişimi	57
Şekil 6.16	Ultrasonik hızın akma sınırı ile değişimi.....	58
Şekil 6.17	Değişik yüklerde kırılan parçaların ultrasonik hızları	59
Şekil 6.18	Kuvvetli burçların mikroyapısı.....	59
Şekil 6.19	Zayıf burçların mikroyapısı	59
Şekil 6.20	Eğme dayanımı ile ultrasonik hızın değişimi	60
Şekil 6.21	Eğme çubuklarında ultrasonik hızın ölçülme yönüne bağlılığı	62
Şekil 6.22	x-ışını radyografisi kullanılarak tespit edilebilecek hatalar	63
Şekil 6.23	Manyetik parçacıklarla muayene.....	64
Şekil 6.24	Sargının kenarına yerleştirilmiş parça için efektif manyetizasyon bölgesi	65
Şekil 6.25	Sargının merkezine yerleştirilmiş parça için efektif manyetizasyon bölgesi ...	65

Şekil 6.26	Özdirenç ölçümünde kullanılan prob	68
Şekil 6.27	Yapay olarak oluşturulmuş laminasyonun mikrografi	69
Şekil 6.28	Preslenmiş parçada laminasyonlarda görülen özdirenç değişimi	69
Şekil 6.29	Preslenmiş parçalarda presleme basıncı ile özdirençin değişimi	70
Şekil 6.30	Farklı basınçlarda preslenmiş parçaların, sinterleme sıcaklığı ile beraber özdirenç değişimleri	71
Şekil 6.31	Distaloy 4600 A (6.7g/cm^3), 480MPa basınç ile preslenmiş, ayrıışmış amonyak atmosferinde 1120°C 'de 15 dakika sinterlenmiş yapı	74
Şekil 6.32	Distaloy 4600 A (6.7g/cm^3), 480MPa basınç ile preslenmiş, ayrıışmış amonyak atmosferinde 1120°C 'de 37 dakika sinterlenmiş yapı	75
Şekil 6.33	Ortalama sinterlenmiş, %0.8 grafit katılmış, atomize demir tozlarından yapılmış parçanın yapısı	75
Şekil 6.34	Atomize demir tozları ile alaşımlandırılmış yapı	76
Şekil 6.35	Sinterlenmiş Fe-2Ni-0.5C karışımının mikrografi	76
Şekil 7.1	Çekme çubuklarında yoğunlukla ultrasonik hız arasındaki grafik	80
Şekil 7.2	Çekme çubuklarında gözenek oranı ile ultrasonik hız arasındaki grafik	80
Şekil 7.3	Çekme çubuklarında çekme dayanımı ile ultrasonik hız arasındaki grafik	81
Şekil 7.4	Çekme çubuklarında sertlik ile ultrasonik hız arasındaki grafik	81
Şekil 7.5	65 numaralı çekme çubuğunun mikrografi	82
Şekil 7.6	67 numaralı çekme çubuğunun mikrografi	82
Şekil 7.7	70 numaralı çekme çubuğunun mikrografi	83
Şekil 7.8	65 numaralı çekme çubuğunun mikrografi	83
Şekil 7.9	67 numaralı çekme çubuğunun mikrografi	84
Şekil 7.10	70 numaralı çekme çubuğunun mikrografi	84
Şekil 7.11	69 numaralı çekme çubuğunun kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü	85
Şekil 7.12	66 numaralı çekme çubuğunun kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü	85
Şekil 7.13	69 numaralı çekme çubuğunun kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü	86
Şekil 7.14	801 kodlu parçanın yoğunluk, ultrasonik hız grafiği	87
Şekil 7.15	801 kodlu parçanın sertlik, ultrasonik hız grafiği	87
Şekil 7.16	1004 kodlu parçanın yoğunluk, ultrasonik hız grafiği	88
Şekil 7.17	1004 kodlu parçanın sertlik, ultrasonik hız grafiği	88
Şekil 7.18	Buhar karartmalı parçanın yoğunluk, ultrasonik hız grafiği	89
Şekil 7.19	Buhar karartmalı parçanın sertlik, ultrasonik hız grafiği	89
Şekil 7.20	801-3 numaralı parçanın preslenmiş durumdaki mikrografi	90
Şekil 7.21	801-1 numaralı parçanın sinterlenmiş durumdaki mikrografi	90
Şekil 7.22	801-1 numaralı parçanın sinterlenmiş durumdaki mikrografi	91
Şekil 7.23	1004-2 numaralı parçanın sinterlenmiş durumdaki mikrografi	91
Şekil 7.24	1004-2 numaralı parçanın sinterlenmiş durumdaki mikrografi	92
Şekil 7.25	Buhar karartmalı parçanın preslenmiş durumdaki mikrografi	92
Şekil 7.26	Buhar karartmalı parçanın preslenmiş durumdaki mikrografi	93
Şekil 7.27	Buhar karartmalı parçanın preslenmiş durumdaki mikrografi	93
Şekil 7.28	Buhar karartmalı parçanın preslenmiş durumdaki mikrografi	94
Şekil Ek 1.1	Tip A görünür gözenekler	101
Şekil Ek 1.2	Tip A görünür gözenekler	102
Şekil Ek 1.3	Tip B görünür gözenekler	103

Çizelge 3.1	Toz şekilleri ve üretim yöntemleri.....	5
Çizelge 3.2	Tozların sınıflandırılmış özellikleri	5
Çizelge 3.3	Toz tane büyüklüğü ölçüm yöntemleri	6
Çizelge 3.4	Değişik büyüklükteki tozların görünür yoğunluğu.....	7
Çizelge 3.5	Tozlara katılan yağlayıcıların özellikleri	9
Çizelge 3.6	Toz metalürjik parça üretim teknikleri	14
Çizelge 3.7	Toz metalürjik parçaların üretim parametreleri	16
Çizelge 4.1	Toz metalürjik parçaların mekanik özellikleri.....	18
Çizelge 4.2	Çeşitli yapısal parçaların mekanik özellikleri	20
Çizelge 4.3	Kendinden yağlamalı burçların özellikleri	22
Çizelge 4.4	Yüksek gözenekli toz metalürjik parçaların özellikleri	23
Çizelge 4.5	Yumuşak manyetik parçaların özellikleri	24
Çizelge 5.1	Sinterleme sonrası görülen boyutsal değişimler	26
Çizelge 6.1	Eni 12.7mm'ye kadar olan parçaların en ve kalınlık toleransları.....	34
Çizelge 6.2	Toz metalürjik parçaların sertlik ölçümünde kullanılan yaygın ölçekler	35
Çizelge 6.3	Toz metalürjik parçaların standart Rockwell sertlik ölçümünde kullanılan yaygın ölçekler	36
Çizelge 6.4	Rockwell sertlik ölçümünde kullanılan formüller	36
Çizelge 6.5	Demir numunelerin üretim parametreleri ve gözenek hacim oranları.....	45
Çizelge 6.6	Mekanik özelliklerle, ölçülen ultrasonik hızlar	57
Çizelge 6.7	Toz metalürjik parçaların dağlanmasında kullanılan ayraçlar.....	73
Çizelge 7.1	Çekme çubuklarının yoğunluk, sertlik, ultrasonik hız ve çekme dayanımı değerleri	80
Çizelge 7.2	İmalat parçalarının yoğunluk, sertlik ve ultrasonik hız değerleri	86

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında beni yönlendiren ve destekleyen değerli tez danışmanım Prof. Dr. Ahmet Topuz'a, toz metalürjisini bana sevdiren Doç. Dr. Sunullah Özbek'e, malzeme yapı ve muayenesini kavramamı sağlayan Prof. Dr. Müzeyyen Marşoğlu'na, deneylerde kullanılan toz metalürjik parçaları temin etmemi sağlayan ve toz metalürjisi üretim prosesini izah eden Toz Metal A.Ş. Kalite Güvence Müdürü Cengiz Bozacı'ya ve beni her zaman destekleyen aileme teşekkürlerimi sunarım.



ÖZET

Toz metalürjisi metal ve metaldışı parçaların yapımında kullanılan bir üretim yöntemidir. Toz metalürjik parçaların tahribatsız muayenesi yapılarak üretim süreci kontrol edilebilir. Kusurlu parçalar tespit edilerek sorunun kaynağı araştırılır.

Bu çalışmada toz metalürjik parçaların üretim prosesi, özellikleri, uygulama alanları, toz metalürjik parçalarda görülebilecek hatalar ve bu hataların tespitinde kullanılan tahribatsız muayene yöntemleri özetlenmiştir. Toz Metal A.Ş.'de üretimleri gerçekleştirilen parçalar ve çekme numuneleri üzerinde yoğunluk, gözeneklik, sertlik, çekme testi, metalografik incelemeler ve ultrasonik hız ölçümleri yapılmıştır.

İmalat parçaları için ultrasonik hızla yoğunluk,sertlik; farklı sıcaklıklarda sinterlenen çekme çubukları için ultrasonik hız ile yoğunluk, gözeneklik, sertlik ve çekme dayanımı arasındaki eğriler çizilerek, seri kalite kontrol amaçlı kullanılabilecekleri gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Toz metalürjisi, tahribatsız muayeneler, ultrasonik hız ölçümü, yoğunluk, gözeneklik.

ABSTRACT

Powder metallurgy is a production method for manufacturing metal and nonmetal parts. By applying nondestructive tests to powder metallurgy parts the production process can be controlled. After detecting flawed parts, the source of the problem is investigated.

In this work, production, specification, application, flaws of powder metallurgy parts were summarized. Nondestructive test methods which are applied to powder metallurgy parts for detecting faults were described. Density, porosity, hardness, tensile strength, metallurgical investigation and ultrasonic velocity tests were applied to parts and tensile test bars which were manufactured in Toz Metal Company.

Graphics between ultrasonic velocity and density, porosity, hardness, tensile strength were drawn for tensile test bars which were sintered at different temperatures and shown that they can be used for quality control. Graphics between ultrasonic velocity and density, hardness were drawn for production parts and shown that they can be used for quality control.

Keywords: Powder metallurgy, nondestructive tests, ultrasonic velocity measurement, density, porosity.

1. GİRİŞ

Günümüzün üretim sanayisinde maliyet, verimlilik ve kalite üç önemli kavramdır. Bu kavramlar birbirleri ile ilişki içerisinde. Üretimde kalitenin sağlanması maliyeti ve verimliliği olumlu yönde etkiler. Üretimde kalitenin kontrolü için kullanılan tahribatsız muayenelerin önemi günden güne artmaktadır.

Toz metalürjisi ise 20.yy'da metalürji biliminin bir dalı olarak ortaya çıkmış ve günümüze kadar hızlı bir gelişme göstermiştir. Toz metalürjisi ile çok değişik alanlarda kullanılmak üzere parça üretilebilir. Dişliler, kendinden yağlamalı burçlar, mıknatıslar, elektrik kontakları, sert kesici takım uçları ve diğer daha birçok parça toz metalürjisi yöntemi ile üretilmektedir. Toz metalürji yönteminin birçok avantajları olduğu gibi kendine özgü bazı problemleri de vardır. Yetersiz sinterlenme, kalıptan çıkarma çatlakları, presleme biçiminden kaynaklanan yoğunluk değişimleri bunlardan bazılarıdır.

Toz metalürjik parçaların tahribatsız muayenesi ile seri üretilen parçaların hata kontrolü yapıldığı gibi üretim prosesi de kontrol altına alınmış olur. Toz metalürjisi ile parça üretiminde toz tipi, toz büyüklüğü, presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı, sinterleme süresi gibi birçok parametre vardır. Bu parametreler nihai ürünün mekanik özelliklerini doğrudan etkilerler. Üretim prosesinde, pres kalıbı dizaynından, sinterleme şartlarına kadar birçok değişken, tahribatlı ve tahribatsız muayeneler aracılığıyla kontrol edilerek, minimum maliyeti ve parçadan istenilen mekanik özellikleri sağlayacak şekilde belirlenir. Örneğin gereğinden fazla presleme basıncı veya sinterleme sıcaklığı kullanmak hem maliyeti artırır hem de hatalara yol açabilir.

Bu çalışmada toz metalürjisi ile parça üretimi, üretilen parçalar, görülen yaygın hata tipleri ve toz metalürjik parçalara uygulanan tahribatsız muayene türleri anlatılmıştır. Toz Metal A.Ş.'de üretimleri gerçekleştirilen parçalar ve çekme numuneleri üzerinde yoğunluk, gözeneklik, sertlik, çekme testi, ultrasonik hız ölçümleri ve metalografik incelemeler yapılmıştır. Yoğunluk, gözeneklik, sertlik ve çekme dayanımı değişimi ile ultrasonik dalgaların yayılma hızı arasında ilişkiler kurulmuştur. Farklı sıcaklıklarda sinterlenen çekme çubuklarının sinterleme sıcaklığına göre yoğunluk, sertlik, çekme dayanımı ve ultrasonik hız değerlerinin nasıl değiştiği incelenmiştir. Elde edilen sonuçların literatürdekilerle paralellik gösterdiği görülmüştür.

2. TOZ METALÜRJİSİNİN TARİHİ

Toz metalürjisi (T/M) metal ve metal dışı parçaların yapımında kullanılan gelişmiş bir üretim yöntemidir. Toz metalürjisinde kullanılan hammadde, metal ya da seramik tozudur. Eski Mısırlılar demir oksidi (Fe_2O_3) taş kömürü kullanarak ısıtmışlar ve hava üfleyerek indirgemişler. Bu suretle üretilen sünger demiri daha sonra çekiçlenip ufalanmış ve oluşan tozlar preslenerek birleştirilmiştir.

Toz metalürjisinin ilk ticari uygulamaları karbon, osmiyum, zirkonyum, vanadyum, tantal ve volframın akkor lamba filamanları için kullanılmasıyla gerçekleşmiştir. 1910'da Coolidge volfram tozunu presleyip, sinterleyerek malzemenin sünekliğini iyileştirmiş ve gittikçe daha düşük sıcaklıklarda tel formuna sokabilmiştir. Bu proses, orijinal şekli ile ticari ampul telleri üretiminde günümüzde de kullanılan bir yöntemdir. Volframın üretilmesi için gereken işlemler zaman içerisinde diğer refrakter metaller için de uygulanmış ve bu sayede günümüzde aydınlatma, elektronik, X-ışınları ve kimya endüstrilerinde kullanılan volfram, molibden ve tantal, toz metalürjisi teknikleri kullanılarak üretilmiştir (Öveçoğlu, 1997).

Metal işleme tekniklerinin yaygınlaşması, günümüzde yaygın olarak kesici takım uçlarında kullanılan sementit karbürlerin doğuşunu müjdelemiştir. Daha sonra sementit karbürlere en uygun metalik bağlayıcının kobalt (Co) metali olduğu bulunmuştur. Sementit karbürlerin ortaya çıkışından sonra volfram yüksek elektrik iletkenliği özelliklerine sahip bakır ve gümüş gibi düşük ergime sıcaklıklarına sahip metallerle toz metalürjisi teknikleri ile birleştirilip elektrik kontaktör ve elektrot uygulamalarında kullanılmıştır. 1920'lerde ise gözenekli bronz fırçalar seri olarak T/M yöntemi ile üretilmeye başlanmıştır. 1950'lerde kendinden yağlamalı yatakların ortaya çıkmasıyla T/M büyük tonajlarda demir ve bakır tozu kullanarak otomotiv sektörüne de hizmet etmeye başlamıştır. 1950 ve 1960'larda soğuk-sıcak izostatik presleme, toz dövme, toz ekstrüzyon yöntemleri gelişmeye başlamıştır. 1980'lerde ise hızlı katılaştırma, mekanik alaşımlandırma ve toz enjeksiyon teknikleri geliştirilmiştir (Öveçoğlu, 1997).

Son yıllardaki en önemli gelişmeler ise mekanik alaşımlama ve gaz fazından nano ölçekli toz üretme alanlarında yaşanmaktadır. Mekanik alaşımlama örneğin, kesici takım uçları için WC sentezinde, nadir toprak elementli kalıcı mıknatıs malzemesi yapımında kullanılır. Gaz fazından nanometre (10^{-9}) çapında toz üretiminde, tozu elde edilmek istenen malzeme çok yüksek vakum şartlarında eritilir ve buharlaştırılır. Daha sonra buharın hızla soğutulması sonucu oluşan kristallerinin büyümesi engellenir. Katılaşma tamamlandığında nano ölçekte tozlar elde edilir.

Nano ölçeklerdeki tozlardan geliştirilen sinter parçaların geleneksel yöntemlerle üretilen tozlardan geliştirilen sinter parçalara nazaran çok üstün mekanik özelliklere sahip olduğu tespit edilmiştir. Örneğin nano taneli bakır malzemesi normal tane boyutlarına sahip bakırdan yaklaşık beş kat daha mukavimdir ve elastiklik modülü ortalama 2,5 kat daha fazladır (Öveçoğlu, 1997).

2.1 Toz Metalürjisinin Önemi

T/M düşük enerji tüketimi, düşük maliyetlerde ve yüksek verimde malzeme kullanımı içeren otomasyon üretim süreçlerinden yararlanır. Bu özellikleri itibarıyla T/M, günümüz teknolojilerinde önemli kavramlar olan verimlilik, enerji ve hammadde üçlüsü ile uyum içerisinde.

Bir parçanın üretiminde toz metalürjisinin tercih edilmesinin iki ana sebebi olabilir. Birincisi parçanın T/M dışında herhangi bir yöntemle üretilmemesidir. Örneğin volfram ve molibden gibi refrakter metallere üretilen parçalar, volfram karbür gibi metalürjik alaşımlamanın mümkün olmadığı parçalar, kendiliğinden yağlamalı gözenekli burçlar, filtreler ve manyetik malzemeler ancak T/M ile üretilir. İkinci ana sebep ise toz metalürjisiyle üretimin, talaşlı üretim, döküm veya dövme kalıplama yöntemlerine göre daha ekonomik olmasıdır. Aşağıda toz metalürjisi yöntemini kullanmanın bize kazandıracak bazı avantajlar sıralanmıştır:

- Geleneksel toz metalürjik parçaların üretiminde kullanılan hammaddelerin ucuz oluşu.
- Başlangıç hammaddesinin %97'si hurda vermeden kullanılır.
- Üretim sonunda %4'ten az hurda çıkması.
- Boyutsal hassasiyet ikincil işlemlere gerek duyulmadan elde edilir.
- Çok temiz bir yüzey kalitesinin elde edilebilmesi.
- Metallerin birbirleri ile ve metaller ile metal dışı malzemelerin birbirleriyle kombinasyonu rahatlıkla yapılabilir. Metallerin, metaloid diye adlandırılan karbürleri, nitrürleri, borürleri, silisitleri ancak T/M yöntemleri ile üretilir.
- Arzu edildiğinde gözenekler sıvı faz sinterlemesi denilen yöntem kullanılarak başka bir metalle doldurulup %100 yoğunluk sağlanabilir.
- Kontrollü olarak üretilen gözenekler ile kendiliğinden yağlamalı burçlar, filtreler ve katalizör malzemeler üretilir.
- Geleneksel talaş kaldırma ile üretilen parçaların (dişli çarklar gibi) daha ekonomik ve hızlı üretilmesi.
- Üretilen parçaların hassas olarak birbirinin kopyası olması.

- Yüksek aşınma direncine veya özel sürtünme katsayısına sahip yüzeylerin elde edilmesi.
- Parçanın üretiminde toplam işlem basamak sayısının az olması. (Geleneksel toz metalürjik bir parçanın üretiminde kalıba toz doldurma, presleme ve sinterleme olmak üzere üç basamak kullanılır)
- Kimyasal olarak homojenite elde edilmesi ve segregasyon problemin ortadan kalkması.
- Seri üretime yatkınlık. Dolayısıyla daha hızlı üretime elverişlilik.
- Üretilen parçanın ses yalıtma ve titreşim bastırma özelliğine sahip olabilmesi. [1]



3. TOZ METALÜRJİSİ İLE PARÇA ÜRETİMİ

Geleneksel toz metalürjik bir parçanın üretim basamakları şöyle sıralanabilir: 1) Tozun preslenmeye hazırlanması, 2) Presleme, 3) Sinterleme 4) Son işlemler.

3.1 Tozun Preslenmeye Hazırlanması

Toz metalürjisi yöntemiyle parça üretilmek istendiğinde ilk önce hammadde olan toz, üretilir veya hazır olarak satın alınır. Tozların üretiminde atomizasyon, ufalanmış oksitlerin indirgenmesi, mekanik parçalama, kimyasal indirgeme, elektroliz veya bu yöntemlerin karışımı kullanılır. Farklı yöntemlerle üretilen tozların şekilleri de farklı olur.

Şekillerine göre tozlar 8 grupta toplanabilir. Küresel, yuvarlak (küresele yakın), yüzeysel, ince şerit biçimi, dendiritik, şekilsiz, gözenekli ve keskin köşeli toz türleri vardır. Çizelge 3.1’de hangi üretim yöntemiyle, hangi şekilde tozların imal edildiği özetlenmiştir.

Çizelge 3.1 Toz şekilleri ve üretim yöntemleri (Bakkaloğlu, 2000).

Toz Şekli	Üretim Yöntemi	Malzemesi	Yaklaşık Tane Yüzeyi
Küresel	Atomizasyon	Ag, Cu, Cu-Sn, Fe	πD^2
Yuvarlak	Atomizasyon	Sn-Pb	$(1.5 \text{ ila } 2)\pi D^2$
Dendiritik	Elektroliz	Cu, Fe	$(7 \text{ ila } 12)\pi D^2$
İnce şerit	Mekanik Öğütme	Al, Cu, Cu-Zn	Yüzey uzunluğuna göre değişir.
Keskin Köşeli	Mekanik Öğütme	Fe, Cr, Si	$(3 \text{ ila } 4) \pi D^2$
Gözenekli	Kimyasal İndirgeme	Fe	Toz bünyesindeki gözenek sayısına göre değişir

Tozların şekillerinin yanında diğer özellikleri de son parçanın özelliklerini etkiler. Tozların özellikleri Çizelge 3.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.2 Tozların sınıflandırılmış özellikleri.

Toz Malzemesinin Özellikleri	Toz Üretimine Bağlı Özellikler	Tozun Özellikleri
Kristal Yapısı Teorik Yoğunluk Ergime Noktası Plastisitesi Elastisitesi Saflığı	Toz Tane Büyüklüğü Toz Tane Şekli Yoğunluk (tozun porozitesi) Toz Tane Yüzey Durumu Toz Tanelerin Mikro Yapısı Kafes Hata Türleri ve Miktarı Toz Tanelerin İçerdiği Gaz Miktarı	Toz Tane Şekli Ortalama Toz Tane Büyüklüğü Toz Tane Büyüklüğü Dağılımı Toz Özgül Yüzeyi (m^2/gr) Yığılma Yoğunluğu Vurma, Titreşim Yoğunluğu Tozlar Arası Sürtünme Özellikleri

Burada belirtilen çok sayıda özellikten en çok kullanılanları ve muayene edilenleri kimyasal bileşim, toz tane büyüklüğü ve dağılımı, toz tane şekli, yığma yoğunluğu, akıcılık ve preslenebilirliktir. Muayene edilmek istenen özelliğe göre farklı yöntemler ve cihazlar kullanılır.

3.1.1 Toz Tane Büyüklüğünün Ölçülmesi

Toz tane büyüklüğü ortalama toz tane çapı ile belirtilir. Çizelge 3.3’de toz tane büyüklüğünü belirlemek ve muayene etmek için kullanılan yöntemler sıralanmıştır.

Çizelge 3.3 Toz tane büyüklüğü ölçüm yöntemleri (Bakkaloğlu, 2000).

Ölçüm Yöntemi	Yöntemin Kullanılma Sınırları (µm)
Ayırma Yöntemleri	
Örgülü eleklerle	32
İnce gözlü eleklerle	5-100
Yer çekimi ile ayırma	5-60
Santrifüj ile ayırma	20-60
Çöktürme (Sedimentasyon) Yöntemleri	
Sedimentasyon terazisi	1-60
Santrifüj ile ayırma	0,05-10
Sayım Yöntemi	
Doğrudan sayım yöntemi	1-100
Mikroskopla sayım yöntemi	1-100
Elektron mikroskobu ile sayım yöntemi	0,004-1

3.1.2 Yığma Yoğunluğu

Yığma yoğunluğu tozun sıkıştırılmamış haldeki yoğunluğudur. Görünür yoğunluk olarak da adlandırılabilir. Bu yoğunluğu belirlemek bir miktar toz boyutları ve şekli standartlarla belirlenmiş bir huniden akıtılır. Akan toz huninin altındaki silindirik kabı doldurur. Huni çıkış ağzı ile silindirik kabın üst yüzeyi arasındaki yükseklik de sabit bir değerdir. Tozla dolan silindir tartılır. Silindir kabın hacmi de bilindiğinden yığma yoğunluğu kolaylıkla (g/cm^3) olarak hesaplanır. Bu deneyin ISO standart numarası 3923 tür. Yığma yoğunluğu azaldıkça preslemede zımbanın kurs boyu artar. Yığma yoğunluğu tozun tane büyüklüğüne bağlıdır. Çizelge 3.4’de de görüldüğü gibi toz tane büyüklüğü azaldıkça, yığma yoğunluğu da azalır.

Bunun sebebi toz tanelerinin büyüklüğünün azalmasıyla, tozların yüzey alanının, dolayısıyla toz taneleri arasındaki sürtünmenin artmasıdır. Toz tane şeklinin küreselden uzaklaşmasıyla, yığma yoğunluğu da azalır.

Çizelge 3.4 Değişik büyüklükteki tozların görünür yoğunluğu (ASM Vol. 17).

Malzeme	Ortalama Tane Çapı μm	Görünür Yoğunluk g/cm^3
Alüminyum		
Atomize		
	5,8	0,62
	6,8	0,75
	15,5	0,98
	17,0	1,04
	18,0	1,09
	% 60, 44'den yukarı	1,22
	%75, 44'den yukarı	1,25
Nikel		
Karbonil	3,2	0,61
Çökelme	3,5	1,80
Karbonil	3,8	1,87
Karbonil	4,1	2,10
Çökelme	4,4	2,09
Çökelme	8,0	2,60
Volfram		
	1,20	2,16
	2,47	2,52
	3,88	3,67
	6,85	4,40
	26,00	10,20
Paslanma Çelik		
Küresel, atomize	-325 mesh	4,3
	-270+325 mesh	4,5
	-200+270 mesh	4,4
	-150+200 mesh	4,5
	-100+150 mesh	4,5
Demir		
İndirgenmiş	6	0,97
Karbonil	7	3,40
İndirgenmiş	51	2,19
Elektrolitik	53	2,05
Elektrolitik	63	2,56
İndirgenmiş	68	3,03
Elektrolitik	78	3,32

3.1.3 Akıcılık

Tozun akıcılığı, boyutu ve şekli standartlarla belirlenmiş olan bir huniden akma kabiliyeti ile ölçülür. Belli kütledeki toz huniye doldurulur ve tozun serbest olarak akması sağlanır. Tozun huniyi tamamen boşaltma süresine göre akıcılığı belirlenir. Bu deney ISO 4490 standardına göre yapılır. Akıcılık toz tane büyüklüğünün azalmasıyla azalır. Toz tane şekli küreselden uzaklaştıkça, tozun akıcılık değeri de azalır.

3.1.4 Preslenebilirlik

Tozların preslenmesinden sonra oluşan parçanın yoğunluğunun teorik yoğunluğa yaklaşması istenir. Tozların preslenebilirliği arttıkça ulaşılan yoğunluklar da artar. Preslenebilirlik tozun malzeme türüne, toz tane büyüklüğüne, tozun görmüş olduğu ön işlemlere, toz tanelerinin kendi aralarında ve kalıp duvarları ile olan sürtünmesine bağlıdır. Örneğin oksitlerinden indirgenmiş olan metal tozları gözeneklidir. Bu tür gözeneklere tane içi gözenek denir. Tane içi gözenekliğe sahip tozlar, atomizasyon ya da elektroliz yöntemi ile üretilmiş, tane içi gözenekliğe sahip olmayan tozlardan daha az preslenebilirler.

3.1.5 Tozun Karıştırılması

Pres kalıbına doldurulan tozların şekillerinin mümkün olduğunca homojen olması gerekir. Yoğunluğu arttırmak için farklı tane boyutuna sahip tozlarla karışım hazırlanabilir. Kaba taneli tozlar arasındaki boşluklar ince taneli tozlar ile doldurulur. Böylece yoğunluk artar. Farklı tane boyutunda tozlar kullanıldığında tozların iyi bir şekilde karıştırılması gerekir. Aksi takdirde homojen bir yapı elde edilemez. Tozlar pres kalıbına konmadan önce taneler arasında ve taneler ile kalıp duvarları arasında yağlamayı sağlayan yağlayıcılar ile karıştırılırlar. Tozlar üretilirken de içlerine yağlayıcılar konabilir. Bu yağlayıcılar sinterlemenin ilk aşamasında parçadan uzaklaştırılır. Çizelge 3.5'te tozlara karıştırılan bazı yağlayıcılar sıralanmıştır.

Çizelge 3.5 Tozlara katılan yağlayıcıların özellikleri (Bakkaloğlu, 2000).

Yağlayıcı	Kimyasal Formülü	Erime Sıcaklığı °C	Buharlaştırma Sıcaklığı °C
Çinko Stearat	$Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$	130	335
Kalsiyum Stearat	$Ca(C_{18}H_{35}O_2)_2$	180	350
Alüminyum Stearat	$Al(C_{18}H_{35}O_2)_2$	120	360
Magnezyum Stearat	$Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$	132	360
Kurşun Stearat	$Pb(C_{18}H_{35}O_2)_2$	116	360
Lityum Stearat	$LiC_{18}H_{35}O_2$	221	320
Parafin	$C_{22}H_{46}$ dan $C_{27}H_{56}$ ya	40-60	
Stearik Asit	$CH_3(CH_2)_{16}COOH$	69,4	360
Oleik Asit	$C_{18}H_{33}O_2$	13	280
Benzoik Asit	C_6H_5COOH	122	249
Balmumu		140-143	
Grafit	C	3500	4827

3.2 Presleme

Tozlardan üretilmek istenen malzemenin şekli, bir katı kalıba toz karışımının doldurulmasından sonra aşağıdan ve yukarıdan zimbalarla basınç uygulanması sonucu elde edilir. Preslemede kullanılan basınçlar 400 ila 800MPa arasında değişir. Uygulanan basınç sonucunda taneler aralarında soğuk kaynaklanmış bağlar oluşturarak birbirine kenetlenir. Tozun sıkıştırılma oranı nihai parçanın yoğunluğunu belirler. Presleme basıncı, parçanın fiziksel özelliklerini ve sinterleme sırasında oluşacak büzülme ya da genişlemeyi kontrol eder. Artan presleme basıncıyla beraber preslenmiş parçanın dayanımı da artar. Ayrıca preslenmiş parçanın dayanımı tozun yumuşaklığına, plastisitesine bağlı olarak artar.

Pres kalıbına doldurulan toz karışımına zimbalar ile basınç uygulandığında tozlarda üç olay meydana gelir.

1. Toz taneleri yeniden yığılırlar ve dizilirler. Böylece daha önceden rasgele olarak dizilmiş toz taneleri arasındaki köprüler kısmen kopar.
2. Toz taneleri elastik ve plastik deformasyona uğrar. Tozun uğrayacağı plastik deformasyon, tozun sünekliğine bağlıdır. Sünek metal tozları, gevrek kırılğan seramik tozlarından daha çok deformasyona uğrar. Plastik ve elastik deformasyon sonucu taneler arasındaki temas yüzeyleri büyür.
3. Bu aşamada, gevrek seramik tozları uygulanan basınçtan dolayı daha küçük parçalara ayrılır. Sünek metal tozları ise preslemeden dolayı soğuk sertleşir ve çatlayıp dağılır. Presleme sırasında bu üç olay birbiri ile aynı anda meydana gelebilir.

3.2.1 Sinterlenmemiş Toz Metalürjik Parçalarda Presleme Basıncı Yoğunluk İlişkisi

Toza uygulanan sıkıştırma basıncının artmasıyla, toz kütlenin yoğunluğu artar, gözeneklilik azalır. Parçaya uygulanan basıncın parça içindeki dağılımı ve presten çıkan parçanın yoğunluğu homojen değildir. Üst zımbaya uygulanan basınç değeri ile parçanın yoğunluğu arasında matematiksel ilişkiler kurulmuştur. Böyle bir ilişkinin pratikte önemi çok büyüktür ve istediğimiz yoğunluğa ulaşmak için ne kadar miktarda bir basınç uygulamamız gerektiğini hesaplamamızı sağlar. Balshin tarafından öne sürülmüş olan ilişki şöyledir:

$$\ln P = -AV + B \quad (3.1)$$

$\ln P$ = Uygulanan basıncın doğal logaritması.

V = Göreceli toz hacmi (toz parçanın hacminin, aynı kütledeki katı cismin hacmine oranı).

A ve B sabitlerdir (ASM Vol. 7).

Ancak bu denklem yüksek presleme basınçlarında geçerli değildir. Yüksek basınçlarda denklem daha düşük göreceli toz hacmi vermektedir. Denklemdaki A ve B deneysel sonuçlardan yola çıkılarak, uygulanan birkaç basınç değerine karşılık, göreceli toz hacmini ölçerek bulunur.

Bir başka yaklaşımda ise gözenekli sinterlenmemiş parça, hidrostatik basınç altında içinde boşluğa sahip olan bir küre ile temsil edilmiştir. Heckel tarafından geliştirilen denklem şöyledir:

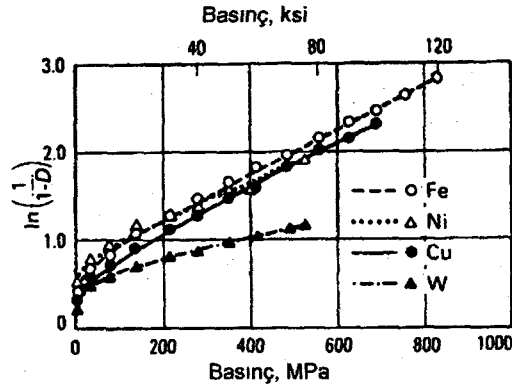
$$P = \frac{1}{K} \left(\ln \frac{1}{1-D} + B \right) \quad (3.2)$$

D = Parçanın göreceli yoğunluğu (parçanın yoğunluğunun, aynı kütledeki katının yoğunluğuna oranı).

P = Uygulanan presleme basıncı.

K ve B ise sabitlerdir (ASM Vol. 7).

Şekil 3.1'de bu denklem ile deneysel verilerin uyduğu grafik verilmiştir.



Şekil 3.1 Preslenmiş demir, nikel, bakır ve volfram parçalarda presleme basıncı yoğunluk ilişkisi (ASM Vol. 7).

Alüminyum, bakır, çinko ve demir tozları için belli bir presleme basıncından sonra, basınç arttırılsa dahi yoğunlukta bir artma gözlenmez. Presleme basıncının artmasıyla büyük gözenekler küçülür ve kaybolur. Daha yüksek presleme basıncında ise küçük gözenekler kaybolur. Aslında basınç arttıkça büyük gözenekler küçülüp, küçük gözenekler haline dönüşür. Tüm gözenekler aynı anda uygulanan basınç ile küçülmektedir.

3.2.2 Presleme Teknikleri

Toz metalürjisi ile parça üretiminde tozu sıkıştırmak için birçok teknik kullanılmaktadır. Mekanik presleme, hidrolik presleme, sıcak presleme, soğuk izostatik presleme (CIP), sıcak izostatik presleme (HIP), çok hızlı presleme, çok hızlı izostatik presleme, toz dövme, slip döküm, toz enjeksiyon ve toz ekstrüzyon kullanılan tekniklerden bazılarıdır. Sanayide en çok kullanılanları mekanik presleme, hidrolik presleme, toz enjeksiyon ve izostatik presleme teknikleridir. Mekanik preslerde presleme basıncı 5 ila 150 ton arasındadır. Bu tür presler küçük parçaların imalinde kullanılır, dakikada 20 ila 100 parça preslenebilir. Hidrolik preslere göre daha hızlı çalışırlar. Hidrolik preslerle 5000 tona kadar basınçlara ulaşılabilir, dakikada 10 ila 20 parça preslenebilir. Hidrolik presler, yüksek presleme basıncı gerektiren komplike parçaların yoğunlaştırılmasında kullanılır.

Mekanik presleme ve hidrolik preslemede katı kalıplar kullanılır. Bu tekniklerde kalıp duvarları ile toz arasında yüksek miktarda sürtünme yaşanır. İzostatik preslemede bu sürtünme büyük oranda azalır. Soğuk izostatik preslemede şekillendirilmek istenen toz elastik bir zarf (kauçuk ya da plastik) içine konarak direk olarak zımbalar tarafından preslenir. Bu yöntemin yanında zarf basıncı ileten bir sıvı içerisine konabilir ve sıvıya presleme basıncı uygulanabilir. Sıvı, üzerine etkiyen basıncı her yönde eşit olarak toz yüklü zarfa iletecektir. Sıcak izostatik preslemede tozlar, ince, esnek metalik bir zarf içerisine konur. Bu metalik zarf

ısıyı ve basıncı ileten bir gaz ortamına konur. Gaza uygulanan basınç, gaz tarafından metalik zarfa iletilir. Genellikle bu gaz argon ya da azottur. Preslemenin yapıldığı hazne elektrik rezistanslarıyla ısıtılır. İzostatik presleme tekniklerinde basınç parçanın her tarafına homojen olarak dağıtıldığı için parça mekanik ve hidrolik preslemeye göre daha homojen bir yoğunluk dağılımına sahip olur.

3.3 Sinterleme

Sinterleme aşamasında preslenmiş parçalar belli sıcaklıklarda ve sürelerde sinter fırınlarında sinterleme ısı işlemine tabii tutulur. Sinterlenecek malzeme tek bir elementten oluşuyorsa buna tek bileşenli sistem; birden fazla elementten oluşuyorsa çok bileşenli sistem adı verilir. Tek bileşenli sistemlerde sinterleme sıcaklığı yaklaşık olarak malzemenin ergime sıcaklığının %80'nidir. Çok bileşenli sistemlerde ise iki türlü sinterleme işlemi yapılabilir. Katı faz sinterlemesi yönteminde sinterleme sıcaklığı bileşenlerden ergime sıcaklığı düşük olanın ergime sıcaklığının altında seçilir. Sıvı faz sinterlemesinde ise sinterleme sıcaklığı bileşenlerden en az birinin ergime sıcaklığının üstünde alınır. Normal sıvı faz sinterlemesinde sinterleme sıcaklığında bir sıvı faz oluşur ve sinterleme malzemenin içinde meydana gelir. Sıvı infiltrasyonda ise sıvı faz parçanın dışında oluşturulur ve katı haldeki bileşene emdirilir. Sıvı faz sinterlemesi ile katı haldeki bileşenin gözenekleri sürekli bir faz ile doldurulur (Özbek, 2001).

Sinterleme sıcaklıklarında oksidasyonun önlenmesi için atmosfer kontrol altına alınır. Sinterleme, oksitlenmeyi önleyici gaz atmosfer altında veya vakum ortamında gerçekleştirilir. Sinterlemede itici kuvvetler, toz halinde birim hacime düşen çok yüksek yüzey enerjisi, buhar basıncı, hacimsel difüzyon, tane sınırı difüzyonu, yüzey difüzyonu ve kayma ile sürünme deformasyonudur. İyi bir sinterleme olması için ya sıvı bir fazın oluşup taneler arasında sürekli bir faz oluşturması ya da katı halde, difüzyon olayları ile toz taneleri arasında boyunların meydana gelmesi gerekir. Sinterleme olayı çeşitli aşamalarla ilerleyen bir olaydır. Bu aşamalar: Tozların aralarında ilk bağları oluşturmaları (boyun oluşumu), oluşan boyunların büyümesi, gözenek kanallarının kapanması, gözeneklerin yuvarlaklaşması, yoğunlaşma veya gözeneklerin küçülmesi, gözenek irileşmesi. Ticari üretimlerde genelde sinterleme yukarıda sayılan ilk üç veya dört aşama ile tamamlanır. Bu aşamalar belli bir sıra içerisinde olduğu gibi aynı anda da gerçekleşebilir. Sinterleme sıcaklığının artması ve süresinin uzaması, oluşan bağların kuvvetlenmesine ve gözeneklerin kapanmasına yol açar (Özbek, 2001).

3.3.1 Sinterleme Fırınları

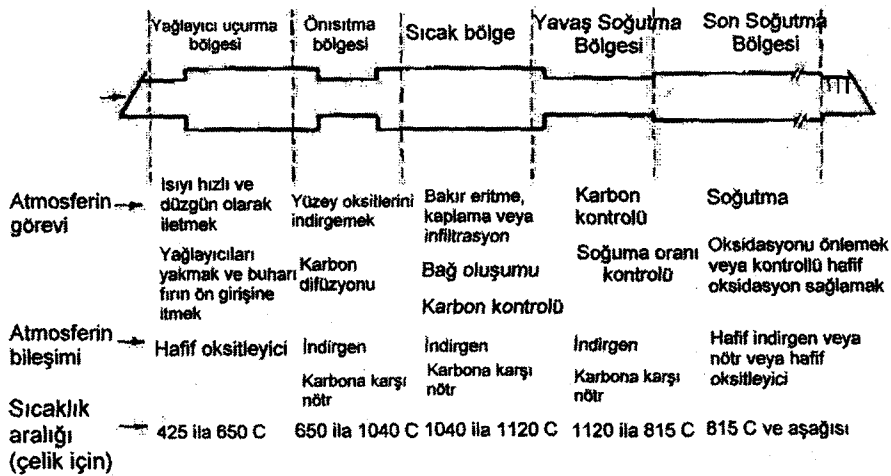
Seri üretime elverişli olan sinterleme fırınları, sürekli çalışan fırınlardır. Bu tip fırınlarda parçalar devamlı hareket eden bir bant üzerindedir. Fırın çeşitli bölgelerden oluşur. Bu bölgeler: Yağlayıcı uçurma bölgesi, sinterleme bölgesi, yavaş soğutma bölgesi ve son soğutma bölgesidir.

Yağlayıcı uçurma bölgesinde, preslenmiş parçada kullanılmış olan yağlayıcılar parçadan ısı aracılığıyla uzaklaştırılır. Bu bölgenin sıcaklığı 420°C ila 650°C arasında olabilir. Genelde yağlayıcılar parçadan yanarak uzaklaşır. Isıl şoktan dolayı parçanın parçalanmaması için bu bölge üç değişik sıcaklığa ayrılmıştır.

Sinterleme bölgesinde 1150°C gibi sıcaklıklara çıkmak için SiC'den yapılan çubuk tipi elektrikli ısıtıcılar kullanılır. 1290°C ila 1650°C arasında sinterleme sıcaklıklarına ihtiyaç duyulduğunda molibdenden yapılan ısıtma elemanları kullanılır. 1150°C'den düşük sinterleme sıcaklıkları elde etmek için %80 Ni – %20 Cr alaşımından yapılan elektrik direnç telleri kullanılabilir. İstenilen sinterleme süresi bandın hızı ayarlanarak elde edilebilir.

Yavaş soğutma bölgesinin amacı, parçaların son soğutma bölgesine girmeden önce üzerlerindeki ısı şoku azaltmaktır.

Son soğutma bölgesinde parçalar fırın dışına çıktıklarında havada oksitlenmeyecek sıcaklığa kadar soğutulurlar. Soğutma odasında su ceketli soğutma kullanıldığı gibi, fırın atmosferinin parçalara gönderilmesi yöntemi de kullanılabilir. Şekil 3.2'de bir tipik sinter fırınının ısısal ve atmosferik özellikleri özetlenmiştir.



Şekil 3.2 Sinter fırınının ısısal ve atmosferik özellikleri (ASM Vol. 7).

3.4 Son İşlemler

Toz metalürjik parçalar genellikle sinterleme sonrasında kullanıma hazırdır. Ancak delme, zımparalama ve parlatma gibi işlemlere ihtiyaç duyulabilir. Eğer boyutsal hassasiyet aranıyorsa hassas dövme kalıplarında yeniden presleme işlemi yapılabilir. Malzeme eğer çok sert ise bu mekanik işlemler bir ön sinterlemeden sonra yapılır. Daha sonra parça tam olarak sinterlenir. T/M parçalara tuz banyosu gibi sıvı banyolarda sertleştirme işlemi uygulanamaz. T/M parçalar gözenekli olduğu için bu gözeneklerden içeri sıvı girmesi ve belli bir süre sonra dışarı çıkması söz konusudur. T/M parçalara ısı işlem olarak gazla karbürizasyon veya nitrürizasyon uygulanabilir. Demir esaslı parçalara uygulanan önemli bir işlemde buhar karartmasıdır. Parçalar 1 ila 4 saat arasında 540°C ila 595°C arasında sıcaklığa sahip su buharına maruz bırakılır. Su buharı sayesinde parçanın yüzeyinde bir Fe_3O_4 tabakası meydana gelir. Bu tabaka yüzeyin sertliğini 45 Rockwell B'den 80 Rockwell B'ye yükseltir ve aşınma direncini artırır (Bozacı, 2002).

Kendinden yağlamalı burçlara ise yağ emdirme işlemi uygulanır. Burçlar önce basıncın düşürüldüğü bir odaya alınır ve daha sonra buraya atmosfer basıncındaki yağ pompalanır. Yağ parçanın yüzeyinden içeri girerek birbirine bağlı gözeneklerin içini doldurur. Çizelge 3.6'da toz metalürjik parça üretim teknikleri bir şema halinde özetlenmiştir.

Çizelge 3.6 Toz metalürjik parça üretim teknikleri.

Hammaddeler	Elementel, alaşım veya karışım tozlar	Ekler (grafit, kalıp yağlayıcıları)
Karıştırma		Karıştırma
Presleme	Sıcak Presleme	Soğuk Presleme
	İzostatik presleme Ekstrüzyon Sıcak kalıpta presleme Sprey Yüksek enerji veya yüksek hız şekillendirmesi	İzostatik presleme Soğuk kalıpta presleme Hadde sıkıştırma Basıncsız kalıplama Slip döküm
Sinterleme		Atmosfer kontrollü Vakum
İlave İşlemler	İlave Üretim Basamakları	İlave Bitirme Basamakları
	Yeniden presleme, ölçüye getirme. Yeniden sinterleme Sıcak veya soğuk dövme kalıplama Metal veya yağ emdirme	Isıl işlem, buhar karartması Düzlem taşlama, delme, çapak alma Kaplama
Bitmiş Ürün		

3.5 Toz Metalürjisi Proses Örnekleri

Pirinç tozları genelde %0.5 ila %1 arasında yağlayıcı katılarak 414 MPa basınç altında preslenir. Sinterleme sıcaklığı bileşime göre değişir. Sinterleme atmosferi ayrıışmış amonyak, endotermik ve azot olabilir. Cu-Zn-Ni alaşımları pirinç tozları gibi %0.5 ila %1 arasında yağlayıcı katılarak 414 MPa basınç altında preslenebilir. Sinterleme atmosferi ayrıışmış amonyak, endotermik ve azot olabilir. Demir tozlarına yağlayıcı olarak %0.75 ile %1 arasında çinko stearat veya sentetik balmumu katılır. Demir tozlarından preslenmiş parçalar endotermik veya azot bazlı koruyucu atmosfer altında kayışlı fırınlarda sinterlenir. Sinterleme sıcaklığı genelde 1120°C'dir. Bronz tozları %0.75 yağlayıcı katılarak 400MPa basınçta preslenir. Sinterleme atmosferi ekzotermiktir, sinterleme sıcaklığı 815 ila 840°C arasında bileşime göre değişik olarak seçilir. Paslanmaz çelik tozlarına yağlayıcı olarak lityum stearat, stearik asit veya sentetik balmumu katılabilir. Sinterleme atmosfer kontrollü kayışlı fırınlarda veya vakum ortamında yapılabilir. Sinterleme karbürizasyona yol açmayacak, ayrıışmış amonyak, hidrojen veya vakum ortamında yapılmalıdır. Sinterleme sıcaklığı bileşime göre değişir. Çizelge 3.7'de T/M parçaların üretiminde kullanılan basınçlar ve sinterleme sıcaklıkları özetlenmiştir. Buradaki sinterleme süreleri parçaların sinter fırınının sıcak bölgesinde kalış zamanıdır. Çizelgedeki A, B, C, D, E harfleri farklı karışımındaki tozları temsil eder.

Çizelge 3.7 Toz metalürjik parçaların üretim parametreleri (ASM Vol. 7).

Malzeme	Presleme Basıncı (MPa)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Zamanı (dakika)	Preslenmiş Yoğunluğu (g/cm ³)
Pirinçler				
70Cu-30Zn	414	860 – 880	20	7.30
80Cu-20Zn	414	860 – 890	20	7.60
90Cu-10Zn	414	870 – 890	20	7.80
Cu-Zn-Ni alaşımları				
64Cu-18Zn-18Ni	414	910 – 914	20	7.40
64Cu-16.5Zn-18Ni-1.5Pb	414	910 – 914	20	7.50
Demir				
A	300	1120	30	6.20
B	455	1120	30	6.00
C	450	1120	30	6.70
D	430	1120	30	6.70
E	525	1120	30	7.00
Bronz				
A	400	815	10	6.30
B	400	815	10	6.30
C	400	815	10	6.30
D	400	815	10	6.30
E	400	815	10	6.30
Paslanmaz Çelik				
303L	496	1120 – 1316	45	6.40
304L	455	1120 – 1316	45	6.40
410L	469	1120 – 1232	45	6.20
434L	510	1120 – 1232	45	6.20

4. TOZ METALÜRJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN PARÇALAR

İmalat endüstrilerinde kullanılan T/M parçalar büyük ölçüde demir, çelik ve alaşımları, paslanmaz çelik, bakır ve bakır esaslı alaşım (pirinç, bronz), alüminyum, nikel ve kalay tozlarından imal edilir. Kalay, kendinden yağlamalı bronz yatakların üretiminde ilave olarak kullanılmaktadır. Yine ilave bir element olan nikel ise, düşük alaşımlı nikel-çelik ve paslanmaz çelik parçalarda kullanılmaktadır (Öveçoğlu, 1997).

Dünya çapında tüm metal tozlarından üretilen T/M parçaların pazar paylarında en büyük kısmı %86 ile demir-çelik esaslı parçalar almaktadır. Demir esaslı ürünlerden sonra ikinci sırada %11 toplam pazar payı ile bakır ve bakır esaslı parçalar, üçüncü sırada %1,4 ile paslanmaz çelik parçalar yer almaktadır ve bunları sırasıyla %0,6 ile kalay ve %0,5 ile alüminyum takip etmektedir (Öveçoğlu, 1997).

4.1 Toz Metalürjik Parçaların Genel Özellikleri

Toz metalürjisi ile çok çeşitli parçalar üretilebilir. Herhangi bir problemle karşılaşmadan T/M ile üretilebilecek parçaların minimum cidar kalınlığı 0.8mm'dir. Dizayn edilen parçanın cidar kalınlığındaki ani değişimler, parçanın sinterleme sonrasında uniform olmayan boyut değiştirmesine ve çarpılmasına yol açabilir. 1mm cidar kalınlığına sahip içi boş silindirik bir parça maksimum 64mm boya sahip olabilir. Bu boy aşılsa heterojen yoğunluk dağılımı ve laminasyon çatlakları görülebilir. Eğer bu silindirin cidar kalınlığı 3mm'ye çıkarılırsa boyu 240mm'ye kadar uzatılabilir.

T/M ile minimum 2mm çapa ve merkezinde 0.25mm'lik deliğe sahip parçalar üretilebilir. T/M ile deliklere sahip 300mm çapa kadar parçalar üretilebilir. Üretilebilecek parçaların minimum boyutunu, tozun kalıbı doldurma kapasitesi, akıcılığı, kalıp parçalarının boyut hassasiyeti belirler. Maksimum boyut ise elde edilebilecek presleme basıncına bağlıdır. Kaliteli çelik bir parça üretmek için mm^2 'ye 78kg'lık basınç (780MPa) uygulamak gerekir. 300mm çapında ve 4 deliğe sahip bir parçayı üretmek için 5000 tonluk bir prese ihtiyaç vardır.

T/M ile üretilen parçaların çekme mukavemeti 50 ile 1300MPa arasında değişebilir. % uzama değerleri ise 0.5 ila 10 arasında olabilir. Bu parametreler parçanın kimyasal bileşimine, yoğunluğuna, kullanılan tozun özelliklerine ve ısı işlemlere bağlıdır. Çizelge 4.1'de malzeme cinsine göre parçaların mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.1 Toz metalürjik parçaların mekanik özellikleri. [2]

Malzeme	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)
Demir	100 - 276	15 - 2
Çelik	130 - 490	3.5 - 0.5
Bakırlı çelik	140 - 614	7 - 0.5
Bakır infiltre çelik	450 - 890	2.5 - 1.0
Isıl işlemlili alaşımlı çelikler	200 - 1200	10.5 - 1.5
Bronz	55 - 124	2.5 - 1.0

T/M parçalar yüksek yoğunluklu olarak üretildiklerinde döküm ya da dövme yoluyla şekillendirilmiş parçaların çekme mukavemetinin % 75'ine ulaşırlar. T/M parçaların sertlik değerleri ölçüldüğünde düşük görünür. Bu toz taneleri arasındaki gözeneklerden kaynaklanır. T/M parçalar, döküm ve dövme parçalara kıyasla daha düşük çentik darbe dayanımına sahiptir. Bunun sebebi gözeneklik ve toz taneleri arasındaki düşük bağ alanıdır.

4.2 Toz Metalürjik Parçalar

4.2.1 Yapısal Parçalar

Gözenek oranı %10'dan az olan ve mukavemeti önemli olan parçalardır. Bu tür parçalar makinelerde; yağ pompası dişlisi, valf kılavuzu, dişli burçlar, tarım makinelerinde; ölçü tekerleği, durdurucu, ara burç, makara, hidrolikte; dağıtma plakası, destek plakası, ara burç, soket, elektrik mühendisliğinde; stator burcu, dişli çark, eksantrik, otomobil endüstrisinde; sok emici olarak kullanılır. Şekil 4.1'de T/M ile üretilmiş çeşitli burçlar gösterilmiştir. Şekil 4.2'de yağ pompası dişlileri görülmektedir. Çizelge 4.2'de Bulgaristan'daki bir fabrikada üretilen parçaların özellikleri tablolanmıştır. Bu değerler imalat sanayisinde karşılaşılan tipik değerlerdir.



Şekil 4.1 Toz metalürjisi ile üretilmiş çeşitli burçlar. [3]

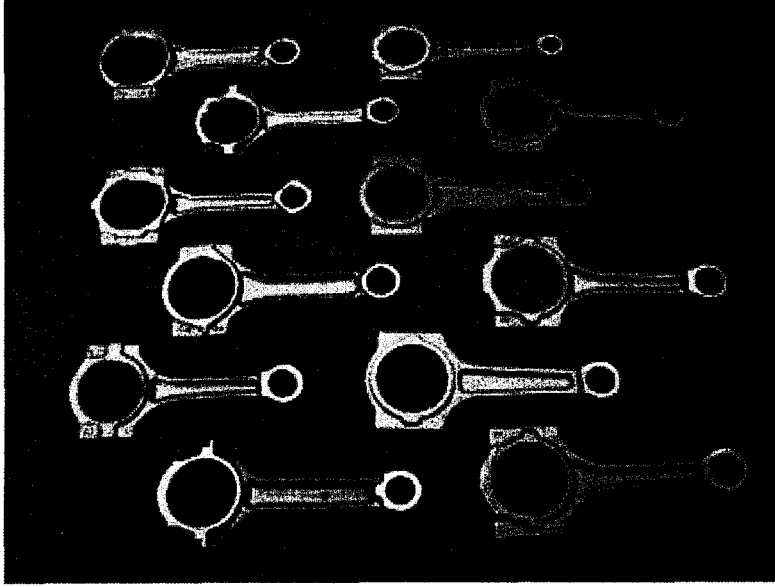


Şekil 4.2 Toz metalürjisi ile üretilmiş yağ pompası dişlileri. [3]

Çizelge 4.2 Çeşitli yapısal parçaların mekanik özellikleri. [4]

Yapısal Parçalar İçin Ekonomik Olan Boyut Sınırları	
Kesit alanı	$< 80 \text{ mm}^2$
Boydan boya uzunluğu	$< 180 \text{ mm}$
Yüksekliği	$3 - 50 \text{ mm}$
Düşük Yoğunluklu Yapısal Parçalar $d = 6.4 - 6.9 \text{ g/cm}^3$	
Çekme mukavemeti	$150 - 350 \text{ MPa}$
Uzama	$\% 0.5 - 6$
Bakır-çelik, karbon-bakır-çelik, krom-çelik, krom-nikel-çelik, fosfor-çelik, bakır-nikel-çelik, nikel-çelik, bronz, bronz-grafit.	
Orta Yoğunluklu Yapısal Parçalar $d = 6.9 - 7.2 \text{ g/cm}^3$	
Çekme mukavemeti	$180 - 600 \text{ MPa}$
Uzama	$\% 1.3 - 20$
Bakır-çelik, krom-çelik, krom-nikel-çelik, bakır-nikel-çelik, nikel-çelik, bronz.	
Yüksek Yoğunluklu Yapısal Parçalar $d = > 7.2 \text{ g/cm}^3$	
Çekme mukavemeti	$400 - 600 \text{ MPa}$
Uzama	$\% 1 - 15$
Bakır infiltre demir, bakır infiltre demir-grafit, bakır infiltre çelik, pirinç infiltre demir-grafit.	
Pirinç Yapısal Parçalar $d = 7.1 - 7.2 \text{ g/cm}^3$	
Çekme mukavemeti	$110 - 240 \text{ MPa}$
Uzama	$\% 11 - 18$
Pirinç, yüksek yoğunluklu pirinç.	
Bakır Yapısal Parçalar $d = 8.0 - 8.4 \text{ g/cm}^3$	
Çekme mukavemeti	$180 - 220 \text{ MPa}$
Uzama	$\% 11 - 18$
Elektriksel öz direnç	$0.032 - 0.045 \times 10^6 \text{ ohm.m}$
Bakır, yüksek yoğunluklu bakır.	

Otomotiv endüstrisi için üretilen biyel kolları da 15 yıldır toz dövme kalıplama yöntemi ile üretilmektedir. Üretilen 100 milyon adette tek bir çalışma hatası ve arıza görülmemiştir. Toz dövme yöntemi ile üretim sayesinde normal dövme kalıplama yöntemi ile üretilen biyel kollarındaki delik delme işlemi ortadan kalkmıştır. Böylece yılda binlerce tonluk talaş önlenmiş olur. Toz dövme yöntemi ile üretilen biyel kollarının dinamik yük altındaki performansları dövme malzemelere göre daha iyidir. AISI 1141 çeliğinden üretilen toz dövme biyel kolları normal dövme biyel kollarına göre eğilmeye karşı iki kat daha dirençlidir [5]. Şekil 4.3'te toz dövme kalıplama yöntemi ile üretilmiş çeşitli biyel kolları görülmektedir.



Şekil 4.3 Toz dövme ile üretilmiş biyel kolları. [5]

4.2.2 Kendinden Yağlamalı Burçlar

Kendinden yağlamalı burçlar %18 - 50 oranında gözenekliğe sahiptir. Bu gözenek oranına düşük basınçlarda presleme yapılarak ulaşılabilir. Preslenen parçalara sinterlemeden sonra yağ emdirme işlemi uygulanır. Düşük devirli sistemlerde kullanılan burçlara hidrolik shell 49 gibi yağlar emdirilir. Devir sayısı 5000 – 6000'den büyükse yağlayıcı olarak sentetik yağlar ve kenolit kullanılır (Bozacı, 2002). Burca bağlı mil döndüğünde oluşan ısı ve mil ile burç arasındaki kısmi vakum sayesinde, burç içindeki yağ gözeneklerden dışarı çıkar ve mil ile burç arasını yağlar. Milin hareketi sona erdiğinde burç ile mil arasındaki yağ, kılcallık olayından dolayı burç tarafından gözeneklere geri emilir.

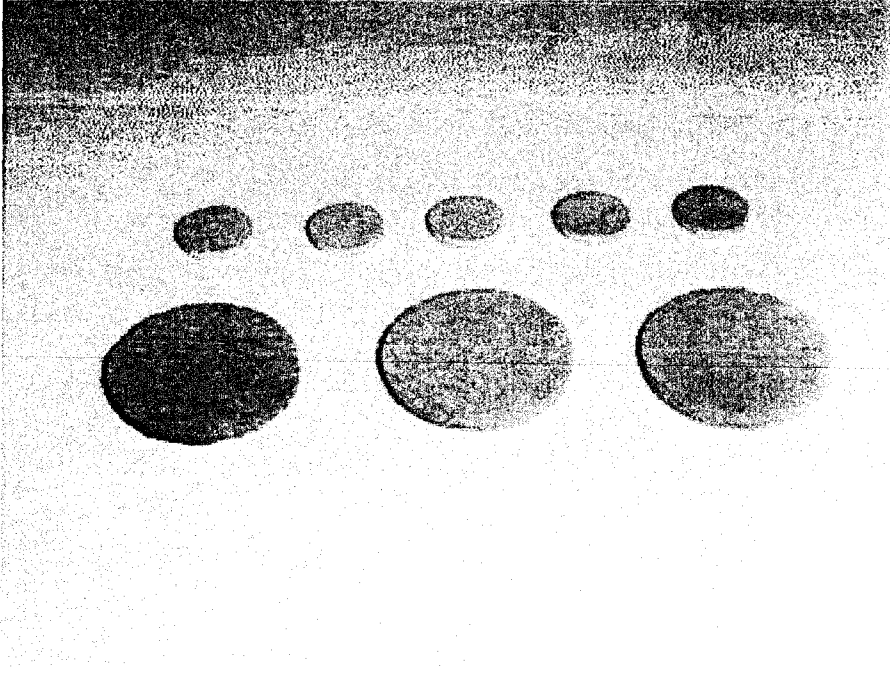
Kendinden yağlamalı burçlar her türlü ev aletinin motorunda yatak olarak, fan motorlarında, otomobillerde starterlerde ve jeneratörlerde kullanılır. Kendinden yağlamalı burçlar sayesinde yağlayıcı tüketimi azalmıştır. Yağlama amacıyla ek parça kullanımı ortadan kalkmıştır. T/M ile üretilen burçların aşınma direnci yüksektir, burçlar hızlı ve yavaş dönen sistemlere göre farklı olarak üretilir. Çizelge 4.3'de T/M ile üretilen kendinden yağlamalı burçların mekanik özellikleri özetlenmiştir. Çizelge 4.3'de verilen boyut değerleri ekonomik ve imalat sanayiinde kullanılan değerlerdir.

Çizelge 4.3 Kendinden yağlamalı burçların özellikleri. [6]

Silindirik Kendinden Yağlamalı Burçlar	
Dış çap	4 – 180 mm
İç çap	2 – 170 mm
Boy	3 – 50 mm
Flanşlı Burçlar	
Flanşın dış çapı	5 – 180 mm
Burcun dış çapı	4 – 180 mm
İç çap	2 – 170 mm
Flanşın kalınlığı	1.5 – 45 mm
Boy	3 – 50 mm
Küresel Burçlar	
Küre çapı	8 – 22 mm
Dış çap	7.7 – 21 mm
İç çap	3 – 12 mm
Boy	6 – 15 mm
Demir Bazlı Kendinden Yağlamalı Burçların Mekanik Özellikleri	
Yoğunluk	5.8 – 6.5 g/cm ³
Gözenek oranı	> %18
Çapsal basma mukavemeti	170 – 450 MPa
Bakır-demir, bakır-karbon-demir, krom-demir, fosfor-grafit-demir.	
Bakır Bazlı Kendinden Yağlamalı Burçların Mekanik Özellikleri	
Yoğunluk	6.2 – 7.0 g/cm ³
Gözenek oranı	> %18
Çapsal basma mukavemeti	120 – 230 MPa
Bronz, bronz-grafit, bronz-demir-grafit.	

4.2.3 Yüksek Gözenekli Parçalar

Yüksek gözenek oranına sahip T/M parçalar sıvı ve gaz filtresi olarak, pnömattikte gürültü susturucu olarak, gaz ocağında ateş bariyeri olarak kullanılır. Gözenekli elektrot, diyafram yapımında ve kimya endüstrisinde katalizör taşıyıcı olarak yüksek gözenekli T/M parçalar kullanılır. Şekil 4.4'de yüksek gözenekli filtreler görülmektedir. Çizelge 4.4'de yüksek gözenekli T/M parçaların özellikleri özetlenmiştir.



Şekil 4.4 Yüksek gözenekli filtreler. [6]

Çizelge 4.4 Yüksek gözenekli toz metalürjik parçaların özellikleri. [6]

Çekme mukavemeti	15 – 120 MPa
Gözenek oranı	%25 – 52
Filtreleme derecesi	3 – 100 mm
Maksimum çalışma sıcaklığı	< 450°C
Krom-nikel, krom-nikel-molibden-paslanmaz çelik.	

4.2.4 Yumuşak Manyetik Parçalar

Yumuşak manyetik T/M parçalar elektrik motorlarında ve elektrik ölçü aletlerinde kutup olarak kullanılır. Küçük elektrik motorlarının kabı olarak da kullanılabilir. Şekil 4.5’de T/M ile üretilmiş yumuşak manyetik parçalar görülmektedir. Çizelge 4.5’de yumuşak manyetik parçaların özellikleri özetlenmiştir.



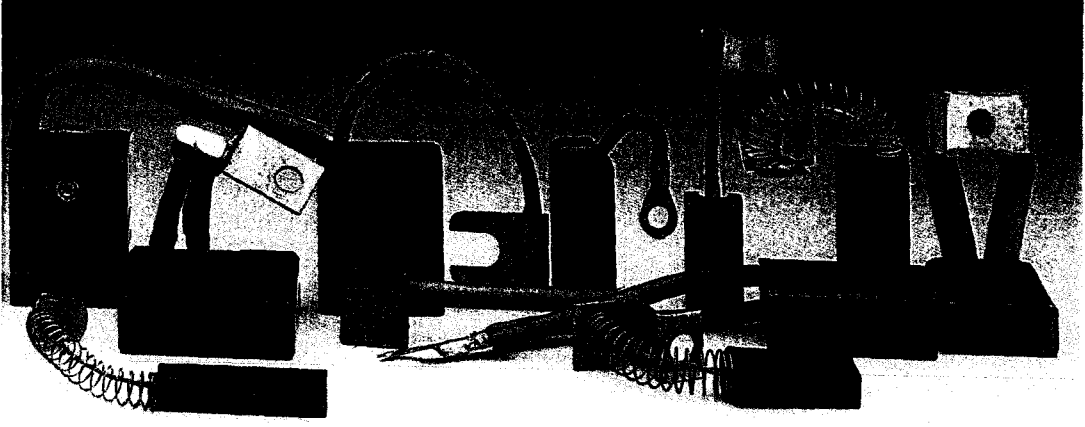
Şekil 4.5 Yumuşak manyetik parçalar. [7]

Çizelge 4.5 Yumuşak manyetik parçaların özellikleri. [7]

Yoğunluk	6.4 – 7.4 g/cm ³
Çekme mukavemeti	150 – 350 MPa
Uzama	%8 – 12
Manyetik geçirgenlik	$1.6 - 2.6 \times 10^{-2}$
Manyetik indüksiyon	1.0 – 1.35 T
Fosfor oranı %0.015 ila %0.6 arasında, karbon oranı %0.1'den az olan demir.	

4.2.5 Elektriksel Parçalar

Elektrik kontaklarında ve elektrik direnç kaynak elektrotlarında, bakır – gümüş karışımından, volfram – molibden – nikel karışımından yapılan parçalar kullanılır. Bir elektrik kontağında kontak parçalarının açma kapama sırasında oluşan ısıya ve elektrik arkına dayanıklı olması gerekir. Bu şartlara en uygun parça %90 Ag ile %10 CdO karışımı tozlardan yapılan T/M parçadır (Bakkaloğlu, 2000). Bir diğer elektriksel T/M parça elektrik motorlarında kullanılan fırçalardır. Bu fırçalar motorun miline bağlı bakır plakalara elektrik iletmek için kullanılır. Fırçalar sürekli dönen mile değdiği için sürtünmeye ve oluşan ısıya dayanıklı olmalıdır. Ayrıca fırçaların elektrik iletkenliği yüksek olmalıdır. Motor kömürü de denilen fırça yapımında bakır – grafit tozu karışımı kullanılır. Şekil 4.6'da elektrik motorlarında kullanılan fırçalar görülmektedir.



Şekil 4.6 Elektrik motoru fırçaları. [2]

4.2.6 Sert Kesici Takımlar

Yüksek kesme hızına sahip torna kalemlerinde, freze çakılarında, kaya delme ve petrol kuyusu delme araçlarında T/M ile yapılmış sert uçlar kullanılır. Bu sert uçlar kullanılacakları yere sert lehimlenirler. Sert uçların yapımında volfram karbür WC, titanyum karbür TiC, tantal karbür TaC tozları kullanılır. Bu karbür tozlarını birbirine daha sıkı bağlamak için kobalt tozları ilave edilir. Birleştirme maddesi olarak kullanılan Co %3 – 13 arasında kullanılır. Genel olarak dökme demir ve demir dışı metallerin işlenmesinde kullanılan sert uçlarda ağırlıkça %94 WC, %6 Co bulunur. Çeliklerin işlenmesinde ise %82 WC, %8 TiC ve %10 Co karışımı tozlardan sinterlenmiş uçlar kullanılır. İşleyici uçlarda sırf WC ve Co kullanılırsa metal işleme sırasında aşınma ve yanma görülebilir. WC ile %40 oranında TiC ve TaC kullanılırsa bu sorunlar giderilir (Baydur, 1987).

Günümüzde toz metalürjik yöntemlerle şekillendirilen seramik malzemeler de kesici uç olarak kullanılmaktadır. Bu seramikler Al_2O_3 , $Al_2O_3 - TiC$, sialon (Si-Al-O-N) ve $Al_2O_3 - SiC$ fiberleridir. Sıcak izostatik presleme ile üretilmiş olan sialon uçların kesme hızı 2000 devir/dak'dır. TiN ile kaplı WC uçlarda kesme hızı 800 devir/dak, $Al_2O_3 - TiC$ takımlarda ise 1000 devir/dak'dır (Geçkinli, 1992).

5. TOZ METALÜRJİK PARÇALARDA GÖRÜLEN YAYGIN HATA TİPLERİ

Toz metalürjik parçalarda üretim sırasında sık rastlanılan hatalar; boyutsal değişimler, kalıptan çıkarma çatlakları, parçada yoğunluk değişimleri, mikrolaminasyonlar ve yetersiz sinterlemedir.

5.1 Toz Metalürjik Parçaların Boyutsal Değişimi

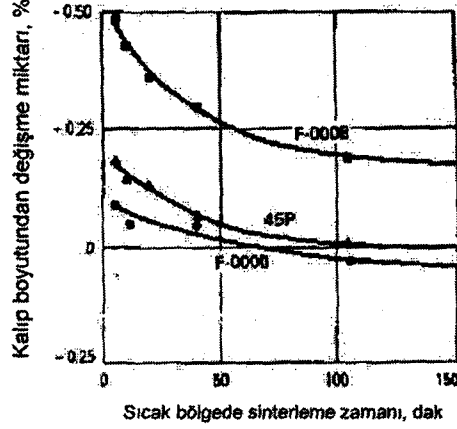
Toz metalürjik parçalarda şu yollarla boyutsal değişimler meydana gelir: Soğuk presleme kalıbından çıkarken yaşanan elastik uzama ya da büzülme; yağlayıcı giderme, önsinterleme ve sinterleme aşamalarında büyüme veya büzülme; soğuk yeniden presleme veya ölçülendirmede elastik boyut değiştirme; sıcak dövme ya da sıcak yeniden presleme sonrası meydana gelen termal büzülme; sıcak veya soğuk preslemede kalıbın zamanla aşınması; mekanik işlemeden kaynaklanan boyut toleransları; tavlama da meydana gelen distorsiyon; karbürizasyon, nitritasyon sırasındaki büyüme veya büzülme; sertleştirme sırasındaki büzülme ve buharla oksidasyonda meydana gelen büyüme. Bunların yanında T/M parçaların boyutsal değişimi tozların bileşimine, preslenmiş parçanın yoğunluğuna, sinterleme zamanına, sinterleme sıcaklığına, sinterleme atmosferine, tozlara katılan yağlayıcılara, toz büyüklüğüne ve şekline bağlıdır. Ticari üretimlerde, presleme ve ısıt işlemler sırasında meydana gelen boyutsal değişimler dikkate alınmalıdır. Parçalar $\pm\%2$ 'ye kadar boyutsal değişimler gösterebilirler.

Tozlar preslendikten sonra kalıptan preslenmiş parça olarak çıkarılır. Preslenmiş parça genelde kalıp boyutundan daha büyük olur. Sinterleme sırasındaki yoğunluk artışı ile beraber parçanın boyutu, kalıp boyutuna ve ondan daha aşağıya inebilir. Çizelge 5.1'de bazı parçalarda sinterleme sonrası görülen boyutsal değişimler verilmiştir.

Çizelge 5.1 Sinterleme sonrası görülen boyutsal değişimler (ASM Vol. 7).

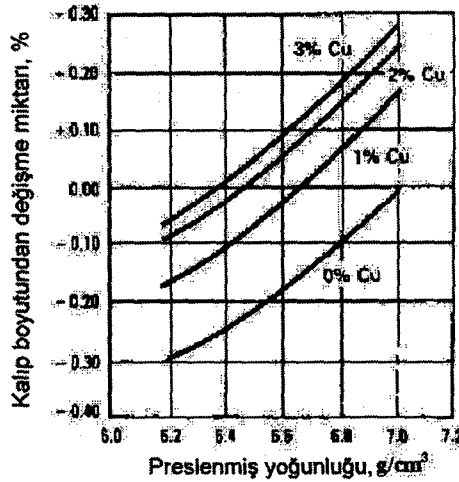
Malzeme	Preslenmiş Yoğunluğu g/cm ³	Boyutsal Değişim %
70Cu-30Zn	7.30	-2.30 ~ -2.60
80Cu-20Zn	7.60	-1.40 ~ -1.60
90Cu-10Zn	7.80	-1.10 ~ -1.40
64Cu-18Zn-18Ni	7.40	-1.25 ~ -1.45
64Cu-16.5Zn-18Ni-1.5Pb	7.50	-1.15 ~ -1.25
303L paslanmaz çelik	6.40	-0.80 ~ -1.60
304L paslanmaz çelik	6.40	-0.40 ~ -1.80
316L paslanmaz çelik	6.40	-0.60 ~ -1.85
410L paslanmaz çelik	6.20	-0.65 ~ -1.95
434L paslanmaz çelik	6.20	-0.65 ~ -2.40

MPIF Standart 10'a göre hazırlanmış 89.61mm uzunluğundaki değişik üç malzemeden yapılan çekme çubuklarının 1120°C'de sinterlenmesi sonrası Şekil 5.1'de görülen boyutsal büzülme görülmüştür.



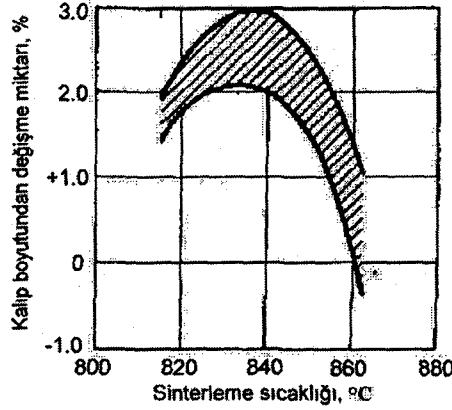
Şekil 5.1 1120°C'de sinterlenmiş, preslenmiş yoğunluğu 6.8 g/cm³ olan üç malzemede görülen büzülme miktarı. 45P: %0.45 ferrofosfor biçiminde fosfor içeren atomize demir. F-0000: saf atomize demir. F-0008: %0.9 grafit içeren demir (ASM Vol. 7).

Demire grafit eklenmesi sonucunda büzülme engellenmez ve elastik boyut değiştirme artar. Düşük karbon oranlarında demir tozlarının sinterleme sonrası boyut değişimi artar. Demir tozlarına nikel karıştırıldığında büzülme miktarı daha hızlı artar. Demirle karıştırıldığında bakır sinterleme sonrası büyümeye yol açar. Preslenmiş parçanın presleme ile yoğunluğu artırıldığında bakır ilavesi ile beraber görülen boyutsal büyüme de artar (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 %0.9 grafit, %0.75 çinko stearat, içeren bakırla karıştırılmış demir tozlarının 1120°C'de 30 dakika ayrılmış amonyak ortamında sinterlenmesi sonucunda görülen boyutsal değişimleri (ASM Vol. 7).

Bakır-kalay bronzunun sinterleme sıcaklığına bağlı boyutsal değişimi Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3 %90 Cu - %10 Sn içeren bronzun çeşitli sıcaklıklarda, 15 dakika, hidrojen atmosferinde sinterlenmesi sonucu görülen boyutsal değişimleri (ASM Vol. 7).

Genel olarak yağlayıcıların oranı ve sinterleme zamanı arttıkça büzülme miktarı da artar. Çelik T/M parçaların karbürizasyonunda emilen karbon ve nitritasyonunda emilen azot parça içinde çözüldüğü bölgelerde boyutsal büyümeye neden olur. Çelikler suda sertleştirildiğinde martenzit dönüşümü meydana gelir ve parça genişler. Çoğu sinterlenmiş çelik sınırlı miktarda sertleşebilir. Belli kalınlıktaki bir dış kabuk martenzite dönüşür ve genişler. İç kısımlar ferrit ve ince perlit olarak kalır, boyutsal değişime uğramaz. Sonuçta parçada kesit boyunca boyutsal değişimlerin farklılığından dolayı bir iç gerilim ortaya çıkar. Parçanın bileşimi, presleme basıncı, sinterleme süresi ve sıcaklığı ayarlanarak boyutsal değişim kontrol altına alınabilir.

5.2 Kalıptan Çıkarma Çatlakları

Presleme sırasında kalıp duvarları ile zımba arasında sıkışan parçada büyük bir büzülme meydana gelir. Bu büzülmeden dolayı oluşan gerilim sıkıştırma basıncına, parçanın uzamasına ve kalıbın rijitliğine bağlıdır. Yaylanma olarak bilinen parça genişmesi kalıptan çıkarılan parçanın boyutu ile kalıp boyutu arasındaki farktır. 600 ile 700 MPa arasında bir basınç ile sıkıştırılmış atomize demir tozlarından yapılmış bir parçada %0,2 genişleme görülür. Kalıptan kısmi olarak çıkarılmış bir parçanın kalıptan çıkan kısmında artık gerilimlerden dolayı bir genişleme meydana gelir. Kalıpta kalan kısım ise kalıp boyutunda kalır. Sonuçta parçada bir kayma gerilimi ortaya çıkar. Eğer kayma gerilimi parçanın, kayma dayanımını aşarsa, Şekil 5.4'de görülen kalıptan çıkarma çatlakları meydana gelir.



Şekil 5.4 Kalıptan çıkarma çatlağı (ASM Vol. 17).

Kalıptan çıkan parçada, çap boyunca olan uzama, kalıbın rijitliğini arttırarak azaltılabilir. Kalıp ile parça arasında bir miktar kalıp boşluğunun bırakılması da parçanın kalıp içinde bir miktar genleşmesini sağlar ve kalıptan çıkan parçada çap boyunca uzama az olur. Çok basamaklı parçalarda homojen, yüksek kaliteli toz kullanmak ve parçanın şekline göre birden fazla zımba kullanmak kalıptan çıkarma çatlaklarını azaltır.

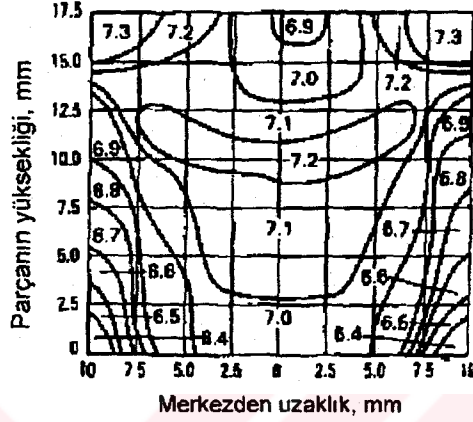
5.3 Hetorejen Yoğunluk Dağılımı

Preslenen T/M parçalarda parça geometrisinden ve preslemedeki güçlüklerden dolayı hetorejen yoğunluk dağılımı görülür. Örneğin teorik yoğunluğun %80'ine ulaşıncaya kadar preslenmiş düzgün geometriye sahip bir silindir parçasında dahi %72'den %82'ye kadar uzanan bir yoğunluk dağılımı görülür.

Bir katı kapta hapsedilmiş sıvıya hidrostatik basınç uygulandığında, sıvı basıncı kabın her tarafına eşit olarak iletir. Tozlarda durum daha farklıdır. Preslemenin ilk anlarında toz kalıp boşluğuna akarak kendini yayabilir. Ancak presin basıncı arttıkça toz taneleri arasındaki ve toz ile kalıp duvarları arasındaki sürtünme artar. Tozun hareket kabiliyeti kısıtlanır, sonuçta zımba eksenine paralel yönde kayma gerilimleri ortaya çıkar. Böyle bir kayma gerilimi sonucunda parçada bir yoğunluk gradyenti doğar. Bu yoğunluk gradyentinin mevcut olması parçada her zaman bir çatlak oluşmasına yol açmaz. Ancak parça içindeki bir köşede yoğunluk azalması kaçınılmazı gereken bir hatadır. Aksi takdirde parça yük altına girdiği zaman gerilim en çok bu noktalarda yoğunlaşır ve kırılmaya neden olur.

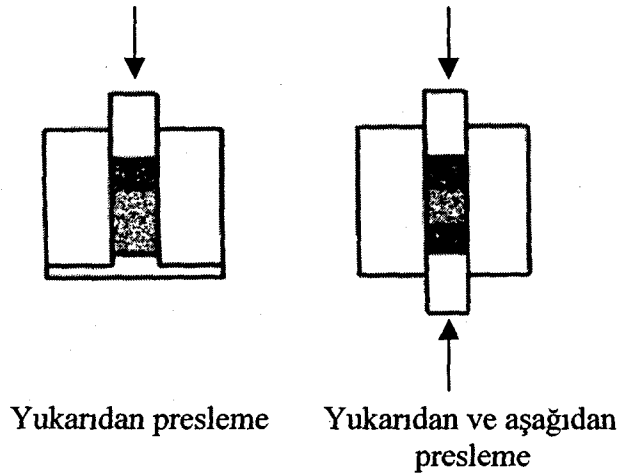
Preslenmiş parçadaki yoğunluk dağılımını bulmak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan biri preslenmiş parçadan enine ve boyuna kesitler alarak yoğunluk ölçmektir. Bir diğer metot ise preslenmiş parçadan düşey yönde kesitler alıp bu kesitlerin sertlik dağılımını bulmaktır. Sertlik değerleri bir kalibrasyon eğrisi ile yoğunluk değerlerine çevrilir. Kalibrasyon eğrisini bulmak için aynı malzemeden çeşitli basınçlarda preslenmiş ince

numunelerin yoğunluğu ve sertliği ölçülür. Şekil 5.5’de bir silindirik nikel parçada, üstten tek zımba kullanıldığında presleme sonucunda oluşan yoğunluk dağılımı görülmektedir. En yüksek yoğunluğa sahip bölgeler silindirin üst köşeleridir. Yoğunluk silindirin yanal kısmında yukarıdan aşağıya doğru azalır. Silindirin iç kısmında kalıp duvarlarıyla parça arasındaki sürtünmenin etkileri daha az görülür. İç kısımdaki yoğunluk dağılımı, dış kısma oranla daha homojendir.



Şekil 5.5 Silindirik nikel parçanın yoğunluk dağılımı (ASM Vol. 7).

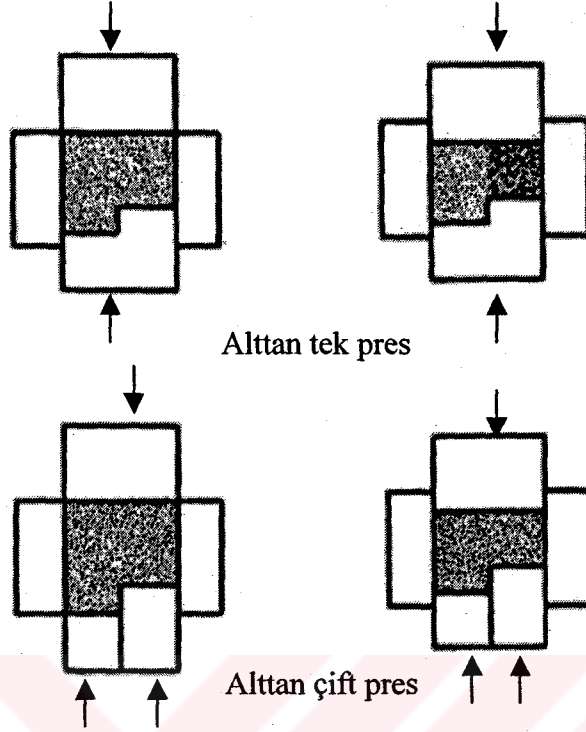
Bu verilerden şu sonuç çıkarılabilir: Preslemede sadece üstten tek zımba kullanıldığında, basınç parça boyunca homojen olarak iletilemez. Tek basamağa sahip bir parçanın preslenmesinde üstten tek zımba kullanmak yerine, alt ve üst olmak üzere iki zımba kullanmak daha homojen yoğunluk dağılımı elde etmemizi sağlar (Şekil 5.6). Şekil 5.6’da gösterilen koyu yerler yoğunluğun daha fazla olduğu bölgelerdir.



Şekil 5.6 Presleme yöntemi ile yoğunluk arasındaki ilişki (ASM Vol. 7).

T/M parçalarda bir basamağın olması, (örneğin flanşlar) parçanın merkezinde bir delik olmasından veya parçanın dişlere sahip olmasından daha çok problem yaratır. Bu tür

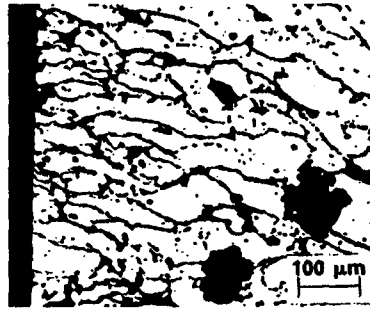
basamaklı parçalarda daha homojen bir yoğunluk dağılımı elde etmek için basamak sayısına göre bağımsız olarak tahrik edilen zimbalar kullanılabilir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 Çok basamaklı parçalarda presleme yöntemi ile yoğunluk arasındaki ilişki (ASM Vol. 7).

5.4 Mikrolaminasyonlar

Zimba eksenine dik yönde, sinterlenmemiş taneler arasındaki tabakalaşma (mikrolaminasyonlar) Şekil 5.8'de görülen mikrografiye sahiptir. Tabakalaşmanın kaynağı ince çatlaklar ve kalıptan çıkarma sonrasında serbest kalan kayma gerilmesidir. İnce çatlaklar çok hızlı preslenen parçalarda görülür. Presleme sırasında içeride kalan hava, parça ile kalıp arasındaki boşluktan dışarı çıkar ve toz tanelerinin birbirine kenetlenmesini önler. Bu tür mikro çatlaklar sinterleme sonrasında düzelmezler. Bu tür çatlakların yönü, standart çekme çubuğunun eksenine yönünde olduğundan ölçülen çekme dayanımında büyük bir değişikliğe yol açmazlar. Ancak mikrolaminasyonlar parçanın çekme özelliklerinde anizotropiye yol açar.



Şekil 5.8 Mikrolaminasyonlar (ASM Vol. 7).

5.5 Yetersiz Sinterlenme

Yeterince kaynaşmamış toz tane sınırları yetersiz sinterlenmeden kaynaklanır. Yetersiz sinterleme şu sebeplerden dolayı ortaya çıkar: Yetersiz sinterleme sıcaklığında ve süresinde sinterleme yapılması, indirgen olmayan atmosferde sinterleme yapılması, sinterleme öncesi yağlayıcıların parçadan iyi bir şekilde uzaklaştırılmamış olması. Yetersiz sinterlenme hatası mikrolaminasyon hatası gibi belli eksenler doğrultusunda değildir. Yeterince sinterlenmemiş parçaların mikrograflarında tozlar arasındaki sınırlar çoktur ve belirgin olarak görülür. Sinterleme miktarı artıkça bu sınırlar kaybolur.



6. TOZ METALÜRJİK PARÇALARA UYGULANAN TAHRİBATSIZ MUAYENELER

Seramik endüstrisinde bitmiş parçanın maliyetinde, üretim sırasında parçalarda meydana gelen hatalardan dolayı hurdaya çıkan malzemenin payı büyüktür. Seramik endüstrisi geçtiğimiz 20 yıl içerisinde bu hataları tahribatsız muayene yöntemlerini kullanarak ve üretim sırasında oluşabilecek hataları önceden tespit ederek minimuma indirmeyi başarmıştır. Toz metalürjik parçalar üzerinde yapılan testler göstermiştir ki, parçanın çatlak direnci artan parça yoğunluğu ile artmaktadır. Üreticiler yüksek yoğunluk elde etmek için iki ayrı presleme yapabilirler. Ancak zamandan tasarruf için tek bir yüksek presleme basıncı ile de yüksek yoğunluk elde edilebilir. Yüksek presleme basıncını kullanmak ve aynı zamanda çatlak oluşumunu önlemek için dikkatli bir malzeme seçimi, parça dizaynı ve pres dizaynı gerekir. Hızlı, pratik bir çatlak kontrolü üretim sürecinde kullanılırsa üretilen parçaların sonuçta birbirinin aynı ve hatasız olması sağlanabilir.

Toz metalürjisi ile üretilmiş parçaların tahribatsız muayenesinde kullanılabilecek yöntemleri şöyle sıralayabiliriz: Boyutsal kontrol, sertlik ölçümü, yoğunluk ölçümü, ultrasonik testler, x-ışını radyografisi, γ -ışını yoğunluk tayini, manyetik parçacıklarla muayene, Eddy akımı ve manyetik köprü testi, elektriksel öz direnç testi, sıvı penetrant muayenesi, metalografik muayene.

1980'lerden sonra bilgisayar ve görüntüleme teknolojilerindeki gelişimler sonucunda ultrasonik, radyografik hatta manyetik parçacık muayenesinde büyük gelişmeler olmuştur.

6.1 Toz Metalürjik Parçaların Boyutsal Kontrolü

Toz metalürjik parçaların boyutsal kontrolü yapılarak şu önemli sonuçlar elde edilir: Tozların özellikleri ve kaliteleri birbirinden ayırt edilebilir, üretilmek istenen parçanın nasıl presleneceği hakkında fikir edinilir, tozlara katılan katışkıların boyutsal değişime katkısı belirlenir. Preslenmiş parçalarda sinterleme sonrası meydana gelecek olan boyutsal değişim ASTM B 610 standardına göre belirlenebilir. Kontrol grubu olarak kullanılan standart tozlardan ve test tozlarından preslenen üçer adet çubuk aynı sinter fırınında, eşit sinterleme zamanında, sinterleme sıcaklığında, sinterleme atmosferinde ve eşit soğuma oranında sinterlenir. Standart çubuğun boyu 31.75mm, eni 12.70mm, kalınlığı 6.35mm'dir. Çubuklar preslenmeden önce kalıp boşluğunun boyu 0.0025mm hassasiyette mikrometre ile ölçülür. Sinterlenen çubukların boyu 0.0025mm hassasiyette ölçülür. (6.1) göre çubukların yüzde boyutsal değişimi hesaplanır.

$$D_1 \text{ veya } D_{st} \% = [(L_s - L_D) / L_D] \times 100 \quad (6.1)$$

D_1 = Test tozlarında yapılan çubukların boyutsal değişimi.

D_{st} = Standart tozlardan yapılan çubukların boyutsal değişimi.

L_s = Sinterlenmiş parçanın boyu.

L_D = Kalıp boşluğunun boyu.

$D = D_1 - D_{st}$ = Göreceli boyut değişimi, (ASTM B 610).

Boyutsal değişimin pozitif olması çubukların kalıp boyutuna göre genleştiğini negatif olması ise büzüldüğünü ifade eder.

Çizelge 6.1’de uzunluk toleransı $\pm 0.102\text{mm}$ olan, 12.7mm ’ye kadar enine sahip olan parçaların en ve kalınlık toleransı verilmiştir. Sinterleme, yeniden presleme (ölçülendirme) ve ısıtma işleme göre farklı toleranslar vardır. Burç gibi parçalarda eşmerkezliliği sağlamak için 0.075mm ’ye kadar olan merkezden kaçıklık değerlerine izin verilir. Toz dövme kalıplama, toz enjeksiyon ve yüksek sıcaklık sinterlemesi tekniklerinde Çizelge 6.1’de verilenlerden daha yüksek toleranslar kabul edilebilir.

Çizelge 6.1 Eni 12.7mm ’ye kadar olan parçaların en ve kalınlık toleransları (ASM Vol. 7).

Malzeme	Sinterlenmiş (mm)	Ölçülendirilmiş (mm)	Isıl İşlenmiş (mm)
Pirinç	± 0.089	± 0.013	
Bronz	± 0.089	± 0.013	
Alüminyum	± 0.051	± 0.013	± 0.013
Demir	± 0.025	± 0.013	
Bakır-çelik alaşımı	± 0.038	± 0.025	± 0.038
Nikel-çelik alaşımı	± 0.038	± 0.025	± 0.038
Paslanmaz çelik	± 0.025	± 0.013	

Endüstride toz metalürjik parçaların boyutsal kontrolünde kumpaslar, merkezden kaçıklık kontrolünde kompratörler kullanılır. Ölçümlerde istenilen boyut toleransında ölçüm yapabilecek cihazlar kullanılmalıdır.

6.2 Toz Metalürjik Parçaların Sertlik Kontrolü

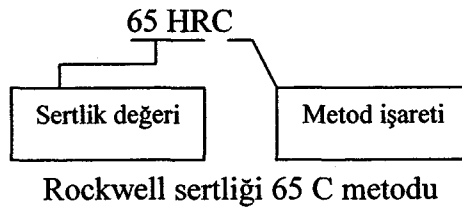
T/M parçalarda sertlik önemli bir büyüklüktür. Sertlikle aşınma direnci birbiri ile yakından ilgilidir. Artan sertlik değerleri ile beraber aşınma direnci de artar. Statik sertlik ölçümlerinde genel yöntem sert bir uca belli kuvvet uygulayarak parça üzerinde bir iz oluşturmaktır. Ucun sertliği malzemenin sertliğinden daha fazladır. Uçlar genelde belli ölçülerdeki elmas veya sert bilyalardan yapılır. Uca belli kuvvetler uygulandıktan sonra parça üzerinde oluşan izin büyüklüğü optik ya da mekanik olarak ölçülür. İzin büyüklüğü kullanılarak sertlik hesaplanır.

T/M parçalar çok geniş bir sertlik spektrumuna sahip olacağı için üretilen parçanın malzemesine uygun olan sertlik ölçme metodu kullanılır. Çizelge 6.2’de malzeme cinsine göre kullanılan sertlik ölçme metotları özetlenmiştir.

Çizelge 6.2 Toz metalürjik parçaların sertlik ölçümünde kullanılan yaygın ölçekler (ASM Vol. 7).

Malzeme	Sinterlenmiş Parçaların Sertlik Ölçeği	Isıl İşlenmiş Parçaların Sertlik Ölçeği
Demir	HRH, HRB	HRB, HRC
Demir – karbon	HRB	HRB, HRC
Demir – nikel – karbon	HRB	HRC
Çelik	HRB	HRC
Bronz	HRH	
Pirinç	HRH	

Rockwell sertlik ölçümünde sertlik, bir dalıcı ucun parça üzerinde oluşturduğu izin derinliğinden bulunur. Sertliği ölçülecek olan parçanın yüzeyi oksit, kir ve pastan arınacak şekilde temizlenir. Parça üzerine, sertlik ölçüm cihazı yardımıyla 10 kg’lık bir ön yük yüklenir. Ön yüklemede malzeme yüzeyi ile temas sağlanır ve esas yükleme için bir başlangıç noktası sağlanmış olur. Ön yüklemeden sonra parçaya esas yük 10-30 saniye içerisinde verilir. Dalıcı ucun malzemeye girmesinden sonra malzemede kalıcı ve elastik bir derinlik meydana gelir. Esas yükün kaldırılması ile kalıcı derinlik ortaya çıkar. Bu derinlik sertliğin hesaplanmasında kullanılan derinliktir. DIN 50 103’e göre çeşitli standart Rockwell ölçeklerine göre kullanılması gereken ön ve esas yüklerin değerleri Çizelge 6.3’te verilmiştir. Rockwell sertlik ölçümünde dalıcı uç malzemeye hiç batmamış ise sertlik 100 HRC, 0.2 mm batmışsa 0 HRC’dir. Çizelge 6.4’de çeşitli Rockwell sertlik ölçeklerine göre sertliğin hesaplanmasında kullanılan formüller verilmiştir. Sertlik ölçüldükten sonra değeri şöyle ifade edilmelidir (Kulaksız, 2000).



Çizelge 6.3 Toz metalürjik parçaların standart Rockwell sertlik ölçümünde kullanılan yaygın ölçekler (Kulaksız, 2000).

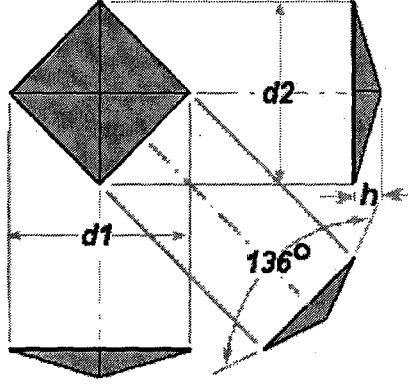
Metod	Dahici Uç	Ön Kuvvet F_0 (N)	Esas Kuvvet F_1 (N)	Esas Deney Yüğü (kg)
HRA	120° konik açılı elmas	98.07	588.4	60
HRB	1.5875 mm çapında sert çelik bilye	98.07	980.7	100
HRC	120° konik açılı elmas	98.07	1471	150
HRH	3.175 mm çapında sert çelik bilye	98.07	588.4	60

Çizelge 6.4 Rockwell sertlik ölçümünde kullanılan formüller (Kulaksız, 2000).

Metod	Rockwell Sertliği
HRA HRC	$100 - \frac{t_b}{0.002\text{mm}}$
HRB HRF	$130 - \frac{t_b}{0.002\text{mm}}$
t_b = Ucun içeri batma derinliği	

T/M parçaların mikrosertlik ölçümü 100g ve yukarısı yüklerle Knoop veya elmas piramit uç yardımıyla yapılır. Atomize demir tozundan yapılan parçalarda Knoop uç iyi sonuçlar verir. Uç nadir olarak gözeneklere girer. İç gözeneğe sahip tozlardan yapılan parçalarda elmas uçla sertlik ölçümü yapılabilir. Sertleştirilmiş çeliklerin sertlik ölçümünde oluşan izin belirgin olarak görülebilmesi için %2'lik nital ile 6s kadar dağlama yapılır.

Sert metallerin sertlik ölçümünde Avrupa'da ISO 3878 standardına uygun olarak HV30 (Vickers, 30kg yük) kullanılır. Amerika ve Japonya'da ise ASTM B 294 standardına uygun olarak HRA (Rockwell A, 60kg) sertlik ölçümü yapılır. ISO 3878'e göre sert metallerin Vickers sertlik ölçümünde kullanılan aletler parçaya 9.807 N ila 490.3 N arasında kuvvetler (HV1 ila HV50) uygulayabilmelidir. Parçaya giren ucun kare tabanlı bir elmas piramit olması gerekir. Piramidin yüzeyleri arasındaki açı 136° dir. Parçaya uygulanan kuvvetten sonra oluşacak olan izin iki köşegen uzunluğunun ortalaması alınır (Şekil 6.1). (6.2)'ye göre Vickers sertlik değeri hesaplanır.



Şekil 6.1 Vickers sertlik testinde oluşan iz. [8]

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$HV = 0.1891 \frac{F}{d^2} \quad (6.2)$$

F = Uygulanan deney kuvveti, N.

d = Köşegen uzunluğu ortalaması, mm, (Kulaksız, 2000).

Parçaya uygulanan kuvvetten sonra parçada oluşacak olan izin ölçümünde kullanılacak olan cihaz; d oluşan izin köşegen uzunluğu olmak üzere şu hassasiyete sahip olmalıdır:

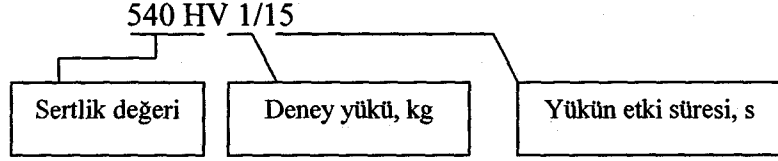
$$d < 100 \mu\text{m}: \pm 0.2 \mu\text{m}$$

$$100 \mu\text{m} \leq d \leq 200 \mu\text{m}: \pm 1.0 \mu\text{m}$$

$$d \geq 200 \mu\text{m}: \pm \%0.5$$

Parçanın sertliğini ölçmeden önce yüzeyden en az 0.2 mm kalınlığında bir tabaka zımparalanarak uzaklaştırılmalıdır. Parça zımparalamadan sonra 1µm'lik elmas pasta ile ince tüylü döner diskte parlatılmalıdır. Eğer parça eğri bir yüzeye sahipse, düz bir yüzey hazırlanmalı ve sertlik ölçümü bu yüzey üzerinden yapılmalıdır. Test parçası en az 1mm kalınlığında olmalıdır ve seçilen sertlik ölçme kuvvetinde kırılmamalıdır. Ölçme sırasında parça yer değiştirmemelidir. Girici uç parçaya tatbik edildikten sonra esas yükleme kuvvetine 2s ila 8s arasında ulaşılmalıdır. Test kuvveti parçaya 10s ila 15s arasında etkimelidir. Parça üzerinde mümkünse üç farklı yerden sertlik ölçümü yapılmalıdır. Parçanın kenarı ile oluşan izin merkezi arasında, iz köşegeninin ortalama uzunluğunun 2.5 katı kadar mesafe olmalıdır. Yan yana olan iki izin merkezleri arasında, büyük izin köşegeninin ortalama uzunluğunun

3 katı kadar bir mesafe olmalıdır. Vickers sertlik ölçümünde parça kalınlığı 1.5d'den büyük olmalıdır. Ölçülen sertlik değeri şöyle ifade edilmelidir (Kulaksız, 2000).



Vickers sertliği 540

6.3 Toz Metalürjik Parçaların Yoğunluk Ölçümü

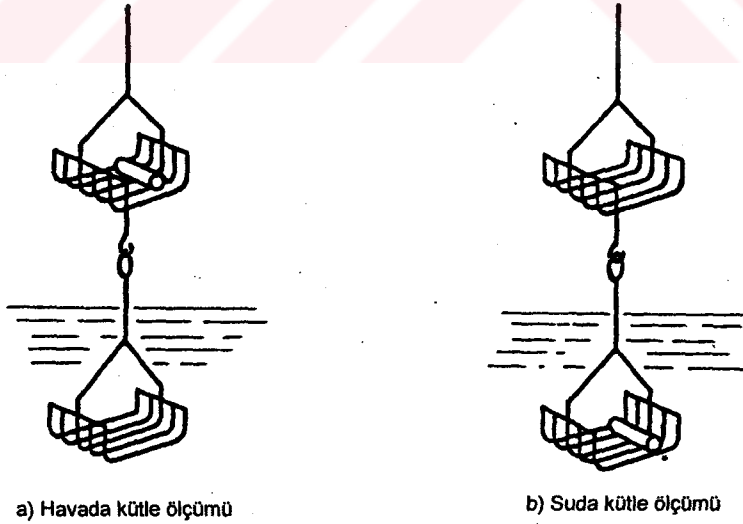
T/M parçalarda yoğunluk, parçanın mekanik ve fiziksel özelliklerinde doğrudan rol oynar. Sinterlenmiş çeliklerde artan yoğunlukla birlikte, çekme mukavemeti, uzama ve çentik darbe mukavemeti artar. Preslenmiş parçaların yoğunluk dağılımı ile sinterleme sırasında meydana gelen genleşme veya büzülmenin şekli birbirine bağlıdır. Preslenmiş parçada homojen olmayan yoğunluk dağılımının bulunması, sinterleme sırasında parçanın farklı bölgelerinin farklı miktarlarda genleşmesine veya büzülmesine yol açar. Sonuçta parça istenilen boyut toleransında elde edilemez ve yeniden preslenip istenilen boyutlara getirilmesi gerekir. Eğer preslenmiş parçada yoğunluk, belli bölgelerde çok miktarda farklılık gösteriyorsa sinterleme sonrası çatlak oluşma riski vardır. Yoğunluğun bu önemli özelliklerinden dolayı üretimde sürekli olarak kontrol edilmesi gerekir. İmalat endüstrisinde saatte üretilen parça miktarına bağlı olarak belli aralıklarla, üretilen parçalardan örnekler alınarak yoğunluk ölçümü yapılır. Çok basamaklı bir parçanın ilk kez üretilmesinde kullanılacak olan pres kalıplarının dizaynı ve presleme basıncı, kontrollü olarak yapılan yoğunluk ölçümleri ile belirlenebilir. En homojen yoğunluk dağılımını veren pres kalıbı dizaynı ve pres basıncı üretimde kullanılır.

T/M parçalar küp, silindir gibi düzgün bir geometriye sahipse, hacimleri ve kütleleri ölçülerek yoğunlukları hesaplanabilir. Bu yöntemle standart referans olarak hazırlanmış numunelerden %0.5, 0.04 g/cm³ sapmalarla yoğunluk ölçülebilir. Hassasiyet istenen durumlarda ve karışık geometriye sahip parçalarda yoğunluk ölçümü Arşimet prensibine göre yapılır. Arşimet prensibine göre bir cisim sıvıya batırıldığı zaman üzerine etkiyen kaldırma kuvveti, cismin sıvı içerisindeki hacmi ile sıvının yoğunluğunun çarpımına eşittir. Ayrıca cismin havadaki ağırlığı ile sudaki ağırlığının farkı cismin hacmi ile sıvının yoğunluğunun çarpımına eşittir. Bu prensipten yararlanılarak T/M parçaların yoğunluğu, yoğunluğu iyi bilinen bir sıvıya daldırılarak hesaplanabilir. Bu sıvı genelde sudur.

6.3.1 Gözenekleri Sıvı Geçirgen Olmayan Toz Metalürjik Parçaların Yoğunluk Ölçümü

Tozlarına %0.75 yağlayıcı katılarak preslenmiş ve sinterlenmemiş parçaların gözenekleri, parça suya batırıldığı zaman suyu içine almaz. Bunun sebebi parça üzerindeki ince kuru yağ tabakasının ve yayılmış toz tabakasının suyu geçirmemesidir. Sinterlenmiş parçalarda ise teorik yoğunluğa çok yakın sinterlenmiş parçaların yüzeyleri içeriye su girmesini önler. Böyle gözenekleri su geçirgen olmayan parçaların yoğunluk ölçümünde ISO 3369 kullanılabilir. ISO 3369'a göre yoğunluk ölçümünde parçanın önce havadaki kütlesi sonra da yoğunluğu belli olan bir sıvı içindeki kütlesi ölçülür. Daha sonra bir formül yardımıyla yoğunluğu hesaplanır.

ISO 3369'a göre kütle ölçümünde kullanılacak hassas teraziler 10g'a kadar olan kütleleri $\pm 0.1\text{mg}$ hassasiyette, 10g yukarısındaki kütleleri ± 0.001 hassasiyette ölçebilmelidir. Terazinin ağırlıkları varsa (dijital terazi olmayan durumda) bunlar kalibre edilmelidir ve yoğunlukları 7g/cm^3 'ten az olmamalıdır. Kütle ölçümlerinde Şekil 6.2'de görülen telden yapılan bir düzenek kullanılır. 10cm^3 'ten az hacme sahip parçaların kütle ölçümünde parça sıvıya tamamen battıktan sonra kaptaki sıvının yükselme miktarı 2.5mm 'den az olmamalıdır. Bunun için 10cm^3 'ten az hacme sahip parçalar için sıvı kabı ölçekli olarak yapılmalıdır. Sıvıda kütle ölçmek için genelde su kullanılır. Su distile edilmiş, gazı alınmış olmalıdır. 1, 2 damla ıslatma ajanı kullanılabilir. Yoğunluğu ölçülmek istenen parçanın hacmi en az 0.5cm^3 olmalıdır.



Şekil 6.2 Yoğunluk ölçmede kullanılan düzenek (ISO 3369).

Şekil 6.2'teki düzenek kullanılarak parçanın önce havadaki kütlesi daha sonra sudaki kütlesi ölçülür. Kullanılan sıvının sıcaklığı ölçülür. (6.3)'e göre yoğunluk hesaplanır.

$$\rho = \frac{m_1 \times \rho_1}{m_2} \quad (6.3)$$

ρ = Toz metalürjik parçanın yoğunluğu, g/cm³.

ρ_1 = Suyun veya kullanılan sıvının test sıcaklığındaki yoğunluğu, g/cm³. (4 basamağa kadar bilinmesi gerekir)

m_1 = Parçanın havada ölçülen kütlesi, g.

m_2 = Parçanın havada ölçülen kütlesi – parçanın suda ölçülen kütlesi ($m_{\text{havada}} - m_{\text{suda}}$), g, (ISO 3369).

6.3.2 Gözenekleri Sıvı Geçirgen Olan Toz Metalürjik Parçaların Yoğunluk Ölçümü

%70 - %90 arasında yoğunluğu sahip sinterlenmiş parçalarda suda ağırlık ölçümü sırasında su gözeneklerden içeri girer. Bu suyun kaldırma kuvvetini azaltır ve hacim gerçeğinden daha küçük olarak ölçülür. Sonuçta parçanın yoğunluğu olduğundan daha büyük olarak ölçülür. Bunu önlemek için ASTM B 328, ISO 2738 ve MPIF 42 standartlarında da yapılması zorunlu olan gözenekleri yağ ile doldurma işlemi yapılır. Bu işlem sonucunda su gözeneklere giremez. ASTM B 328'e göre bu işlem iki yoldan yapılabilir. Birincisinde vakum kullanılır ve tercih edilen yöntem budur. Oda sıcaklığındaki yağ içerisine daldırılmış numune üzerindeki hava basıncı bir vakum pompası yardımıyla 50mmHg basıncına kadar düşürülür. Bu ortamda numune 30 dakika kadar bekletilir. Böylece düşük vakum sırasında numunenin gözeneklerinin içindeki hava dışarı çıkar. Daha sonra odanın basıncı atmosfer basıncına çıkarılır ve numune yağın içerisinde 10 dakika bekletilir. Yüksek basıncın etkisi ile yağ gözenekleri doldurur. İkinci yöntemde ise numune 82 ± 5°C sıcaklığındaki yağda en az 4 saat bekletilir ve oda sıcaklığındaki yağa batırılarak soğutulur.

Yoğunluk ölçme işlemi ise şöyle yapılır. Numunenin yağ emdirme işleminden önce kuru olarak havadaki kütlesi ölçülür. Yağ emdirme işleminden sonra numunenin gene havadaki kütlesi ölçülür. Sonra Şekil 6.2'deki düzeneğe kullanılarak numune distile edilmiş suya daldırılır ve kütle ölçümü yapılır. Su seviyesi numunenin üzerinde en az 6.4mm olmalıdır. Deney sırasında parça üzerinde ve suda hava kabarcığının oluşmamasına dikkat edilmelidir. En son, suya daldırılan düzeneğin ağırlığı ölçülür. (6.4)'e göre yoğunluk hesaplanır.

$$D = \left(\frac{A}{B - C + E} \right) D_w \quad (6.4)$$

D = Numunenin yoğunluğu, g/cm³.

A = Kuru numunenin havadaki kütlesi, g.

B = Yağ emdirilmiş numunenin havadaki kütlesi, g.

C = Yağ emdirilmiş numunenin ve tel düzeneğin sudaki kütlesi, g.

E = Tel düzeneğin sudaki kütlesi, g.

D_w = Suyun numunenin daldırıldığı zamanki sıcaklıktaki yoğunluğu, g/cm³, (ASTM B 328).

Bazı teraziler tel düzeneğin kütlesini sıfırlayarak numunenin kütlesini ölçebilir. Örneğin bu özelliğe sahip dijital terazi kullanıldığında yoğunluk (6.5)'e göre hesaplanabilir.

$$D = \left(\frac{A}{B - F} \right) D_w \quad (6.5)$$

F = Tel düzeneğin kütlesi sıfırlanmış, yağ emdirilmiş numunenin sudaki kütlesi, g.

D, A, B, D_w (6.4)'de tanımlandığı gibidir (ASTM B 328).

Yoğunluk ölçmede kullanan yöntemler kullanılarak T/M parçaların içindeki birbirine bağlı gözenek oranı da hesaplanabilir. Birbirine bağlı gözenek oranı ile sinterleme hakkında fikir edinilebilir. Örneğin sinterlemenin ileri aşamalarında gözenek kanalları kapanmaya başlar ve birbirinden bağımsız yuvarlak gözenek sayısı artar. Sonuçta birbirine bağlı gözenek oranı azalır. (6.6) veya (6.7) kullanılarak birbirine bağlı gözenek oranı bulunur.

$$P = \frac{B - A}{(B - C + E) \times S} \times 100 \quad (6.6)$$

$$P = \frac{B - A}{(B - F) \times S} \times 100 \quad (6.7)$$

P = Birbirine bağlı gözenek hacim oranı, %.

S = Gözenekleri doldurmada kullanılan yağın deney sıcaklığındaki özgül ağırlığı.

A, B, C, E, F (6.5) ve (6.4)'de tanımlandığı gibidir (ASTM B 328).

Kendinden yağlamalı burçlarda iyi bir yağlama elde etmek için burcun gözeneklerine yeterli miktarda yağ emdirilmiş olması gerekir. Burçlarda birbirine bağlı gözenek oranı maksimum yağ depolama miktarının bir göstergesidir. Sanayide yağ emdirmek için çok düşük basınçlar kullanmak maliyetli olacağı için birbirine bağlı gözenekler yağ ile tam olarak doldurulamaz.

Bir burca ne miktar yağ emdirildiği (6.8) veya (6.9) kullanılarak yüzde yağ hacim oranı ile belirlenir.

$$P_1 = \frac{J - A}{(B - C + E) \times S} \times 100 \quad (6.8)$$

$$P_1 = \frac{J - A}{(B - F) \times S} \times 100 \quad (6.9)$$

P_1 = Yağ hacim oranı, %.

J = İmalatçıdan gelen yağ emdirilmiş parçanın kütlesi, g, (ASTM B 328).

Yağ emdirilmiş burcun kuru olarak havadaki kütlesini ölçmek için yağın; Soxhlet cihazı ile toluol veya ether kullanılarak uzaklaştırılması gerekir. Yağ uzaklaştırma işleminden sonra parça içinde kalan çözücüler 120°C'de 1 saat ısıtılarak buharlaştırılır. Yağ uzaklaştırmak için kullanılabilecek başka bir yöntem ise parçayı 1, 2 dakika kadar 420 – 650°C arasında koruyucu atmosfer altında ısıtmaktır.

6.3.3 Toz Metalürjik Parçalarda Gözenek Oranı ile Mekanik Özellikler Arasındaki İlişki

T/M parçalar değişik hacim oranlarında gözenekliğe sahiptir. Gözenek hacim oranı, parçanın içindeki gözenek miktarı hakkında bize doğrudan bilgi verir. Bir T/M parçanın gözenek hacim oranını hesaplayabilmek için parçanın üretildiği malzemenin gözeneksiz, %100 yoğun, teorik yoğunluğunu bilmemiz gerekir. (6.10) kullanılarak gözenek hacim oranı bulunabilir.

$$P = 1 - \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) \quad (6.10)$$

P = Gözenek hacim oranı.

ρ = Toz metalürjik parçanın yoğunluğu.

ρ_0 = Gözeneksiz malzemenin teorik yoğunluğu (%100 yoğunluk) (Roth vd., 1991).

Yüzde gözenek hacim oranını hesaplamak istersek P 'yi 100 ile çarparsınız. Parçanın teorik yoğunluğun yüzde kaçına sahip olduğunu öğrenmek için (6.11) veya (6.12) kullanılabilir.

$$\rho' = (1 - P) \times 100 \quad (6.11)$$

$$\rho' = \frac{\rho}{\rho_0} \times 100 \quad (6.12)$$

Gözenek oranı ile parçanın yoğunluğu arasındaki ilişki (6.10)'dan çıkarılabilir. (6.13)

$$\rho = \rho_0(1 - P) \quad (6.13)$$

Artan gözenek hacim oranı ile beraber parçanın yoğunluğu azalır. Gözenek oranı ile sinterlenme arasında yakın ilişki mevcuttur. Sinterlenme sırasında toz taneleri arasında boyunlar oluşur, bu boyunlar büyür ve gözenek kanalları kapanır. Yeterince sinterlenmiş parçalarda gözenek hacim oranı azdır ve yoğunluk %100 yoğunluktaki malzemenin yoğunluğuna yakındır. Gözenek oranı ölçülerek üretim sırasında yeterli sinterlemenin yapıp yapılmadığı kontrol edilebilir.

Artan gözenek hacim oranı ile elastik büyüklüklerin nasıl değişeceğini açıklayan teorik modeller ortaya atılmıştır. Elastisite teorisi ile yapılan modelde gözenekler düzgün küreler olarak kabul edilmiştir. Bu modele göre elastik büyüklüklerin ve ultrasonik dalganın yayılma hızının gözenek hacim oranına göre değişimi (6.14), (6.15), (6.16), (6.17) ve (6.18) ile verilir.

$$E = E_0(1 - C_E P) \quad (6.14)$$

$$G = G_0(1 - C_G P) \quad (6.15)$$

$$V_1 = V_{10}(1 - C_1 P) \quad (6.16)$$

$$V_s = V_{s0}(1 - C_s P) \quad (6.17)$$

$$\nu = \nu_0(1 - C_\nu P) \quad (6.18)$$

E = T/M parçanın elastiklik modülü.

E_0 = %100 yoğunluktaki malzemenin elastiklik modülü.

P = Gözenek hacim oranı.

G = T/M parçanın kayma modülü.

G_0 = %100 yoğunluktaki malzemenin kayma modülü.

V_1 = T/M parçada boyuna ultrasonik dalgaların yayılma hızı.

V_{10} = %100 yoğunluktaki malzemede boyuna ultrasonik dalgaların yayılma hızı.

V_s = T/M parçada enine ultrasonik dalgaların yayılma hızı.

V_{s0} = %100 yoğunluktaki malzemede enine ultrasonik dalgaların yayılma hızı.

ν = T/M parçanın poisson oranı.

$v_0 = \%100$ yoğunluktaki malzemenin poisson oranı.

$$C_E = 1/18(29 + 11v_0)$$

$$C_G = 5/3$$

$$C_1 = 1/2 \{ C_E + 2C_v v_0^2 (2 - v_0) / [(1 - v_0)(1 + v_0)(1 - 2v_0)] - 1 \}$$

$$C_s = 1/3$$

$$C_v = 5/9 + 11v_0/18 - 1/(18v_0) \text{ (Panakkal vd., 1990).}$$

Gözenek hacim oranı arttıkça bu modelin verdiği sonuçların hatası artmaya başlar. Çünkü gözenek hacim oranının artmasıyla beraber, gözenekler küresel biçimden uzaklaşır ve birbirine bağlı gözenek oranı artar.

Bir diğer model olan toz metalürjik yaklaşımda ise seramik ve T/M parçaların, düzgün küresel toz tanelerinin kübik olarak yığılması sonucu olduğu farz edilir. Bu modelde elastiklik ve kayma modülü gözenek hacim oranına göre (6.19) ve (6.20)'deki gibi değişir.

$$E = E_0 \exp(-(bP + cP^2)) \quad (6.19)$$

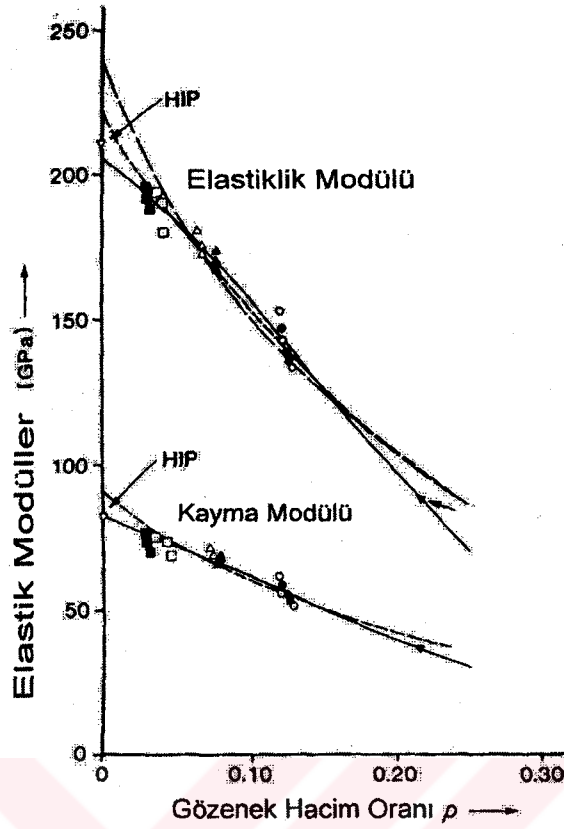
$$G = G_0 \exp(-(bP + cP^2)) \quad (6.20)$$

burada b ve c deneysel verilere göre ayarlanan katsayılarıdır (Panakkal vd., 1990). Bu modelden sapmalar ise; toz tanelerinin kübik olarak dizilmemesi ve küresel olmayan toz tanelerinin olması durumunda meydana gelir. Çeşitli sıcaklıklarda ve değişik sürelerde sinterlenmiş olan Fe numunelerde gözlenen, gözenek hacim oranları Çizelge 6.5'de görülmektedir.

Çizelge 6.5 Demir numunelerin üretim parametreleri ve gözenek hacim oranları (Panakkal vd., 1990).

No	Sembol	Presleme Basıncı (MPa)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (saat)	Gözenek Hacim Oranı (%)
1	○	400	1250	0,5	12,7
2	Δ	600	1250	0,5	7,7
3	□	1200	1250	0,5	4,1
4	○	400	1250	2	12,2
5	Δ	600	1250	2	7,7
6	□	1200	1250	2	4,0
7	○	400	1250	8	12,0
8	Δ	600	1250	8	7,4
9	□	1200	1250	8	3,5
10	●	400	1120	0,5	12,6
11	▲	600	1120	0,5	7,8
12	■	1200	1120	0,5	3,2
13	●	400	1120	2	12,4
14	▲	600	1120	2	7,8
15	■	1200	1120	2	3,2
16	●	400	1120	8	12,4
17	▲	600	1120	8	7,8
18	■	1200	1120	8	3
19	▽	HIP			
20	▼	200	977	1	21,6

20 numaralı numune sıcak izostatik presleme ile üretilmiştir. Artan presleme basıncı ve sinterleme süresiyle beraber gözenek hacim oranı azalır. Şekil 6.3’de artan gözenek hacim oranı ile beraber elastik modüllerin nasıl değiştiği görülmektedir. (— —) $E = E_0 \exp(-ap)$, (— —) $1/E = 1/E_0 + Bp/(1-p)$, (—) $E = E_0 \exp(-(bp + cp^2))$ denklemlerini temsil eder. İçi dolu semboller 1120°C’de, içi boş semboller 1250°C’de sinterlenmiş numuneleri temsil eder.



Şekil 6.3 Elastik büyüklüklerin gözenek hacim oranına göre değişimi (Panakkal vd., 1990).

6.4 Toz Metalürjik Parçaların Ultrasonik Muayenesi

T/M bir parçada ultrasonik dalganın yayılma hızı yüksek frekanslı (MHz mertebesinde) bir ses dalgasının yayılma hızıdır. Parçada yayılan ultrasonik dalganın hızı mikroyapıya dolayısıyla malzemeye, gözenek oranına, yoğunluğa, sinterleme sıcaklığına ve süresine, toz tipine, sinterleme atmosferine ve diğer değişkenlere bağlıdır. Ultrasonik dalganın T/M parçadaki yayılma hızı ile parçanın mekanik özellikleri arasında ilişkiler kurulabilir. Ultrasonik muayenede parçanın içerisinden ultrasonik dalgalar geçirilip hız ölçümü yapılabileceği gibi parçaya ultrasonik dalgalar gönderilerek çeşitli türde taramalar da yapılabilir.

6.4.1 Preslenmiş Parçalarda Ultrasonik Dalgaların Yayılması

Preslenmiş parçalarda toz taneleri arasında yeterince kuvvetli bağlar oluşmadığından dolayı ultrasonik dalgaların büyük bir kısmı sönümlenir. Yapılan bir çalışmada %0,2 grafit eklenmiş atomize demir tozlarından preslenmiş 8mm kalınlığındaki bir parçaya 1-20 MHz frekansları arasında ultrasonik dalgalar gönderilmiştir. Yüksek sönümlemeden dolayı arka cidardan geri yansıyan ultrasonik dalgalar ölçülememiştir. Ön yüzeyden gönderilen dalgaların şiddeti arka yüzeye yerleştirilen bir ultrasonik prob ile ölçülmüştür. Teorik yoğunluğun %87'sine sahip

parçalarda 4-5 MHz frekansa sahip dalgaların şiddeti en yüksek olarak ölçülmüştür. Diğer frekanslardaki dalgalar ise parça tarafından sönümlenmiştir (ASM Vol. 17).

Değişik yoğunluklarda preslenmiş parçalarda yayılan ultrasonik dalgaların hızı yoğunluğa göre değişim göstermez. Bunun sebebi toz taneleri arasında yeterince kuvvetli bağların olmayışdır. Bunların dışında preslenmiş parçalarda gözeneklerin belli doğrultularda yönlenmesi, ultrasonik hız ölçümlerinin değişik doğrultularda, değişik sonuçlar vermesine yol açar. Sonuç olarak preslenmiş parçalarda ultrasonik muayene sönümlemenin yüksek oluşu ve deneylerin tekrarlanabilir olmayışından dolayı kullanılmaz.

6.4.2 Sinterlenmiş Parçaların Ultrasonik Muayenesi

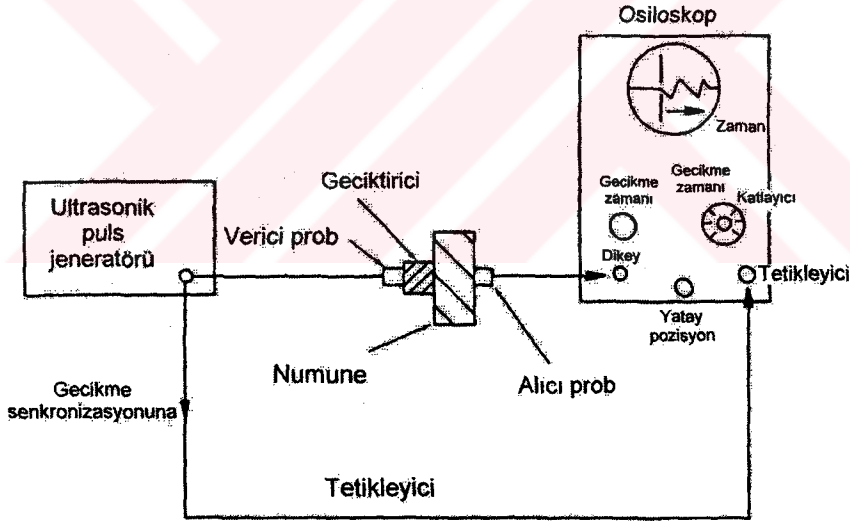
Sinterlenmiş parçalarda toz taneleri aralarında kuvvetli bağlar oluştururlar ve ultrasonik dalga yayılmasını sağlarlar. Ultrasonik hız ölçüm ve tarama cihazlarının temel çalışma yöntemi puls-yansıma metodudur. Puls-yansıma sistemlerinin temel parçaları şöyle sıralanabilir: Bir elektronik saat, elektronik sinyal jeneratörü yani pulser, ultrasonik dalgayı oluşturan ve yollayan bir prob ve ultrasonik dalgayı alıcı bir prob, yansıyan dalgaları yükselten bir yükseltici (amplifikatör) ve bir ekran.

Yaygın olarak kullanılan puls-yansıma sistemlerinde tek bir prob hem ultrasonik dalga verici, hem de alıcı olarak kullanılır. Elektronik saat ve sinyal jeneratörü tek bir elektronik devrede toplanmıştır. Gelen dalgaları yükselten ve şekillendiren devreler de tek bir devrede toplanmıştır. Tek probla çalışan bir sistemde ultrasonik algılama şöyle yapılır. Sinyal jeneratörü belli zaman aralıklarında (genelde saniyede 60-2000 puls arasında) proba yüksek frekansa sahip (1-10 MHz arasında) alternatif akım sinyalleri gönderir. Aynı anda görüntüleme birimine bağlı elektronik saat çalıştırılır. Prob, gelen alternatif akım sinyallerinin frekansına eşit ultrasonik pulslar üretir. Malzeme içerisine giren ultrasonik dalgalar bir çatlakla veya malzemenin arka cidarı ile karşılaştıklarında geri yansır. Yansıyan dalgalar proba geri gelir ve probu titreştirir. Titreşen prob gelen dalga frekansına eşit frekansta alternatif akım üretir. Üretilen akım yükseltilerek görüntü cihazına yollanır. Herbir puls için yukarıdaki süreç tamamlanır. Teorik olarak incelenebilecek maksimum derinlik sinyal jeneratörünün puls üretme sıklığına bağlıdır. Örneğin 10 MHz'lik ultrasonik dalgalar üreten bir alıcı-verici prob, incelenen çelik parçaya saniyede 500 puls yolluyorsa, boyuna dalga, öteki puls üretilmeden parçada 12m ilerleyebilir. Parçanın arka cidarından yansımayı hesaba katarsak, ultrasonik dalga, üretilen pulslar arasındaki zamanda 6m'lik parçayı bir uçtan diğer uca kateder, geri yansır ve proba geri döner. Toz metalürjik parçalarda bu mesafe, malzeme teorik yoğunluğa göre daha az yoğunluğa sahip olduğu için daha az olacaktır.

Çoğu ticari hız ölçüm cihazlarında puls üretim oranı otomatik olarak kontrol edilir. Bu da kullanıcıya büyük kolaylık sağlar. Puls-yansıma metodu ile boyuna, enine, yüzey ve lamb dalgalarının malzeme içerisindeki davranışı incelenebilir. T/M parçaların muayenesinde boyuna ultrasonik dalgalar en sık kullanılan dalga tipidir. Yapılan çalışmalarda T/M parçalarda ultrasonik dalgaların yayılma hızı ile mekanik özellikler arasındaki ilişki; parçada bulunabilecek çatlakları ultrasonik muayene ile tespit etmekten daha fazla araştırılmıştır.

6.4.3 Toz Metalürjik Parçalarda A-Taraması

Ultrasonik A-taraması, temel olarak ultrasonik dalgaların genliğinin zamana bağlı değişimini inceleyen tarama çeşididir. Osiloskop ekranında dikey (y-ekseni) proba gelen ultrasonik dalga genliğini, yatay eksen (x-ekseni) ise geçen zamanı gösterir. A taraması ile çatlakların yeri ve tipi bulunabilir. A-taraması ile ayrıca kalınlık ölçümü yapılabilir ve kalınlığı bilinen malzemelerde ultrasonik dalga yayılma hızı ölçülebilir. Çeşitli T/M malzemelerin dalga emme özellikleri incelenebilir. Şekil 6.4'de A-taraması yöntemiyle ultrasonik hız ölçümü yapan bir cihazın şeması görülmektedir.

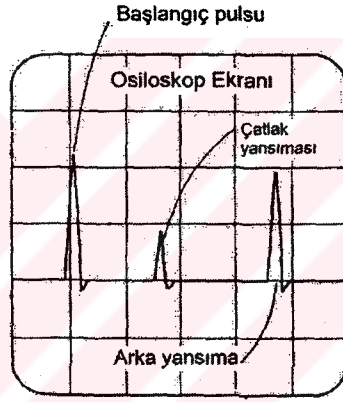


Şekil 6.4 Ultrasonik hız ölçüm cihazının şeması (Patterson vd., 1981).

Burada ultrasonik sinyal jeneratörü isteğe göre 1 ila 10 MHz frekanslarında ultrasonik dalga üretebilir. Sinyal jeneratörünün puls tekrar oranı otomatik ya da ayarlanabilir olabilir. Sinyal jeneratöründen çıkan akımın biri senkronizasyon için osiloskoba diğeri ise gönderici proba iletilir. Probon malzemeye arada hava kalmayacak şekilde temas etmesi gerekir. Bunu sağlamak için prob ve malzeme düşük dereceli yağ ile yağlanmalıdır. Yağlama yapılmaz ise probun oluşturduğu dalgalar havada büyük miktarda sönümlenir ve malzemeye yeterli şiddette iletilemez. Başka bir yöntem ise parçayı ve probu su dolu bir tanka daldırıp inceleme

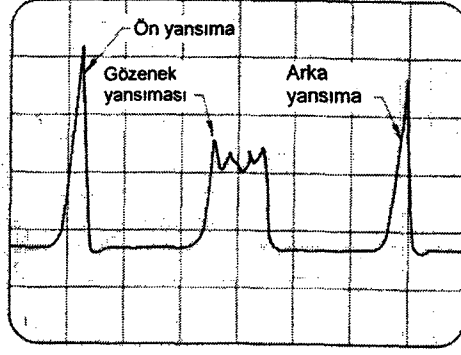
yapmaktır. Su ultrasonik dalgaların sönümlenmeden malzemeye iletilmesini sağlar. Malzemeyi kateden dalgalar alıcı prob tarafından elektrik sinyallerine çevrilerek osiloskoba iletilir. Osiloskoba gelen sinyal, yükseltici tarafından yükseltilir ve sinyal jeneratöründen gelen senkronizasyonu sağlayan sinyal ile karşılaştırılarak ekrana yansıtılır.

Şekil 6.5’da, osiloskop ekranında görülen bir şiddet zaman grafiği görülmektedir. Ekranın en solundaki sinyal incelenen parçanın ön yüzünden proba geri yansıyan dalganın izidir. En sağ tarafta ise parçanın arka cidarından yansıyan ultrasonik dalganın izi görülmektedir. Bu iki iz arasında parça içerisinde bulunan ve gelen dalga cephesine dik yönde olan bir çatlaktan veya süreksizlikten yansıyan dalganın izi görülmektedir. Aslında esas görüntü daha karmaşıktır. Ekranda ön ve arka cidardan birkaç defa yansımış dalga genlikleri de görülür. Bu görüntü osiloskobun yatay pozisyon ve süpürme ayarları ile oynanarak sadece ilk yansımaları içerecek şekilde ayarlanır.



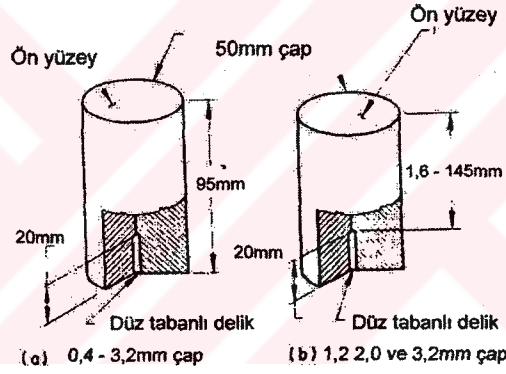
Şekil 6.5 Ultrasonik dalgaların şiddet zaman grafiği (ASM Vol. 17).

A-taramasında ekranda görülen ekonun şekli, çatlakın ya da süreksizliğin şekline, doğrultusuna ve sesi yansıtma özelliğine bağlıdır. Eğer parçada büyük bir gözenek veya çatlak varsa ekranda genişlemiş bir hata ekosu görülür (Şekil 6.6). Ekonun genliğini ise yansıyan ses dalgasının şiddeti belirler. Eğer süreksizlik eğri veya kaba bir yüzeye sahipse ekonun genliği düz yüzeyli süreksizliklerden gelen ekolara göre daha az olur. Parça içindeki herhangi bir süreksizliğin büyüklüğü, boyutları bilinen bir süreksizlikten yansıyan dalganın genliği ile boyutu bilinmeyen süreksizlikten yansıyan dalganın genliği karşılaştırılarak bulunur. Bu karşılaştırma işleminde standart referans blokları kullanılır. Çatlakların veya kusurların yerini ve büyüklüğünü belirlemek için alan-genlik ve uzaklık-genlik blokları kullanılır.



Şekil 6.6 A-taramasında görülen büyük gözenek veya süreksizlik (ASM Vol. 17).

Alan-genlik bloklarında aynı derinlik içerisinde farklı çapta delikler bulunur. Bloklar 50mm çapında 95mm uzunluğunda silindirlerdir. Herbir bloğun tabanında 20mm uzunluğunda farklı çapta delik bulunur. Bu deliklerin çapı bloğun numarasına göre 0,4mm'den 3,2mm'ye kadar değişir. (Şekil 6.7a) Bu blokların ultrasonik testinde delik çapı büyüdükçe ekranda görülen ekonun genliğinin de arttığı gözlenir.



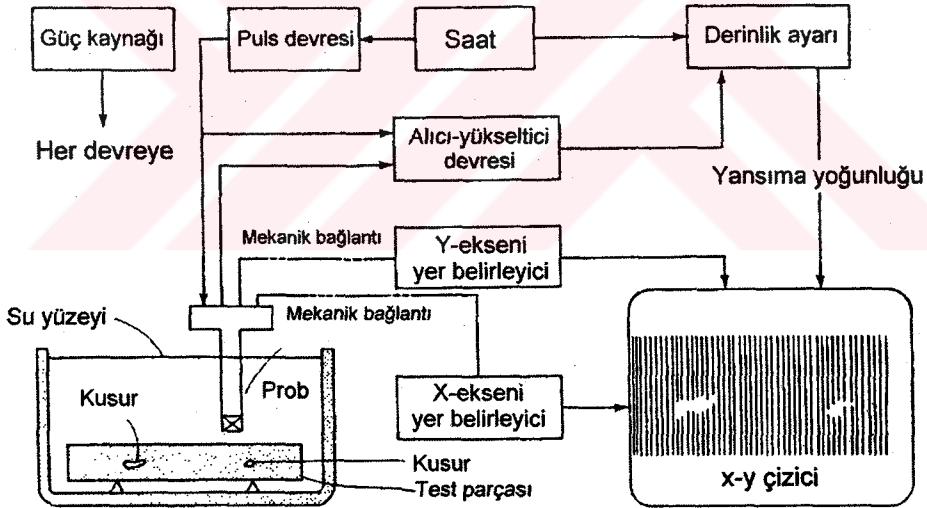
Şekil 6.7 Standart referans blokları. a) Alan-genlik bloğu. b) Uzaklık-genlik bloğu (ASM Vol. 17).

Uzaklık-genlik blokları ise 50mm çapında silindirlerden yapılır. Herbir bloğun tabanında 20mm uzunluğunda düz yüzeyli uca sahip delikler açılmıştır. Blokların uzunlukları üst yüzeyden deliğe kadar 1,6 – 145mm uzunluk olacak şekilde yapılır. Bu bloklarda ekranda görülen, delikten yansıyan dalganın genliği probun deliğe olan uzaklığının karesi ile ters orantılı olarak azalır.

Referans bloklarının hazırlanması ve kullanılması ASTM E 127'ye göre yapılmalıdır. ASTM E 127'de tüm ASTM bloklarının ölçüleri verilmiştir. Ayrıca alüminyum için referans bloklarının nasıl üretileceği de açıklanmıştır. ASTM E 428'de ise standart çelik referans bloklarının üretimi ve kullanımı anlatılmıştır. Ancak bu standartlar gözenekliğe sahip olmayan metal ve alaşımları için geçerlidir. Toz metalürjik parçalarda çatlak kontrolünde kullanılabilecek bir standart günümüzde mevcut değildir.

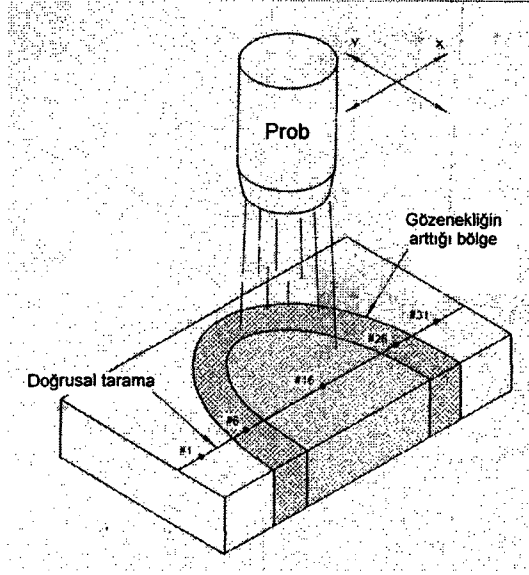
6.4.4 Toz Metalürjik Parçaların C-Taraması

Ultrasonik C-taramasında ultrasonik dalgayı alıcı-verici bir prob parçanın yüzeyini tarar. Tarama şekli paralel doğrular boyunca olduğu gibi spiral desende de olabilir. Bu tarama sonucu parçanın içindeki kusurların büyüklüğü, biçimi ve derinliği tespit edilebilir. C-taramasında, elektronik derinlik ayarlayıcı yardımıyla parçanın belli bir derinlikteki düzlemi incelenebilir. Elektronik derinlik ayarlayıcı devresi gönderilen ilk dalgadan sonra belli bir zaman gecikmesi sonucu proba geri yansıyan dalgaları kabul eder. Böylece devre tarafından kabul edilecek gecikme zamanı ayarlanarak parçanın değişik derinlikteki düzlemleri incelenebilir. Elektronik derinlik ayarlayıcı yardımıyla ön ve arka yansımalar filitrelenerek sadece parça içindeki süreksizliklerden yansıyan dalgaların şiddeti algılanabilir. C-taramasında ekranda kusurlardan yansıyan dalgaların şiddeti ile orantılı koyulukta bir çizgi çizilebileceği gibi kusurların olduğu bölgeler renksiz olarak gösterilip parçanın görüntüsü oluşturulabilir. Genelleme yapacak olursak C-taramasında kusurlar görüntüde oluşan kontrast farkından yararlanılarak bulunur. Şekil 6.8'de C-taramasının çalışma diyagramı görülmektedir.

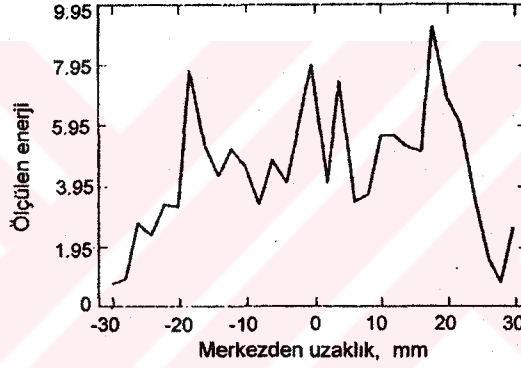


Şekil 6.8 Ultrasonik C-taramasının çalışma diyagramı (ASM Vol. 17).

Şekil 6.9'da merkezi etrafında disk şeklinde gözenekliğe sahip bir SiC plaka görülmektedir. Plakada koyu gözüken bölgeler gözenekliğin daha fazla olduğu bölgelerdir. Doğrusal taramada prob bir doğru boyunca parça üzerinde gezdirilmiştir. Şekil 6.10'de parçanın merkezinden yanlara doğru gidildikçe ölçülen yansıyan dalga enerjileri görülmektedir. Gözenekliğin yüksek olduğu bölgelerde saçılma yüksek olduğundan geri yansıyan dalgaların enerjisi daha fazladır.

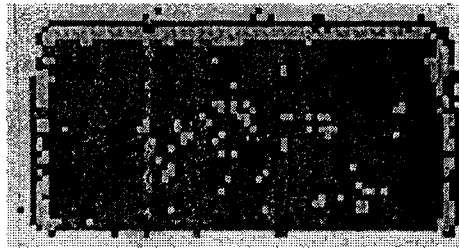


Şekil 6.9 Değişik miktarlarda gözenekliliğe sahip SiC plaka (Kunerth vd., 1989).



Şekil 6.10 Doğrusal taramada yansıyan dalga enerjilerinin gözenek miktarı ile değişimi (Kunerth vd., 1989).

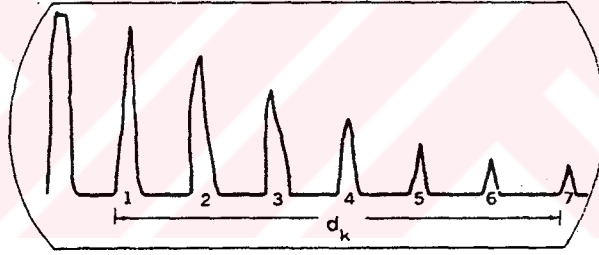
Şekil 6.11’de ise SiC plakanın C-taraması görülmektedir. Bu tarama 3,2mm çaplı, 20MHz’lik ultrasonik dalgalar üreten bir prob ile gözeneklerden saçılan dalga enerjisi ölçülerek elde edilmiştir. 0,5µs içerisinde proba geri gelen dalgalar incelenmiştir. Bu süre plakanın merkezindeki ~3mm kalınlığında bir tabakayı incelemeyi olanaklı kılar. Gri olarak görülen bölgeler çok sayıda gözenekten yansıyan, yani gözenekliliğin yüksek olduğu bölgelerden yansıyan dalgaları temsil eder.



Şekil 6.11 SiC plakanın C-taraması. Gri bölgeler gözenekliliğin yüksek olduğu kısımlardır (Kunerth vd., 1989).

6.4.5 Toz Metalürjik Parçalarda Ultrasonik Hız Ölçümü

Toz metalürjik parçalarda ultrasonik hız ölçümü ASTM E 494'ten yararlanılarak yapılmalıdır. Hız ölçümü yapılacak parçalar 5mm veya daha kalın olmalıdır. Parçanın yüzeyleri birbirine en az $\pm 3^\circ$ paralel olmalıdır. Ortalama yüzey pürüzlülüğü $3,18\mu\text{m}$ veya daha düz olmalıdır. Hız A-taraması yapan bir osiloskop tüpü ile ölçülüyorsa ekran 0,5mm aralıklı ızgara şeklinde skalaya sahip olmalıdır. Hız ölçümleri düz uçlu normal prob ile yapılmalıdır. Ultrasonik dalga gönderen bir verici prob ile dalgaları alan bir alıcı prob kullanılmalıdır. Prob ile T/M parça arasında, ultrasonik dalgaların geçişini sağlayan düşük dereceli katı yağ tabakası oluşturulmalıdır. Sıvı yağ gözeneklerden içeri sızacağı için hız ölçümünde kullanılmamalıdır. Prob parçaya temas ettirilerek ölçüme başlanır. Zaman süpürme kontrolü ayarlanarak birden fazla (genelde 5 ve yukarısı olması gerekir) arka yansıma ekranda görünür hale getirilir. Şekil 6.12'de alıcı-verici prob kullanılarak elde edilmiş bir ekran görüntüsü görülmektedir. Herbir arka yansımada, sinyal parça kalınlığını iki katı mesafeyi katetmiştir. Parçayı kateden ve geri gelen sinyalle, seyahat etmiş sinyal denir. Şekil 6.12'de sinyal, 1 numaralı eko ile 7 numaralı eko arasında 6 kez seyahat etmiştir. Seyahat sayısı arka yansıma sayısının bir eksiğidir.



Şekil 6.12 Parçanın arka cidarından yansıyan dalgaların görüntüsü (ASTM E 494).

Bir T/M parçada boyuna ultrasonik dalganın yayılma hızını ölçmek için önce ultrasonik dalga yayılma hızı bilinen standart numunede 5 veya daha fazla arka yansıma elde edilir. Ekranda görülen ilk arka yansımanın başlangıç ucu ile son arka yansımanın başlangıç ucu arasındaki mesafe ölçülür. Bu işlem basamakları hızı hesaplanmak istenen T/M parça içinde aynen yapılır. Burada dikkat edilmesi gereken konu şudur: Hızı hesaplanacak T/M parçanın malzemesi ile standart numenin malzemesi birbirine yakın ya da aynı olmalıdır. Örneğin çelik bir T/M parçada hız ölçülmek isteniyorsa standart numunenin malzemesi de çelik olmalıdır. T/M parçada boyuna ultrasonik dalgaların yayılma hızı (6.21)'e göre bulunur.

$$v_1 = (d_k n_1 t_1 v_k) / (d_1 n_k t_k) \quad (6.21)$$

v_1 = T/M parçada boyuna ultrasonik dalgaların hızı, mm/s.

v_k = Standart malzemede boyuna ultrasonik dalganın yayılma hızı, mm/s.

d_k = Hızı bilinen standart malzemede birinci arka yansıma ile n.ci arka yansıma arasındaki uzaklık, mm.

n_k = Standart malzemede seyahat sayısı.

t_k = Standart malzemenin kalınlığı, mm.

d_l = T/M parçada birinci arka yansıma ile n.ci arka yansıma arasındaki uzaklık, mm.

n_l = T/M parçada seyahat sayısı.

t_l = T/M parçanın kalınlığı, mm, (ASTM E 494).

Yukarıdaki kalınlıklar 0,02mm kesinlikte ölçülmelidir. Bu yöntemle hız ölçülürken standart numune ile parçanın kalınlığının, seyahat sayısının ve birinci arka yansıma ile n.ci arka yansıma arasındaki uzaklıkların aynı olması gerekmez. T/M parçada enine ultrasonik dalgaların yayılma hızı (6.22)'ye göre bulunur.

$$v_s = (d_l n_s t_s v_l) / (d_s n_l t_l) \quad (6.22)$$

v_s = T/M parçada enine ultrasonik dalgaların hızı, mm/s.

v_l = Standart malzemede enine ultrasonik dalganın yayılma hızı, mm/s.

d_s = Hızı bilinen standart malzemede birinci arka yansıma ile n.ci arka yansıma arasındaki uzaklık, mm.

n_l = Standart malzemede seyahat sayısı.

t_l = Standart malzemenin kalınlığı, mm.

d_s = T/M parçada birinci arka yansıma ile n.ci arka yansıma arasındaki uzaklık, mm.

n_s = T/M parçada seyahat sayısı.

t_s = T/M parçanın kalınlığı, mm, (ASTM E 494).

T/M parçada ultrasonik dalgaların yayılma hızını ölçmek için kullanılan bir başka yöntem de ultrasonik kalınlık ölçer kullanmaktır. Önce hızı ölçülecek T/M parçanın malzemesine yakın malzemeden yapılmış ve hızı bilinen standart blokta ultrasonik kalınlık ölçümü yapılır. Bu ölçümde cihaz standart bloğun kalınlığını doğru olarak ölçmelidir. Eğer doğru değerden sapma varsa kalınlık ölçerin oluşturduğu ultrasonik dalgaların frekansı ve puls-tekrar oranı doğru kalınlık ölçülünceye kadar değiştirilmelidir. Daha sonra T/M parçanın kalınlığı bir mikrometre veya kumpas ile 0.25mm hassasiyette ölçülmelidir. T/M parçanın kalınlığı ultrasonik kalınlık ölçer ile ölçülmelidir ve (6.23)'e göre ultrasonik dalganın yayılma hızı hesaplanmalıdır.

$$v_x = v_1 \frac{L_m}{L_u} \quad (6.23)$$

v_x = T/M parçada boyuna ya da enine ultrasonik dalganın yayılma hızı, m/s.

v_1 = Standart olarak seçilen kalibrasyon bloğunda boyuna ya da enine ultrasonik dalganın yayılma hızı.

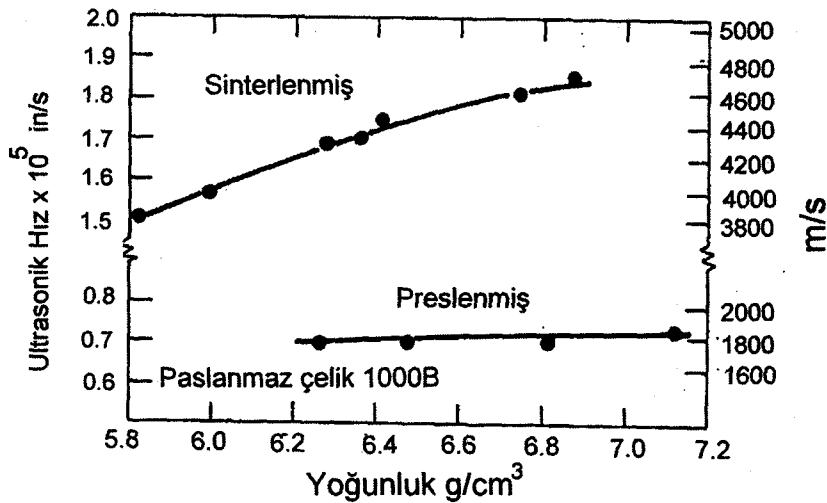
L_m = T/M parçanın fiziksel olarak ölçülen kalınlığı, mm.

L_u = T/M parçanın ultrasonik olarak ölçülen kalınlığı, mm, (ASTM E 494).

Örneğin çelik bir parçada hız ölçümü yapılacaksa $v_1 = 5940$ m/s alınmalıdır.

6.4.6 Toz Metalürjik Parçalarda Ultrasonik Dalganın Yayılma Hızı ile Mekanik Özellikler Arasındaki İlişki

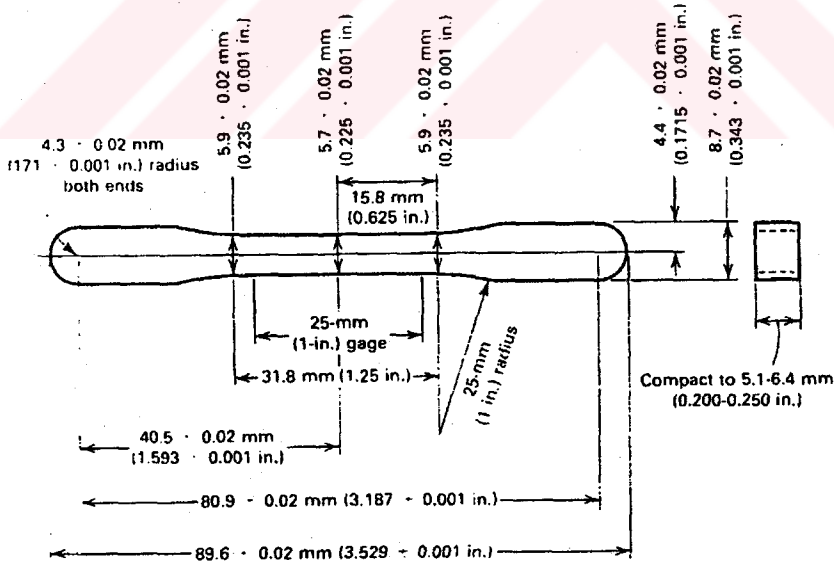
Patterson vd., (1981) yaptıkları deneylerde T/M parçalarda yoğunluk ile ultrasonik hız arasında ilişkiler bulmuştur. %1 Emersol 150 yağlayıcısı ile karıştırılmış, %0.8C'lu paslanmaz çelik 1000B tozlarından, 32.385mm uzunluğunda, 7.747mm çapında farklı basınçlarda preslenmiş olan silindirlerle yapılan deneylerden şu sonuçlar çıkarılmıştır: 1) Preslenmiş ancak sinterlenmemiş numunelerde presleme basıncının artmasıyla parçanın yoğunluğu artar. Ancak yapılan ölçümlerde parçada yayılan ultrasonik dalganın yayılma hızının yoğunluğa bağlı olmadığı ve belirgin bir değişim göstermediği saptanmıştır. 2) 1038°C'de 30 dakika sinterlenmiş numunelerde ise artan yoğunlukla beraber ultrasonik hızın arttığı gözlenmiştir (Şekil 6.13).



Şekil 6.13 Preslenmiş ve sinterlenmiş parçaların yoğunlukları ile ultrasonik dalganın yayılma hızı arasındaki ilişki (Patterson vd., 1981).

Ultrasonik hız ölçümü yardımıyla, üretilen T/M parçaların istenilen yoğunluğa ulaşip ulaşmadığı, yeterli preslemenin yapıp yapılmadığı kontrol edilebilir. Ayrıca bu yöntemle sinterlenmiş parçaların kesitlerindeki olası yoğunluk farklılıkları bulunabilir. Ultrasonik hız parçanın malzemesine ve hızın ölçüm yönüne bağlıdır. Örneğin aynı sinterleme sıcaklığı ve süresi kullanılarak üretilen dişlilerin kontrolü yapılmak isteniyorsa önce aynı malzemeden, farklı presleme basınçları kullanılarak üretilen farklı yoğunluklara sahip dişliler üretilir. Bunlarda aynı yönde, aynı tekniklerle (aynı frekansta dalga kullanma, aynı probu kullanma vb.) ultrasonik hız ölçümü yapılır ve Şekil 6.13'de benzer bir grafik çizilir. bu grafik yardımıyla herhangi bir dişlinin yoğunluğu ultrasonik hız ölçümü yapılarak kontrol edilebilir. Böylece istenilen özelliklere sahip parçalarla, kusurlu parçalar birbirinden ayırt edilebilir.

Patterson vd., (1981) ultrasonik hızla, çekme dayanımı ve akma sınırı arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmak için yaptıkları deneylerde %0.8C içeren paslanmaz çelik 1000 tozu ile karıştırılmış %1 grafit ve %3/4 balmumu içeren $6.70-6.80 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa kadar preslenmiş MPIF Standard 10'a göre hazırlanmış çekme çubukları kullanmışlar. Şekil 6.14'de işlenmemiş MPIF Standart 10 çekme çubuğu görülmektedir. Bir grup numuneye %1 doğal grafit diğer gruba ise %1 sentetik grafit katılmıştır. Numuneler 1000, 1050 ve 1120°C'de 10, 20 ve 30ar dakika sinterlenmiştir.



Şekil 6.14 İşlenmemiş MPIF Standart 10 çekme çubuğunun boyutları (ASM Vol. 7).

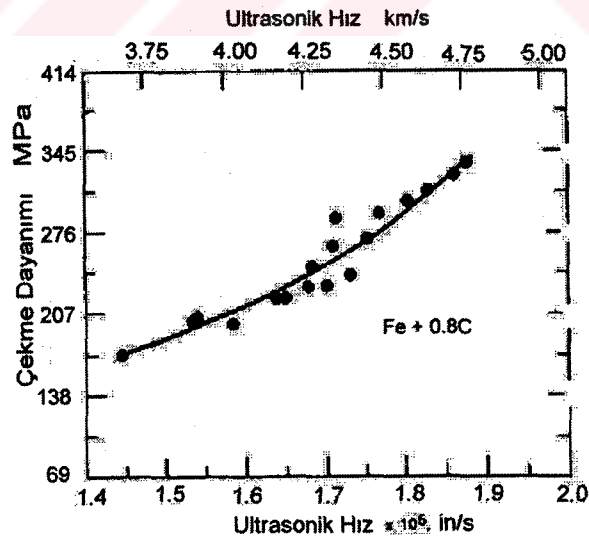
Ultrasonik hız ölçümleri presleme doğrultusuna paralel olacak şekilde yapılmıştır. Çizelge 6.6'da ölçülen çekme dayanımları ve ultrasonik hız değerleri tablolanmıştır. Sinterleme işlemleri sonucunda akma sınırı için 172 ila 260MPa arasında, çekme dayanımı içinse 172 ila

337MPa arasında olan değerler bulunmuştur. Ultrasonik hız ise 3678-4760m/s arasında değişim göstermiştir.

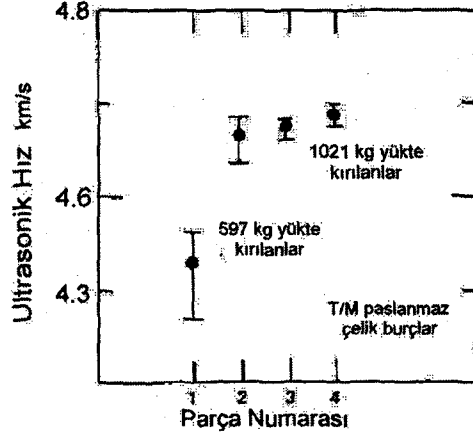
Çizelge 6.6 Mekanik özelliklerle, ölçülen ultrasonik hızlar (Patterson vd., 1981).

Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Zamanı (dakika)	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Sınırı (MPa)	Ultrasonik Hız (m/s)
1000	10	197	180	4028
		172	172	3678
	20	221	187	4199
		205	192	3917
	30	230	186	4330
		230	217	4270
1050	10	221	203	4163
		201	197	3901
	20	241	206	4399
		248	230	4280
	30	269	204	4458
		294	248	4498
1120	10	288	229	4359
		265	237	4341
	20	301	235	4582
		325	259	4719
	30	310	230	4651
		337	257	4760

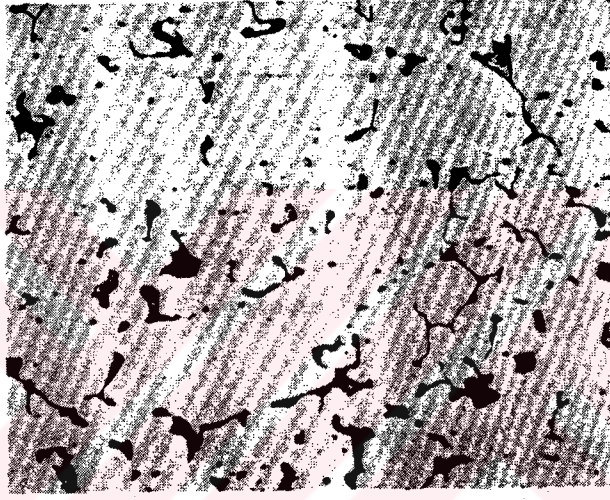
Ultrasonik hızın çekme dayanımı ve akma sınırı değerleri ile nasıl değiştiği Şekil 6.15 ve 6.17'de görülmektedir.



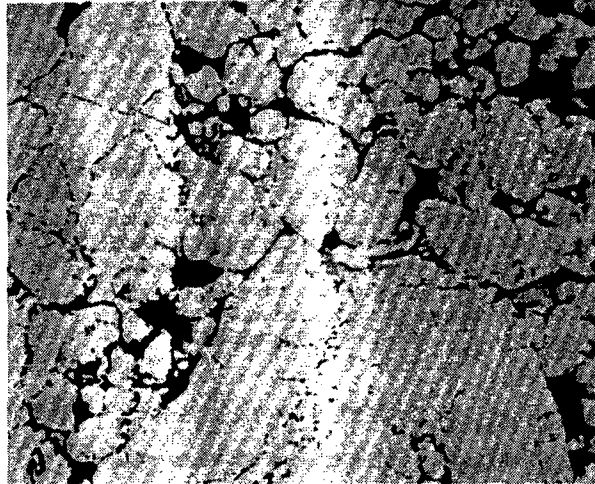
Şekil 6.15 Ultrasonik hızın çekme dayanımı ile değişimi (Patterson vd., 1981).



Şekil 6.17 Değişik yüklerde kırılan parçaların ultrasonik hızları (Patterson vd., 1981).



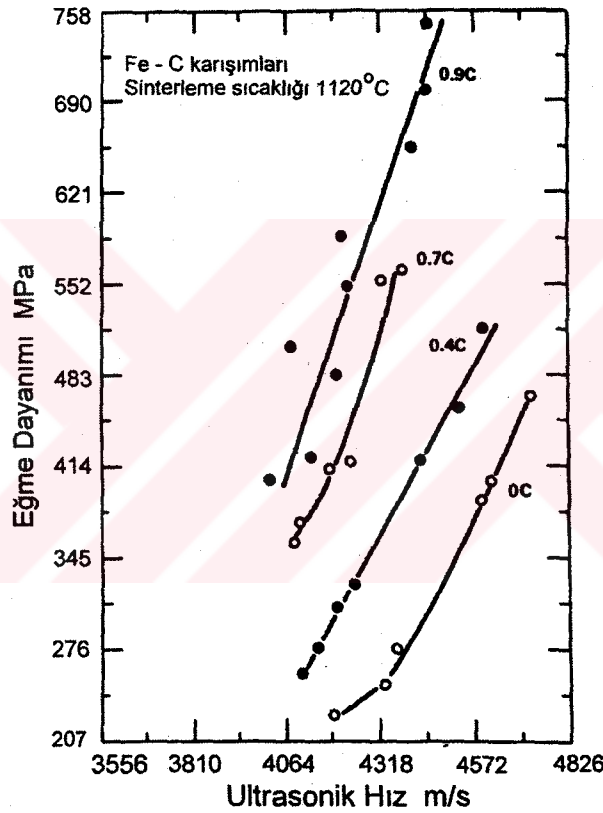
Şekil 6.18 Kuvvetli burçların mikroyapısı. Dağlanmamış, 500X (Patterson vd., 1981).



Şekil 6.19 Zayıf burçların mikroyapısı. Dağlanmamış, 500X (Patterson vd., 1981).

Patterson vd., (1982) yaptıkları başka bir deneyde 3.175mm x 6.35mm x 12.7mm boyutlarında eğme çubukları kullanmışlar. Çubuklar bileşimlerindeki karbon oranına göre

dört gruba ayrılmıştır. %0, %0.4, %0.7 ve %0.9 C oranına sahip çubuklar 6.2 ila 7.0 g/cm³ arasındaki yoğunluklara ulaşıncaya kadar preslenmiştir. Sinterleme 1120°C'de 10 ila 30 dakika arasında yapılmıştır. Çubukların ultrasonik hız değerleri ile eğme dayanımları arasında bir grafik çizilmiştir. (Şekil 6.20) Grafikte farklı karbon oranına sahip çubukların farklı eğriler altında toplandığı görülmektedir. Karbon oranının artmasıyla beraber eğme dayanımı artmaktadır. Ultrasonik hızın artmasıyla beraber eğme dayanımı artmaktadır. Ancak farklı karbon oranına sahip çubukları ultrasonik hız ölçümü ile birbirinden ayırmak zordur. Bu yüzden ultrasonik hız kalite kontrol amaçlı kullanıldığında farklı bileşime sahip parçalar için farklı ultrasonik hız - eğme dayanımı eğrileri kullanılmalıdır.



Şekil 6.20 Eğme dayanımı ile ultrasonik hızın değişimi (Patterson vd., 1982).

Boyuna ve enine ultrasonik dalgaların hız ölçümünden yararlanılarak T/M parçaların, elastiklik modülü, kayma modülü ve poisson oranı da bulunabilir. Örneğin Bölüm 6.3.3'deki Şekil 6.3 şöyle hazırlanmıştır: Çeşitli gözenek hacim oranına sahip 9mm çapında, 3mm kalınlığında sinterlenmiş demir numuneler hazırlanmıştır. 6.25 mm çapındaki bir proba 5 MHzlik ultrasonik dalgalar parçaya gönderilmiş ve gönderilen dalgaların arka cıdardan yansıması dikkate alınarak, boyuna ve enine ultrasonik dalgaların hız ölçümü ASTM E 494'e göre yapılmıştır. Elastik parametreler ASTM E 494'te yer alan formüller kullanılarak hesaplanmıştır.

Elastiklik modülü

$$E = \rho V_s^2 (3V_l^2 - 4V_s^2) / (V_l^2 - V_s^2)$$

Kayma modülü

$$G = \rho V_s^2$$

Poisson oranı

$$\nu = (V_l^2 / 2 - V_s^2) / (V_l^2 - V_s^2)$$

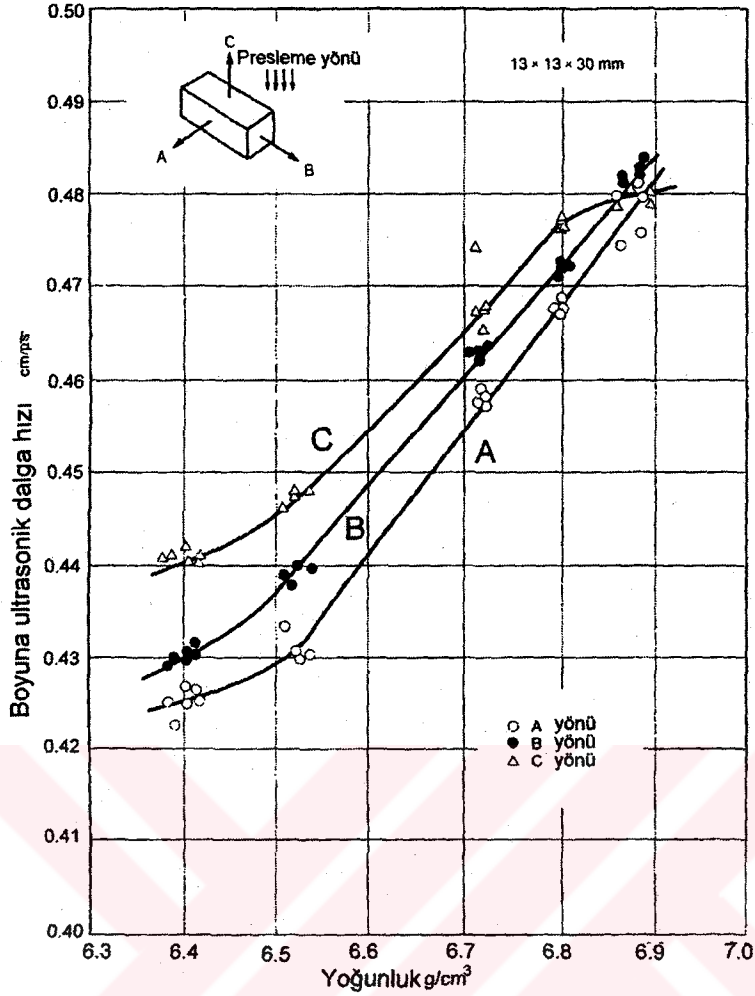
ρ = T/M parçanın yoğunluğu, g/cm³.

V_l = Boyuna ultrasonik dalga hızı, mm/s.

V_s = Enine ultrasonik dalga hızı, mm/s.

E = Elastiklik modülü, dyne/cm² (ASTM E 494). 1 MPa, 10⁷ dyne/cm² dir.

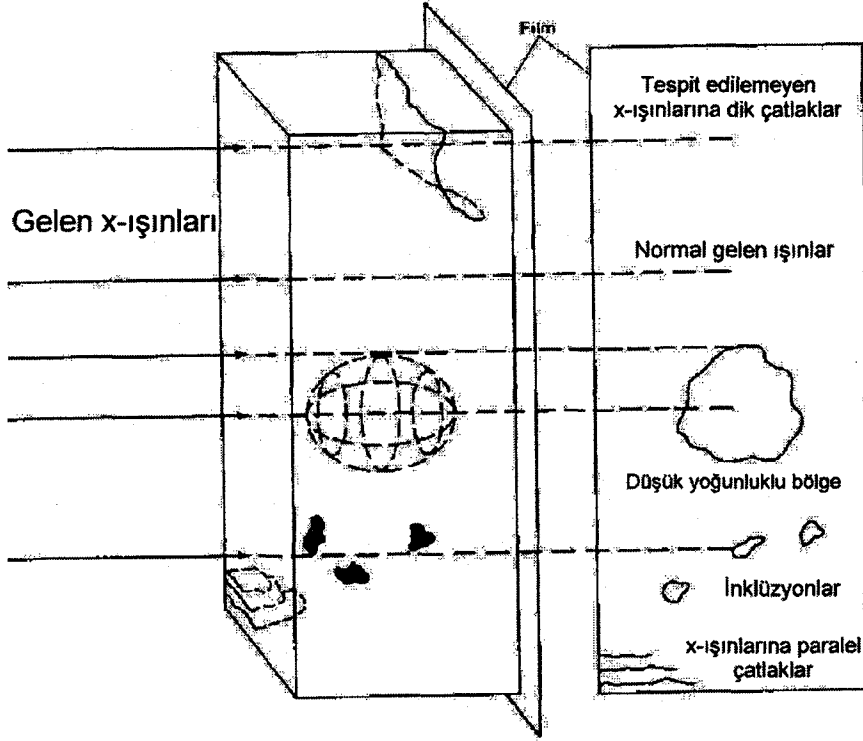
T/M parçalarda ultrasonik hız değerleri ölçümün yapıldığı yöne göre değişebilmektedir. Ultrasonik hız; bileşimi, sinterleme sıcaklığı ve sinterleme süresi benzer imalat parçalarının kalite kontrolünde kullanılmak istendiğinde hızın ölçüm yönü de dikkate alınmalıdır. Karşılaştırma yapabilmek için ölçümler aynı yönde yapılmalıdır. Şekil 6.21'de eğme çubuklarının ultrasonik hız değerlerinin yoğunluğa ve ölçüm yönüne göre değişimi görülmektedir. Presleme doğrultusu c yönündedir. Düşük yoğunluklarda ultrasonik hız değerleri presleme doğrultusunda ölçüldüğünde daha yüksek çıkmaktadır. Yoğunluk arttıkça farklı yönde ölçülen ultrasonik hız değerleri birbirine yaklaşmaktadır.



Şekil 6.21 Eğme çubuklarında ultrasonik hızın ölçülme yönüne bağlılığı (ASM Vol. 17).

6.5 Toz Metalürjik Parçaların X-ışını Radyografisi

Parça içinde bulunan ve gelen x-ışını azaltan ya da arttıran bir hata x-ışını radyografisi ile tespit edilebilir. Şekil 6.22'de x-ışını radyografisi kullanılarak tespit edilebilecek hatalar sergilenmiştir. Hatanın yönü filmde oluşacak olan görüntüyü etkiler. Gelen x-ışını demeti doğrultusunda olan çatlaklar x-ışınlarının şiddetini düşüreceğinden filmde daha koyu görülürler. Gelen x-ışını demetine dik yönde olan ince bir çatlak, ışının şiddetini çok az düşüreceğinden tespit edilemez. Güvenliğin önemli olduğu, pahalı parçaların muayenesinde radyograflar kullanılır. Daha hızlı olan gerçek zamanlı muayenelerde ise fotoğraf filmlerinin yerini monitörler almıştır. Gerçek zamanlı x-ışınılı muayene sistemlerinde, x-ışınları detektörler yardımıyla şiddetlerine göre elektriksel sinyallere dönüştürülür. Bilgisayar aracılığıyla görüntü oluşturulur ve bir monitörden hataların gözlemlenmesi sağlanır. Bu sistemlerde görüntüler kayıt edilebilir ve üzerlerinde görüntüyü zenginleştirmek, netleştirmek gibi düzenlemeler yapılabilir. Ancak hatanın yönlenimi bu sistemlerde de sonucu etkiler.



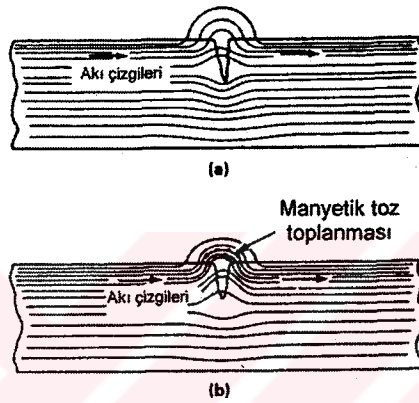
Şekil 6.22 x-ışını radyografisi kullanılarak tespit edilebilecek hatalar (ASM Vol. 17).

6.6 Toz Metalürjik Parçaların Sıvı Penetrasyon Muayenesi

Sıvı penetrasyon muayenesinde parçanın üzerine renkli ya da floresans bir sıvı (penetrant) yaydırılır. Bu sıvı çatlakları ve gözenekleri doldurur. Parçanın yüzeyindeki sıvı daha sonra yıkanır. Çatlak ve gözeneklerin içinde kalan penetrant sıvı yüzeye uygulanan developman ile kontrast farkı oluşturularak görünür hale getirilir. Böylece parçadaki kusurlar, yüzey çatlakları tespit edilir. Sinterlenmiş gözenekli parçaların yüzeyi gözenekli olduğu için yüzeye uygulanan penetrant sıvı tüm çatlak ve gözenekleri doldurur. Developman sonrası gözenek ve çatlaklarda kalan penetrantın çoğu aynı anda dışarı çıkar, dolayısıyla çatlak ayırt edilemez. Bu yüzden sinterlenmiş parçalar floresans partiküllerin bulunduğu bir süspansiyona daldırılır ve muayene edilir. Partiküller sıvının girdiği yerlerde, yüzeydeki çatlaklarda filtre edilir ve biriktirilir. Süspansiyondan çıkarılan parça ultraviyole ışın altında incelendiğinde çatlaklar görülebilir. İnce çatlaklar parlak, kalın çatlaklar ise daha koyu gözüktür. Örneğin bu yöntemle önsinterlenmiş gözenekli tungsten karbürlerin testi yapılabilir (Crack Test for P/M Compacts). Preslenmiş parçalarda ise yüzeydeki ince, kuru, yağlayıcı tabakası sayesinde penetrant sıvı çatlakların içinde kalır, gözeneklere fazla sızmaz ve yüzeydeki kalıptan çıkarma çatlakları tespit edilebilir. T/M parçaların sıvı penetrant muayenesi yapılırken ASTM E 1418 standardına başvurulabilir. Bu standartta penetrant ve developman araçlarının nasıl kullanılması gerektiği detaylı olarak açıklanmıştır. Bu standarda göre penetrant sıvısının ve parça yüzeyinin sıcaklığı 10 ila 52°C arasında olmalıdır.

6.7 Toz Metalürjik Parçaların Manyetik Parçacıklarla Muayenesi

Ferromanyetik T/M parçaların yüzeyindeki veya yüzeyine yakın bir bölgesindeki çatlaklar veya kusurlar manyetik parçacıklarla tespit edilebilir. Manyetik parçacıklarla muayenede parçanın içinde bir manyetik akı oluşturulur. Eğer parçanın yüzeyinde veya içinde bir çatlak ya da süreksizlik yoksa manyetik alan çizgileri kesintiye uğramadan yollarına devam eder. Şekil 6.23a'da görüldüğü gibi parçanın yüzeyinde bir çatlak varsa manyetik alan çizgileri havadan geçerek çatlağı aşar. Yüzeye yadınrlmış olan kuru ya da yaş manyetik tozlar havadan geçen manyetik alandan etkilenecek çatlağın olduğı bölgede toplanır. Böylece çatlağın yeri ve büyüklüğü tespit edilir (Şekil 6.23b).

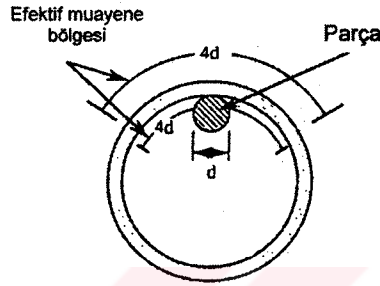


Şekil 6.23 Manyetik parçacıklarla muayene. (a) Manyetik alandaki sızıntı. (b) Manyetik toz toplanması (ASM Vol. 17).

T/M parçaların manyetik parçacıklarla muayenesinde ASTM E 1444 standardından yararlanmak mümkündür. Parçaları manyetikleştirmek için doğrudan manyetizasyon ya da elektromanyetik indüksiyonla manyetizasyon kullanılır. Doğrudan manyetizasyonda parça iki elektrik kontağının arasına alınır ve uçlarına akım uygulanır. Parça elektrik kontaklarına bağlandıktan sonra akım uygulanmalıdır. Uygulanan akımının akım değeri yüksek, voltajı ise düşük değerde olmalıdır. Bu sayede güç kullanımı ve parçada açığa çıkan ısı enerjisi azalır. Direk manyetizasyonda parçanın fazla ısınmamasına dikkat edilmelidir. Manyetizasyonda kullanılacak akım alternatif akım, yarım dalga doğru akım veya tam dalga doğru akım olabilir. Alternatif akım yüzeydeki kusurları ve çatlakları tespit etmekte kullanılır. Tam dalga doğru akım yüzeydeki ve daha derindeki hataları tespit etmek için kullanılır. Yarım dalga doğru akım ise kuru tozla yapılan manyetik muayeneler için daha uygundur. Vuru şeklindeki akım manyetik toz parçacıklarını titreştirir ve çatlaklarda toplanmasını sağlar. Direk manyetizasyonla yüzeydeki çatlakları tespit etmek için parçaya 1500amp'lik manyetikleştirme akımı uygulanmalıdır. Parça içindeki inklüzyonları muayene etmek için

500amp'lik manyetikleştirme akımı yeterlidir. Manyetik parçacıklar inklüzyonların olduğu bölgelerde yelpaze şeklinde saçılırlar (Topuz, 1993).

Elektromanyetik indüksiyon ile manyetizasyonda manyetik alan parçaya, N sarıma sahip içinden I akımı geçen bir sargı tarafından uygulanır. Test edilmek istenen parça sargının kenarına veya merkezine yerleştirilir. Sargıya akım verildiğinde, sargı eksenine ve yerleştirilen parça eksenine boyunca bir manyetik akı elde edilir. ASTM E 1444'e göre sargının kesit alanı, muayene edilmek istenen parçanın kesit alanının 10 veya daha fazla katı ise ve parça sargının kenarına Şekil 6.24'deki gibi konmuşsa NI çarpımının (6.24)'ü sağlaması gerekir.



Şekil 6.24 Sargının kenarına yerleştirilmiş parça için efektif manyetizasyon bölgesi (ASTM E 1444).

$$NI = \frac{K}{L/D} (\pm 10\%) \quad (6.24)$$

N = Sargının sarım sayısı.

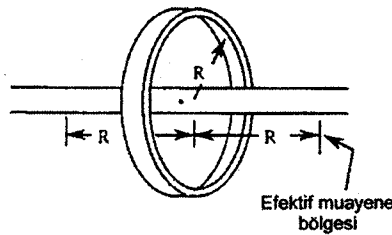
I = Sargıdan geçen akım, amper.

K = 45000.

L = Parçanın uzunluğu.

D = Parçanın çapı (L ile aynı birimde ölçülmelidir) (ASTM E 1444).

Eğer parça Şekil 6.25'deki gibi sargının merkezine yerleştirilirse NI çarpımının (6.25)'deki gibi olması gerekir.



Şekil 6.25 Sargının merkezine yerleştirilmiş parça için efektif manyetizasyon bölgesi (ASTM E 1444).

$$NI = \frac{KR}{(6L/D) - 5} (\pm\%10) \quad (6.25)$$

R = Sargının iç çapı, mm.

K = 1690.

L = Parçanın uzunluğu

D = Parçanın çapı (L ile aynı birimde ölçülmelidir) (ASTM E 1444).

Şekil 6.24 ve Şekil 6.25’de sargının içindeki efektif muayene bölgeleri de gösterilmiştir. Parçanın boyutları efektif bölgenin dışına çıkıyorsa parça kısım kısım incelenir. (6.24) ve (6.25) L/D oranı 2’den büyük 15’ten küçük ise geçerlidir. Eğer parçanın L/D oranı 2’den az ise birkaç parça L/D oranını 2’den büyük yapacak şekilde uç uca eklenerek muayene edilir. Eğer L/D oranı 15’ten büyük ise formüllerdeki L/D, 15 ile değiştirilir. Bunların yanında eğer parçaların kesitlerinde boş kısımlar varsa D, efektif D_{eff} ile değiştirilir. D_{eff} (6.26)’ya göre hesaplanır.

$$D_{eff} = 2[(A_t - A_h)/\pi]^{1/2} \quad (6.26)$$

D_{eff} = Parçanın efektif çapı.

A_t = Parçanın toplam kesit alanı.

A_h = Parçanın boş kısımlarının kesit alanı (ASTM E 1444).

T/M parçaların kuru manyetik tozlarla muayenesinde ince demir tozları kullanılır. Tozlar hata tespiti kolaylaştırmak için renklendirilir. Genelde toz renkleri gri, sarı, kırmızı veya siyahtır. Kuru manyetik tozlar, parçaya manyetik alan uygulandıktan sonra serpilir. Serpme işlemi elle yapılabileceği gibi toz üfleme makinesi de kullanılabilir. Parçaya uygulanan manyetik alan, toz serpme işlemi bittikten ve fazla tozlar parça yüzeyinden uzaklaştırıldıktan sonra kesilmelidir. Fazla tozları parça yüzeyinden uzaklaştırmak için kuru hava akımı kullanılmalıdır. Parça yüzeyindeki süreksizlikleri tespit etmek için manyetik alan yeterli süre uygulanmalıdır. Kuru manyetik tozlar 20 ile 175µm arasındaki boyutlarda olabilir. Kuru tozlarla muayene 150°C sıcaklığa kadar yapılabilir. Bazı kuru tozlarsa 350°C sıcaklığa kadar kullanılabilir. Kuru manyetik tozlarla büyük çatlaklar ve süreksizlikler küçük olanlara kıyasla daha kolay tespit edilir.

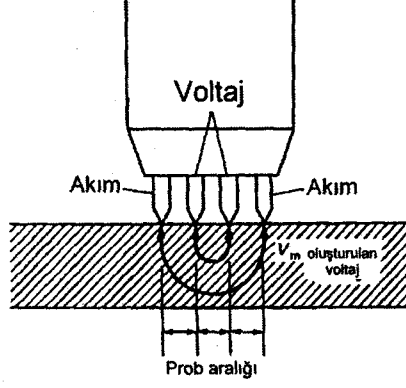
Yaş manyetik tozlarla muayenede kırmızı, siyah veya flüoresans yeşil-sarı renkli demir oksit tozları kullanılır. Bazı tipler ise ince saf demir tozlarından üretilir. Toz büyüklüğü 1 ile 40µm arasındadır. Tozları taşıyan sıvı olarak hafif gazyağı veya su kullanılır. ASTM E 1444’e göre

kullanılan suya ıslatıcı ve paslanmayı önleyici ajanlar katılmalıdır. Bu sayede manyetik parçacıkları taşıyan su, parçanın yüzeyini tam olarak ıslatır. Kullanılan sıvılardaki flüoresans toz oranı 100mL'de 0.1mL ile 0.4mL arasında olmalıdır. Flüoresans olmayan tozlar ise 100mL'de 1.2mL ile 2.4mL arasında olmalıdır. Yaş manyetik tozlar T/M parçaya manyetik alan uygulanmadan az önce ve manyetik alan uygulandığında, spreyle veya dökülerek yaydırılmalıdır. Yaş manyetik banyoların operasyon sıcaklığı 0 ila 100°C arasındadır. Düşük sıcaklıklarda sıvının viskozitesi artar. Yüksek sıcaklıklarda ise kullanılan taşıyıcı sıvılar buharlaşmaya başlar. Yaş manyetik tozlarla ince çatlakların ve yorulma çatlaklarını tespiti hassas olarak yapılabilir. Flüoresans tozlar kullanıldığında parçanın muayenesi görünür ışığın olmadığı bir ortamda ultraviyole ışın altında yapılır. Ultraviyole ışın altında çatlaklarda birikmiş olan flüoresans tozlar ışık yayarak çatlağın yerini ve büyüklüğünü görmemizi sağlarlar.

Parçalar gerekiyorsa muayene bittikten sonra demanyetize edilmelidir. Eğer manyetizasyon işleminde alternatif akım kullanılmışsa, demanyetizasyon işlemi parçanın sargı içerisinde ve dışarısında yavaşça ileri geri hareket ettirilmesi ile yapılır. Manyetizasyonda doğru akım kullanılmışsa parçaya muayene sırasında uygulanan manyetik alandan daha büyük ve aynı yönde bir manyetik alan uygulanır. Daha sonra bu alanın yönü ters çevrilir ve büyüklüğü azaltılır. Manyetik alanın yönü periyodik olarak değiştirilerek parça demanyetize edilir. Manyetik parçacıklarla muayene orta yoğunluktaki otomotiv parçaların testisinde sık olarak kullanılmaktadır (ASM Vol. 7). Preslenmiş parçalarda toz taneleri arasında yeterince kuvvetli bağların olmayışı manyetik akının oluşmasını engeller. Bu yüzden preslenmiş parçaların manyetik parçacıklarla muayenesi başarısız olabilir. Ayrıca östenitik paslanmaz çelik gibi alaşımlar ferromanyetik olmadığı için manyetik parçacıklarla muayene edilemezler.

6.8 Toz Metalürjik Parçaların Özdirenç Testi

İletken bir katıya elektriksel potansiyel uygulandığında içinde, çatlaklardan, gözeneklerden, inklüzyonlardan etkilenen akımlar oluşur. Şekil 6.26'da özdirenç ölçümlerinde kullanılan parçaya voltaj uygulayıp oluşan akımı ölçüp, özdirenç testi yapan prob görülmektedir.



Şekil 6.26 Özdirenç ölçümünde kullanılan prob (ASM Vol. 17).

Özdirenç, elektrik alan şiddetinin iletkenin birim kesitinden geçen akıma oranı olarak tanımlanmıştır. Özdirenç malzemelerin ayırt edici bir özelliğidir. (6.27) özdirencin tanımıdır.

$$\rho = \frac{E}{i/A} \quad (6.27)$$

E = Elektrik alanı, Newton/coulomb, N/C.

i = Elektrik akımı, Amper, A.

ρ = Özdirenç, ohm.metre, $\Omega.m$, (Nasuhoglu ve Tokmakçioğlu, 1990).

Bir iletkende aralarında L uzaklığı bulunan a ve b gibi iki nokta arasındaki elektrik alan şiddeti, bu iki nokta arasında uygulanan potansiyel farkı cinsinden $(V_a - V_b)/L$ ile verilir. bu ifade (6.27)'ye konulursa özdirenç ile akım ve elektriksel potansiyel farkı arasındaki ilişki bulunur.

$$\rho = \frac{V_a - V_b}{iL/A} \quad (6.28)$$

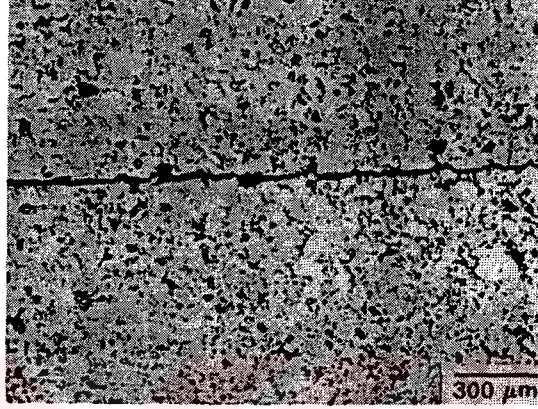
Özdirencin tersi iletkenliği verir. İletkenlik (6.29) ile ifade edilir. Özdirenç azaldıkça iletkenlik artar.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (6.29)$$

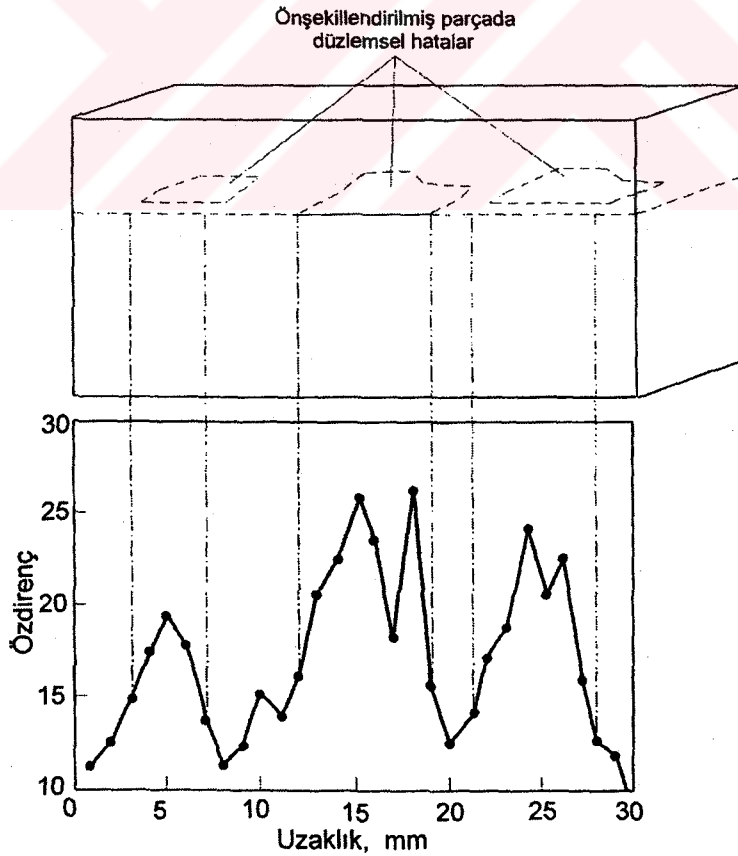
σ = İletkenlik, $1/\Omega.m$.

Preslenmiş ve sinterlenmiş T/M parçalarda özdirenç testi yapıp laminasyon hataları tespit edilebilir. Şekil 6.27'de preslenmiş parçada yapay olarak oluşturulmuş bir laminasyon hatası görülmektedir. Bu hata şöyle oluşturulmuştur: Pres kalıbı yarısına kadar tozla doldurulmuştur.

Toz 345MPa presleme basıncı ile preslenmiştir. Kalıp sonra tamamen tozla doldurulup toz 620MPa basınç ile preslenmiştir. Prob ile parçanın yüzeyinden farklı noktalarda öz direnç ölçümü yapılmıştır. Şekil 6.28’de görüldüğü gibi laminasyonun olduğu bölgelerde öz direnç değeri yükselmiştir. Laminasyonun olduğu bölgelerde toz taneleri birbirlerine yeterince kenetlenmemiştir. Soğuk kaynaklanma azdır. Bunun sonucu olarak parçaya gerilim uygulandığında elektronların hareketi engellenmiş, parçanın iletkenliği azalmış, öz direnci artmıştır (ASM Vol. 17).

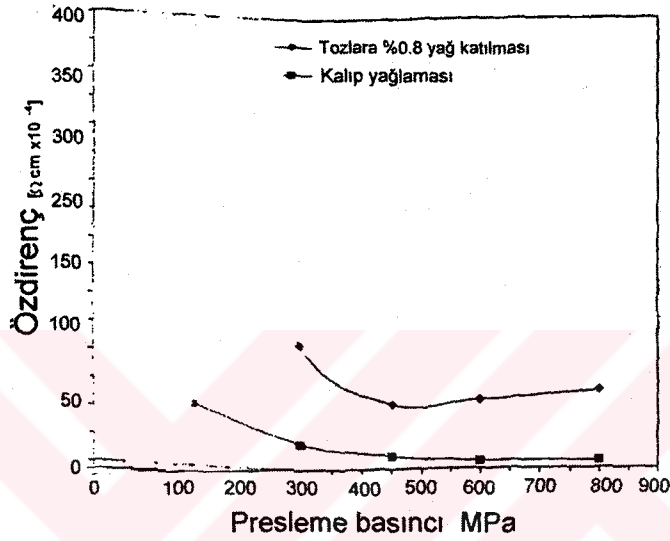


Şekil 6.27 Yapay olarak oluşturulmuş laminasyonun mikrografi (ASM Vol. 17).



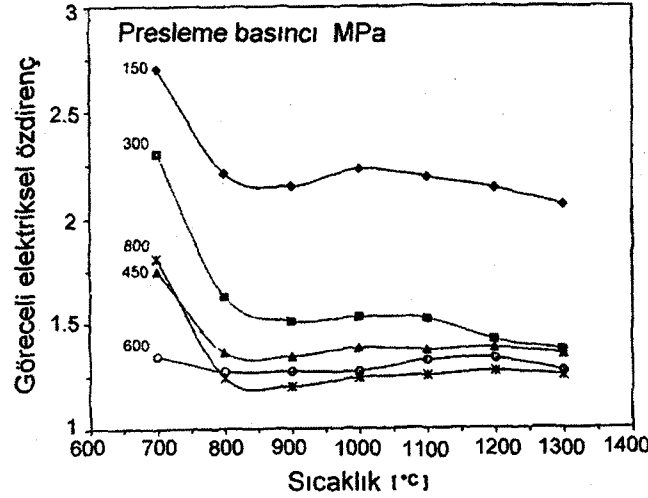
Şekil 6.28 Preslenmiş parçada laminasyonlarda görülen öz direnç değişimi (ASM Vol. 17).

Simchi vd., (2000) atomize demir tozları ve %1.5Mo karışımını farklı basınçlarda presleyerek, preslenmiş parçalarda presleme basıncı ile özdirencin değişimini incelemişler. Şekil 6.29'da farklı basınçlarda preslenmiş parçaların özdirenci ile presleme basıncı arasındaki grafik görülmektedir. Bir toz grubuna %0.8 yağlayıcı karıştırılmış, diğer grubun ise pres kalıbı yağlanmıştır. Presleme basıncı arttıkça daha fazla miktarda toz birbirine soğuk kaynaklanır ve böylece iletkenlik artar, özdirenç azalır.



Şekil 6.29 Preslenmiş parçalarda presleme basıncı ile özdirencin değişimi (Simchi vd., 2000).

Simchi vd., (2000) preslenmiş parçaların sinterlenmesinde yağ uçurma aşamasından sonra özdirenç ölçümleri yapmışlar. Farklı basınçlarda preslenmiş parçaların artan sinterleme sıcaklığı ile beraber özdirenç değişimlerini incelemişler. Şekil 6.30'da farklı basınçlarda preslenmiş numunelerin sinterleme sıcaklığına göre değişen göreceli özdirençleri görülmektedir. Artan presleme basıncı ile beraber özdirenç azalmaktadır. 800MPa'da preslenen numunenin özdirencinin beklenmedik şekilde yüksek çıkması, preslemede numunenin üzerindeki basınç kalktıktan sonra yaylanmasından kaynaklanmaktadır. Yaylanma sonucu numunede mikroçatlaklar oluşur. Bu mikroçatlaklar sinterleme sıcaklığının artmasıyla beraber kaybolur, toz taneleri arasında bağlar oluşur ve özdirenç hızla azalır.



Şekil 6.30 Farklı basınçlarda preslenmiş parçaların, sinterleme sıcaklığı ile beraber özdirenç değişimleri (Simchi vd., 2000).

Sonuç olarak sinterlenmiş parçaların özdirençleri gözenek oranına, presleme basıncına, sinterleme şartlarına ve parçanın malzemesinin kimyasal bileşimine bağlıdır. T/M parçalar homojen bir matris yapısına sahipse özdirenç ölçümü kalite kontrol amaçlı kullanılabilir. Otomotiv endüstrisi için üretilen parçalara özdirenç testi kalite kontrol amaçlı olarak başarı ile uygulanmaktadır (ASM Vol. 17).

6.9 Toz Metalürjik Parçaların Metalografik Muayenesi

T/M parçaların metalografik incelenmesi daha çok parçanın işleyişi sırasında ortaya çıkan sorunların kaynağını anlamak için kullanılır. Metalografik incelemeler ayrıca tahribatsız muayenelerden elde edilen sonuçları sınamak ve doğrulamak için de kullanılır. T/M parçalar gözeneklere sahip olduğu için döküm ve dövme parçalara göre daha değişik olarak metalografik incelemeye hazırlanır. T/M parçalarda genellikle presleme doğrultusuna paralel yönde kesit alınır. Ancak dişli gibi parçalarda sertleştirme kalınlığının tespiti gibi özel incelemeler için presleme doğrultusuna dik olarak kesit alınır. Numune 12mm x 12mm boyutlarında kesilirse daha rahat hazırlanır. Numune kesilirken kullanılan kesme sıvısı ve parçada kalmış olan yağlayıcılar parçadan uzaklaştırılmalıdır. Numune bir kancaya asılarak 20 dakika kadar 1-1-1 trikloreten banyosu içerisinde ultrasonik olarak temizlenmelidir. Bir diğer yöntem ise parça ısıtılmış ise parçayı 260-370°C arasında 1 dakika ısıtarak yağlayıcıları buharlaştırmaktır. Gözenekler epoksi reçinesi ile doldurularak mikroskop altında görünür hale getirilir. Gözenek doldurma işlemi şöyle yapılır: Numune, basıncın 25 torr'a kadar düşürüldüğü içinde epoksi reçinesi bulunan bir vakum odasına konur. Burada numune reçinenin içine daldırılır. Vakum odasının basıncı atmosfer basıncına çıkartılır. 15 dakika

kadar reçinenin gözeneklerin içine girmesi beklenir. Gözenek doldurma işlemi numuneyi 2-4 saat süre ile 175°C'de erimiş parafin içerisinde tutarak da yapılabilir. Gözenek doldurma işleminden sonra parça monte işlemine tabii tutulur. Monte edilmiş parça 400 ve 600 numaralı SiC taneli zımparalarla ıslak olarak zımparalanır. Zımpara numarası değiştirildiğinde parça 90° döndürülüp zımparalanır. Zımparalama işlemi sonucunda gözeneklerin çoğu kopan toz parçaları ile doldurulur ve lekelenir. Gözeneklerin açılması ve mikroskop altında görülmesi için şu işlemler yapılır:

1. Demir esaslı malzemeler %2'lik nital ile 1 dakika dağlanır. Diğer malzemeler için kullanılan dağlama ayaçları Çizelge 6.7'de tablolanmıştır. Bu işlem gözenek açma işlemini başlatır.
2. Numune 250rpm ile dönen 20cm çapında, üzerine uzun kavlı keçe gerilmiş diskte 1µm tane boyutundaki Al₂O₃ (alumina) ile 3-4 dakika elle kaba parlatılır. Bu işlem gözenekleri açar ve gözenek boyutunu büyütür.
3. 250rpm ile dönen, kısa kavlı keçeli diskte 1µm'lik elmas pasta ile 3 dakika elle ince parlatılır. İşlem sonunda çizikler kaybolur, gözenekler gerçek boyutlarına geri döner. Gözenek kesit alanı doğru değerine ulaşır.
4. İsteğe bağlı olarak 30s kadar 0.05µm'lik alumina ile 125rpm ile dönen diskte elle hafif basınçta veya otomatik parlatıcıda 100-200g yük altında son parlatma yapılır.

T/M parçalarda gözenekler genelde dağlanmadan, ışık metal mikroskopunda 100X – 200X büyütmelemlerle incelenebilir. Matris yapısı incelenmek istendiğinde parçalar dağlanarak incelenir. Metalografik yöntemle T/M parçalarda şu özellikler incelenebilir:

- Sıvı ve katı faz sinterlemenin derecesi. Yeterince sinterlenmemiş numunelerde orijinal toz taneleri arasındaki sınırlar dağlanmadan görülür. Ortalama sinterlenmiş numunelerde ince, gri veya siyah tane sınırları görülür.
- Gözeneklerin yuvarlaklaşma derecesi. Sinterlenme arttıkça gözenekler yuvarlaklaşır.
- Bölgeler arası yoğunluk değişimleri.
- Mikrolaminasyonlar ve çatlaklar.
- Oksit partikülleri, buharla karartma sonucunda elde edilen oksit tabakasının kalınlığı.
- Buharlaşmamış, erimemiş, istenmeyen kalıntılar (bağlayıcılar ve kalıp yağlayıcıları gibi).
- İzole veya birbirine kenetlenmiş gözenekler.
- Yüzeyin gözeneklik durumu. Yüzey açık ya da kapalı gözeneklere sahip olabilir.
- Mekanik işleme kolaylığı sağlamak için katılan, kükürdün ve manganın yapıdaki durumu incelenebilir.

*Çizelge 6.7 Toz metalürjik parçaların dağlanmasında kullanılan ayraçlar (ASM Vol. 9).

Ayraç	Malzeme	Uygulama şekli
%2 nital: %2 HNO ₃ + metil alkol	Demir ve çelik (ferritik ve düşük karbonlu çelikler için)	10-15s, ısıtılmış işlenmişler 6-7s daldırarak
Pikral: Pikrik asit + metil alkol	Yüksek oranda karbon içeren malzemelerde karbürler, perlit, martenzit ve artık östenit ile kontrast oluşturmak için	15-20s daldırarak
Gliseria: 10mL HNO ₃ + 15mL HCl + 35mL gliserol*	Östenitik ve martenzitik paslanmaz çeliklerde karbürleri, tane sınırlarını görmek için	1-2 dakika daldırma veya hafifçe pamukla sürülür
%4 FeCl ₃ + H ₂ O	Bronzda bakırca zengin bölgelerde kırmızı renk oluşturur	10-20s pamukla sürülür
2g K ₂ Cr ₂ O ₇ + 4mL NaCl + 8mL H ₂ SO ₄ + 100mL H ₂ O	Bronzda tane sınırlarını ortaya çıkarır	10-20s pamukla sürülür
Keller ajanı: 2.5mL HNO ₃ + 1.5mL HCl + 1.0mL HF + 95mL H ₂ O	Alüminyum ve alüminyum alaşımları için	8-15s daldırılır, suda yıkanır
%5 nital	Takım çelikleri için	5 dakika daldırılır
5mL HNO ₃ + 10mL %48lik HF + 85mL H ₂ O	Titanyum ve titanyum alaşımları için	5s daldırılır
5mL NH ₄ OH + 3 damla H ₂ O ₂ + 5mL H ₂ O	Pirinçler için	20s pamukla sürülür, 20 dakikada bayatlar

6.9.1 Gözenek Oranının Metalografik Olarak Belirlenmesi

Toz metalürjisi ile üretilen sert metal parçalarda metalografik olarak gözenek oranını belirlemek için ISO 4505, ASTM B 276 standartları kullanılabilir. Gözenek oranı ölçümü yapılacak numune, metalografik olarak hazırlandıktan sonra dağlanmadan ışık metal mikroskobunda 100 veya 200X büyütmede incelenir. Gözenekler siyah bölgeler olarak görünür. Yuvarlaklaşmış gözenekler daireye benzer şekle sahiptir. 10µm boyutundaki gözenekler 100-200X büyütmede, 25µm boyutundaki gözenekler 100X büyütmede incelenir. Numunenin gözenek dağılımını temsil eden bir bölgenin mikrografi çekilerek standarttaki mikrograflarla karşılaştırılarak gözenek hacim oranı tespit edilir. 10µm boyutunda gözenekler A tipi olarak, 10-25µm arasındakiler B tipi olarak adlandırılır. Ek 1'de ISO 4505 ve ASTM B 276'da referans olarak kullanılan gözenek mikrografları verilmiştir. 25µm'den daha büyük gözenekler 100X büyütmede incelenir ve birim alandaki sayıları sayılır.

* Bu karışımı hazırlarken aspiratör, gözlük ve eldiven kullanınız.

Bir diğer yöntem ise mikrografın üzerine karelere bölünmüş bir ölçek yerleştirilerek doğruların gözenekleri kestiği noktaları sayarak gözenek alan oranını bulmaktır. (6.30)'a göre gözenek alan oranı bulunabilir.

$$A_p = \frac{xy - N_p}{xy} \quad (6.30)$$

A_p = Gözenek alan oranı.

x = Ölçeğin x eksenindeki kare sayısı.

y = Ölçeğin y eksenindeki kare sayısı, (ASM Vol. 7).

N_p = Gözenekler ile doğruların kesişim sayısı + 1/2 x gözenekler ile doğruların teğet olarak kesişim sayısı. Gözenek alan oranı kullanılarak T/M parçanın yoğunluğu (6.31) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\rho = (1 - A_p)\rho_0 \quad (6.31)$$

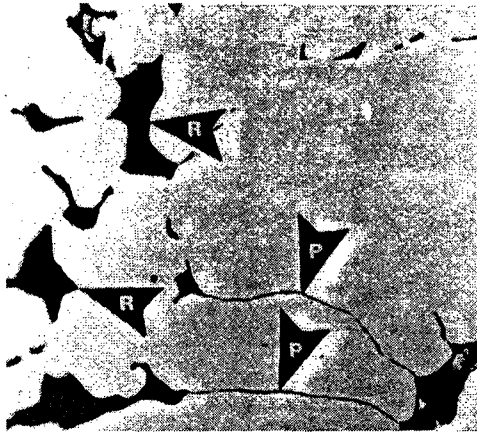
ρ = Toz metalürjik parçanın yoğunluğu.

ρ_0 = Gözeneksiz malzemenin teorik yoğunluğu (%100 yoğunluk).

A_p = Gözenek alan oranı, (ASM Vol. 7).

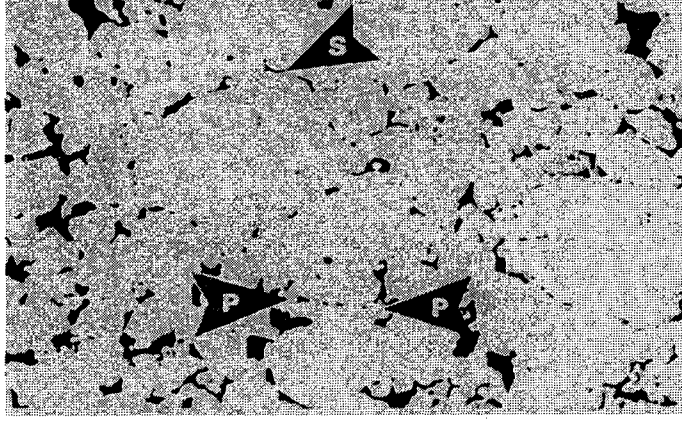
6.9.2 Toz Metalürjik Parçaların Mikrografları

T/M numuneler dağlanmadan incelendiğinde gözenek miktarı, gözeneklerin yuvarlaklaşması görülebilir. Eğer parça yeterince sinterlenmemiş ise orijinal toz taneleri arasındaki sınırlar görülebilir (Şekil 6.31)



Şekil 6.31 Distaloy 4600 A (6.7g/cm^3), 480MPa basınç ile preslenmiş, ayrılmış amonyak atmosferinde 1120°C 'de 15 dakika sinterlenmiş yapı. P orijinal toz tane sınırlarını gösteriyor. Dağlanmamış, 650X (ASM Vol. 9).

Sinterleme devam ettikçe Şekil 6.31’de görülen toz taneleri arasındaki sınırlar gözeneklere dönüşmeye başlar (Şekil 6.32).

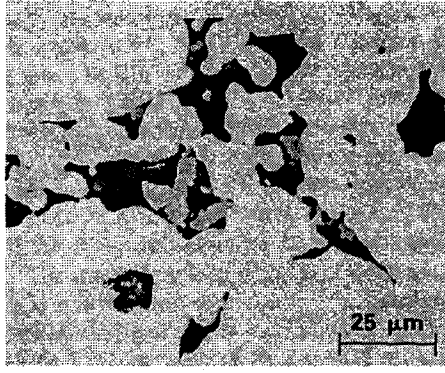


Şekil 6.32 Distaloy 4600 A (6.7g/cm^3), 480MPa basınç ile preslenmiş, ayrılmış amonyak atmosferinde 1120°C ’de 37 dakika sinterlenmiş yapı. P toz taneleri arasındaki sınırların kaybolmaya başladığını gösteriyor. Dağlanmamış, 180X (ASM Vol. 9).

%0.8’e kadar karbon katılan çeliklerde karbon, sinterleme sırasında demir içerisinde 1040°C ’de 5 dakika içerisinde yayılır. Yapı incelendiğinde serbest grafitte pek rastlanılmaz. Şekil 6.33’de ortalama sinterlenmiş atomize demir tozlarının yapısı görülmektedir. Çeliklerin mekanik işlenmesini kolaylaştırmak için demir tozlarına MnS katılır. MnS yapıda gri bölgeler olarak görülür (Şekil 6.34).



Şekil 6.33 Ortalama sinterlenmiş, %0.8 grafit katılmış, atomize demir tozlarından yapılmış parçanın yapısı. Tüm grafit perlit oluşturacak şekilde çözünmüştür. %4 pikral ile dağlanmış (ASM Vol. 7).



Şekil 6.34 Atomize demir tozları ile alaşımlandırılmış yapı. 45 dakika 1120°C’de ayrılmış amonyak ortamında sinterlenmiş. Gri bölgeler mekanik işlemeyi kolaylaştırmak için katılmış MnS’dür. Dağlanmamış (ASM Vol. 7).

Demir, demir ve karbon, tozları içerisine %2 - %20 arasında bakır katılabilir. Bakır geleneksel sinterleme şartlarında 1083°C’de eriyerek, kılcallık etkisi ile demir tozlarının arasına yayılır. Bu sayede yapının dayanımı artar. Erimiş bakır, demir tozlarının birbirine kenetlendiği bölgelere yayılır ve parça genişlemesine neden olur. %2 - %3 bakır, yapı içerisinde çözünür. Eğer %2Cu içeren bir çelik yapıda bakır erimemiş parçalar halinde görünüyorsa sinterleme yetersizdir. %5 - %20Cu içeren yapılarda bakır erimiş adalar veya demir tanelerini saran bir faz olarak görülür.

Nikel, demir tozlarına %2 - %4 arasında dayanımı arttırmak için katılabilir. Karbon oranı %0.4 - %0.8 arasında olabilir. Nikelli karışımlar sinterleme sırasında büzülür, bunu önlemek ve nikeli yapı içerisinde dağıtmak için %2’ye kadar bakır ilave edilir. Nikelce zengin bölgeler mikrografta açık renkli adalar olarak görülür. Nikelce zengin bölgelerin kenarlarında beynit yapısı ile beraber martenzite rastlanılır (Şekil 6.35).



Şekil 6.35 Sinterlenmiş Fe-2Ni-0.5C karışımının mikrografı. Sinterleme 1120°C’de 30 dakika yapılmıştır. Ni: Nikelce zengin taneleri, M: Nikelce zengin sınırdaki martenziti veya beyniti, F: Ferriti göstermektedir. %4 nital ile dağlanmış (ASM Vol. 7).

Bronzların sinterlenmesi sırasında kalay, bakırla beraber α -bronzunu oluşturur. Sinterleme bittiğinde mavi-gri bakır-kalay bileşikleri yapı içerisinde çözünmüş olur. Optimal mekanik özelliklere ve iyi işlenebilirliğe sahip olan bir yapıda kırmızı renkli bakırca zengin bölgeler azdır.



7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda standart çekme çubukları ve imalat parçaları kullanılmıştır. Tüm parçalar Toz Metal A.Ş.'de üretilmiştir.

7.1 Çekme Çubukları ile Yapılan Deneysel Çalışmalar

Çekme çubuklarında yoğunluk, sertlik, ultrasonik hız, çekme dayanımı ölçümleri ve metalografik muayeneler yapılmıştır. Üzerinde testler yaptığımız çekme çubukları MPIF 10 standardına göre üretilmiştir. Bu çubuklar 89.6mm uzunluğa, 5.8mm ene ve kalınlığa sahiptir. Çekme çubuklarının kimyasal bileşimi şöyledir: %1.64 Ni, %1.45 Cu, %0.5 Mo, %0.23 C, %0.50 MnS, %95.68 Fe. Hammadde olan tozun içerisine üretim sırasında %0,8 oranında çinko stearat yağlayıcı olarak katılmıştır. Çekme çubukları, preslenmiş yoğunluğu 7.05 g/cm^3 olacak şekilde preslenmiştir. Sinterleme işlemi konveyörlü fırında, endobaz propan atmosferinde yapılmıştır. Sinterleme ayrı gruplar halinde 1050°C , 1090°C ve 1120°C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta 30 dakika yapılmıştır.

Yoğunluk ölçümleri ISO 3369'a göre yapılmıştır. Yoğunluk hesabında (6.3) kullanılmıştır. Çekme çubuklarının teorik (%100 yoğun, gözeneksiz) yoğunluğu, bileşimde bulunan elementlerin yoğunlukları ile yüzde miktarlarının çarpımlarının toplamından bulunmuştur (7.1). Bu değer $\rho_0 = 7.890 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Çekme çubuklarının içlerinde bulunan yüzde gözenek hacim oranı (7.2) yardımıyla kolayca hesaplanır.

$$\rho = \frac{m_1 \times \rho_1}{m_2} \quad (6.3)$$

ρ = Toz metalürjik parçanın yoğunluğu, g/cm^3 .

ρ_1 = Suyun veya kullanılan sıvının test sıcaklığındaki yoğunluğu, g/cm^3 . (4 basamağa kadar bilinmesi gerekir)

m_1 = Parçanın havada ölçülen kütlesi, g.

m_2 = Parçanın havada ölçülen kütlesi – parçanın suda ölçülen kütlesi ($m_{\text{havada}} - m_{\text{suda}}$), g, (ISO 3369).

$$\rho_0 = \sum_{i=1}^n \rho_i V_i \quad (7.1)$$

ρ_0 = Gözeneksiz parçanın teorik yoğunluğu. (%100 yoğunluk)

ρ_i = i. bileşenin yoğunluğu.

V_i = i. bileşenin yüzde miktarı / 100.

n = Toplam bileşen sayısı.

$$P = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right) \times 100 \quad (7.2)$$

P = Yüzde gözenek hacim oranı.

ρ = Toz metalürjik parçanın yoğunluğu.

ρ_0 = Gözeneksiz parçanın teorik yoğunluğu. (%100 yoğunluk)

Sertlik ölçümlerinde numunenin 4 farklı bölgesinden değerler ölçülmüş ve aritmetik ortalama hesap edilmiştir. Sertlik ölçümlerinde Rockwell B ve Rockwell C ölçekleri kullanılmıştır. Sertlik ölçümünden önce cihaz kalibrasyon bloğu ile kalibre edilmiştir.

Boyuna ultrasonik hız ultrasonik kalınlık ölçer kullanılarak hesaplanmıştır. Önce hızı ölçülecek T/M parçanın malzemesine yakın malzemedan yapılmış ve boyuna ultrasonik dalğanın yayılma hızı bilinen standart blokta ultrasonik kalınlık ölçümü yapılmıştır. Deneylerde kullandığımız parçalar düşük karbonlu çeliğe yakın olduğu için biz 25mm kalınlığa sahip standart IIW (uluslararası kaynak enstitüsü) çelik bloğunu kullandık. Ultrasonik kalınlık ölçeri bu bloğa göre kalibre ettikten sonra, numunelerin ultrasonik olarak kalınlıklarını ölçtük. Ayrıca numunelerin kalınlığı bir mikrometre ile 0.01mm hassasiyette ölçüldü ve (6.23) kullanılarak boyuna ultrasonik dalğanın yayılma hızı hesaplandı. Deneylerde tüm hız ölçümleri presleme doğrultusuna paralel olacak yönde yapılmıştır.

$$v_x = v_1 \frac{L_m}{L_u} \quad (6.23)$$

v_x = T/M parçada boyuna ultrasonik dalğanın yayılma hızı, m/s.

v_1 = Standart olarak seçilen kalibrasyon bloğunda boyuna ultrasonik dalğanın yayılma hızı, m/s.

L_m = T/M parçanın fiziksel olarak ölçülen kalınlığı, mm.

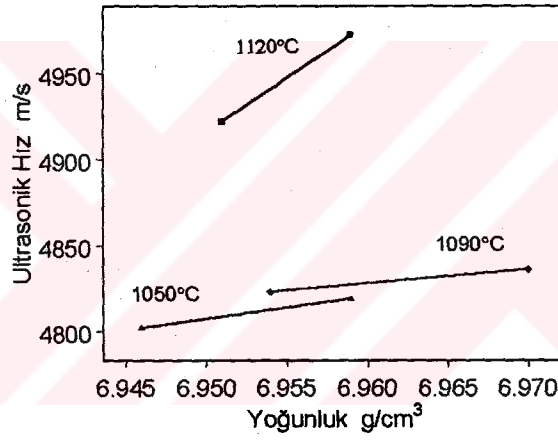
L_u = T/M parçanın ultrasonik olarak ölçülen kalınlığı, mm.

Deneyde kullanılan numuneler için $v_1 = 5940\text{m/s}$ alınmıştır. Çizelge 7.1’de farklı sıcaklıklarda sinterlenen çekme çubukları için ölçülen değerler tablolanmıştır.

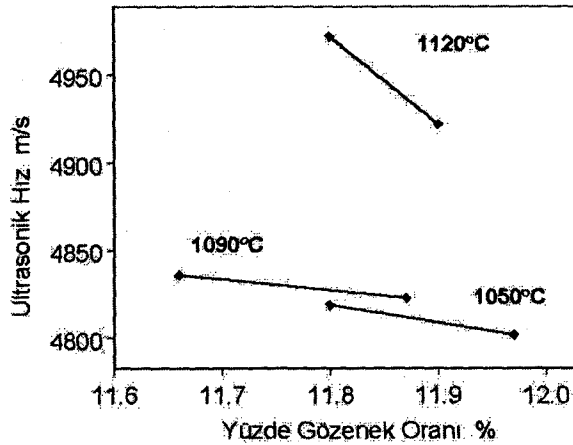
Çizelge 7.1 Çekme çubuklarının yoğunluk, sertlik, ultrasonik hız ve çekme dayanımı değerleri.

Numara	Sinterleme sıcaklığı ve süresi (°C, dakika)	Yoğunluk ρ (g/cm ³)	Gözenek Oranı P (%)	Sertlik (HRB)	Çekme dayanımı σ (MPa, N/mm ²)	Ultrasonik hız m/s
65	1120 30	6.951	11.90	86	436	4922
66	1120 30	6.959	11.80	89	442	4972
67	1090 30	6.970	11.66	87	433	4836
68	1090 30	6.954	11.87	86	422	4823
69	1050 30	6.959	11.80	83	415	4819
70	1050 30	6.946	11.97	82	412	4802

Şekil 7.1’de çekme çubuklarında yoğunlukla ultrasonik hız arasındaki, Şekil 7.2’de gözenek oranı ile ultrasonik hız arasındaki grafikler görülmektedir.

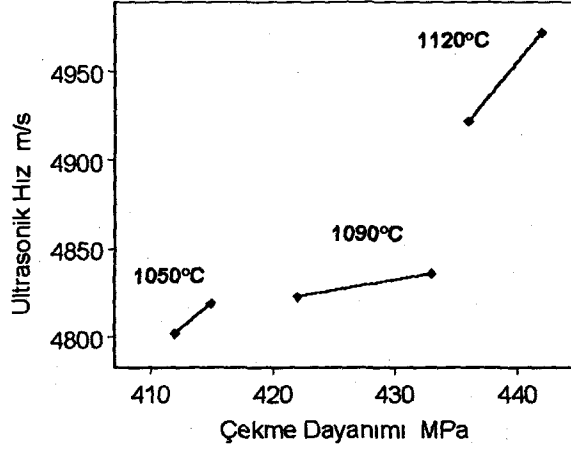


Şekil 7.1 Çekme çubuklarında yoğunlukla ultrasonik hız arasındaki grafik.

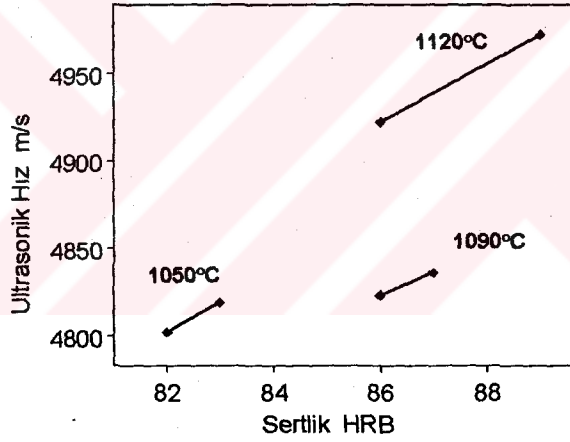


Şekil 7.2 Çekme çubuklarında gözenek oranı ile ultrasonik hız arasındaki grafik.

Şekil 7.3 ve 7.4’de çekme çubuklarında ultrasonik hızın çekme dayanımına ve sertliğe göre değişimi verilmiştir.



Şekil 7.3 Çekme çubuklarında çekme dayanımı ile ultrasonik hız arasındaki grafik.



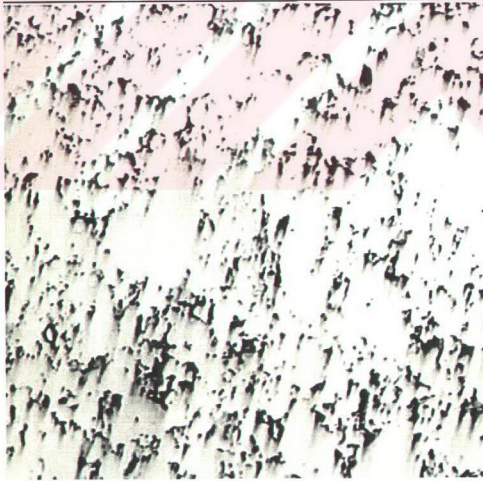
Şekil 7.4 Çekme çubuklarında sertlik ile ultrasonik hız arasındaki grafik.

7.1.1 Çekme Çubuklarının Mikrografları

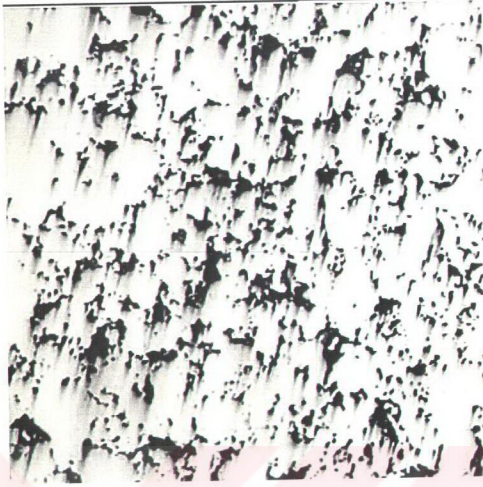
Şekil 7.5’de 65 numaralı, Şekil 7.6’da 67 numaralı ve Şekil 7.7’de 70 numaralı parçaların sinterleme sonrasında dağlanmadan çekilmiş mikrografları görülmektedir.



Şekil 7.5 65 numaralı çekme çubuğunun mikrografı. Sinterleme sıcaklığı: 1120°C. Sinterleme süresi: 30 dakika. 100X

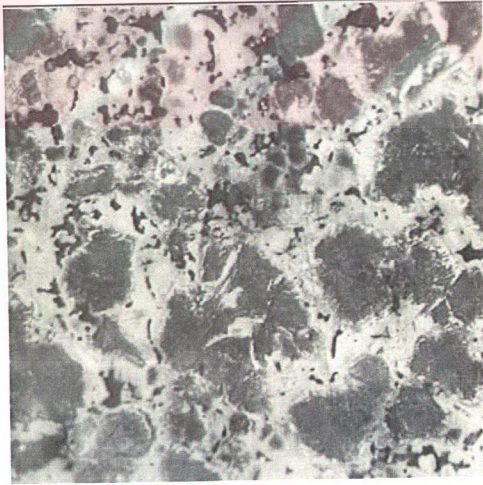


Şekil 7.6 67 numaralı çekme çubuğunun mikrografı. Sinterleme sıcaklığı: 1090°C. Sinterleme süresi: 30 dakika. 100X

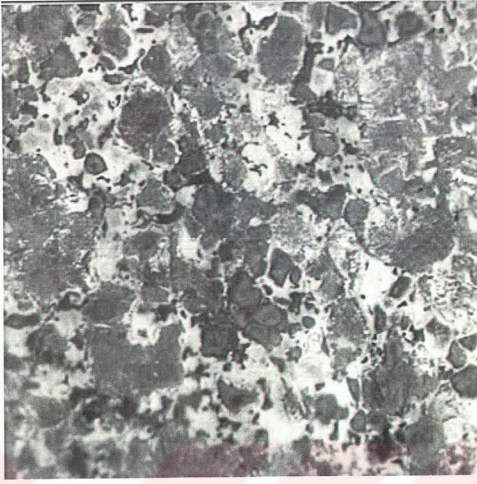


Şekil 7.7 70 numaralı çekme çubuğunun mikrografı. Sinterleme sıcaklığı: 1050°C. Sinterleme süresi: 30 dakika. 100X

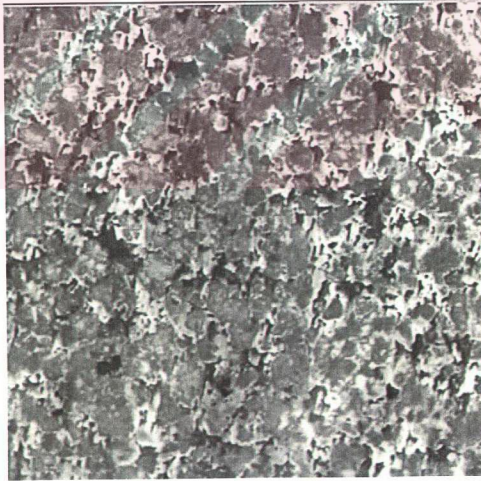
Şekil 7.8'de 65 numaralı, Şekil 7.9'da 67 numaralı ve Şekil 7.10'de 70 numaralı parçaların sinterleme sonrasında %2'lik nital ile dağlandıktan sonra çekilmiş mikrografları görülmektedir.



Şekil 7.8 65 numaralı çekme çubuğunun mikrografı. Sinterleme sıcaklığı: 1120°C. Sinterleme süresi: 30 dakika. %2 nital ile dağlanmış. 200X



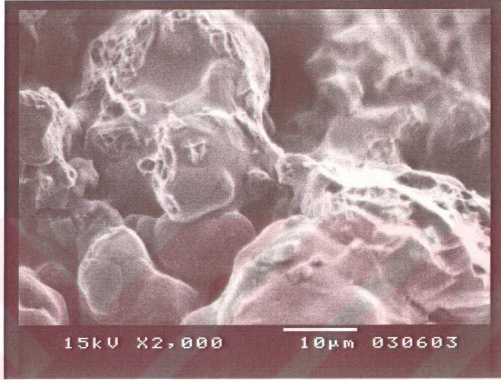
Şekil 7.9 67 numaralı çekme çubuğunun mikrografı. Sinterleme sıcaklığı: 1090°C. Sinterleme süresi: 30 dakika. %2 nital ile dağlanmış. 200X



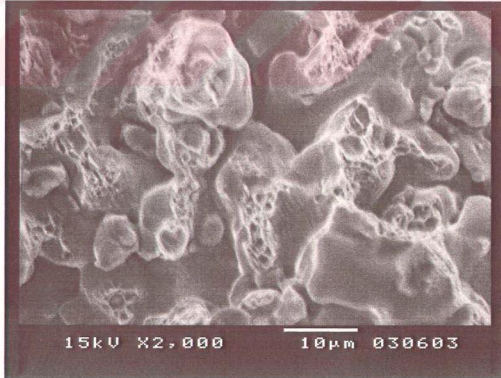
Şekil 7.10 70 numaralı çekme çubuğunun mikrografı. Sinterleme sıcaklığı: 1050°C. Sinterleme süresi: 30 dakika. %2 nital ile dağlanmış. 100X

7.1.2 Çekme Çubuklarının Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri

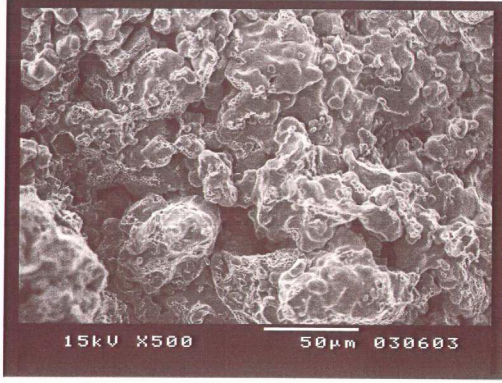
Şekil 7.11’de 69 numaralı, Şekil 7.12’de 66 numaralı ve Şekil 7.13’de 69 numaralı parçaların çekme deneyi sonrasındaki kırılma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çekilmiş fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 7.11 69 numaralı çekme çubuğunun kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.



Şekil 7.12 66 numaralı çekme çubuğunun kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.



Şekil 7.13 69 numaralı çekme çubuğunun kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.

7.2 İmalat Parçaları ile Yapılan Deneysel Çalışmalar

İncelediğimiz parçalar şunlardır:

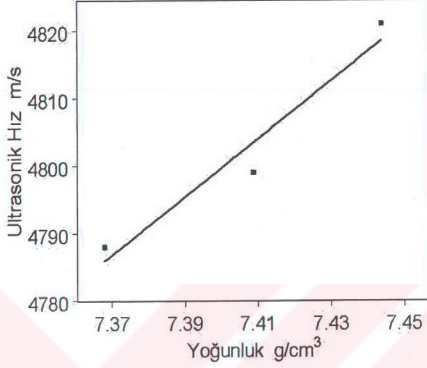
- 801, Audi marka araçların yağ pompası iç rotoru (3 adet).
- 1004, Siemens kontaktör parçası (3 adet).
- Buhar karartma işlemine tabii tutulmuş amortizör parçası (2 adet).

Çizelge 7.2’de parçaların ölçülen yoğunluk, sertlik ve ultrasonik hız değerleri tablolanmıştır.

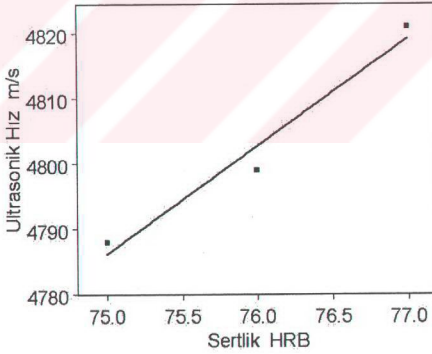
Çizelge 7.2 İmalat parçalarının yoğunluk, sertlik ve ultrasonik hız değerleri.

Numara	Sinterleme sıcaklığı ve süresi (°C, dakika)	Preslenmiş yoğunluğu ρ (g/cm ³)	Sinterlenmiş yoğunluğu ρ (g/cm ³)	Sertlik	Ultrasonik hız m/s
801 1	1120 30	7.109	7.444	77 HRB	4821
801 2	1120 30	6.968	7.409	76 HRB	4799
801 3	1120 30	6.956	7.368	75 HRB	4788
1004 1	1120 30		6.980	50 HRC	5050
1004 2	1120 30		7.000	52 HRC	5083
1004 3	1120 30		7.021	53 HRC	5107
Buhar 1	1120 30		6.290	78 HRB	4947
Buhar 2	1120 30		6.263	69 HRB	4623

Şekil 7.14'de 801 kodlu parça için elde edilen yoğunlukla ultrasonik hız arasındaki, Şekil 7.15'de sertlikle ultrasonik hız arasındaki grafik görülmektedir.

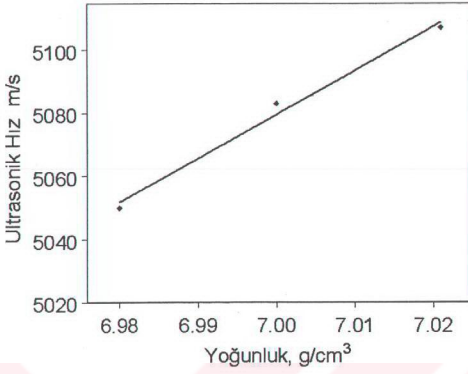


Şekil 7.14 801 kodlu parçanın yoğunluk, ultrasonik hız grafiği.

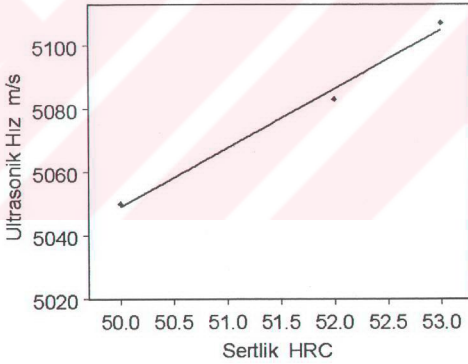


Şekil 7.15 801 kodlu parçanın sertlik, ultrasonik hız grafiği.

Şekil 7.16'da 1004 kodlu parça için elde edilen yoğunlukla ultrasonik hız arasındaki, Şekil 7.17'de sertlikle ultrasonik hız arasındaki grafik görülmektedir.

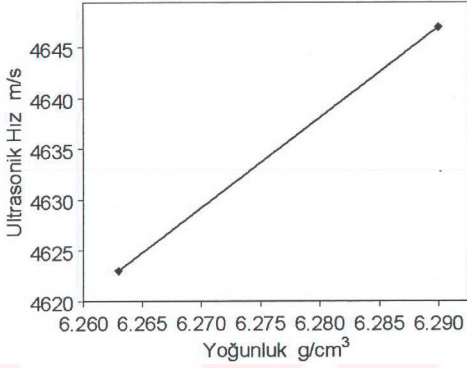


Şekil 7.16 1004 kodlu parçanın yoğunluk, ultrasonik hız grafiği.

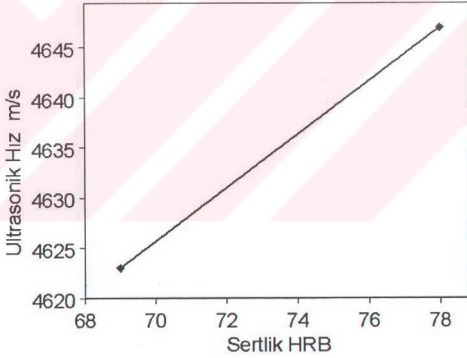


Şekil 7.17 1004 kodlu parçanın sertlik, ultrasonik hız grafiği.

Şekil 7.18’de buhar karartması uygulanmış parça için elde edilen yoğunlukla ultrasonik hız arasındaki, Şekil 7.19’da sertlikle ultrasonik hız arasındaki grafik görülmektedir.



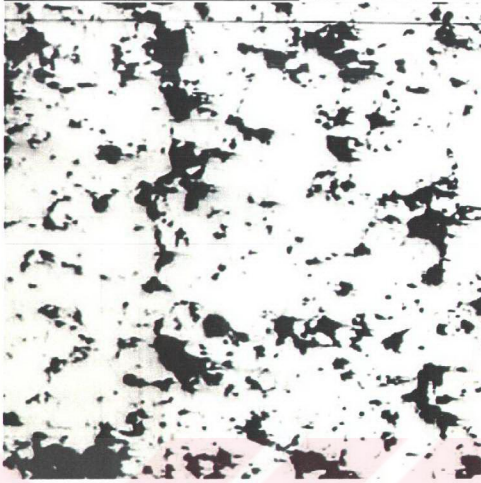
Şekil 7.18 Buhar karartmalı parçanın yoğunluk, ultrasonik hız grafiği.



Şekil 7.19 Buhar karartmalı parçanın sertlik, ultrasonik hız grafiği.

7.2.1 İmalat Parçalarının Mikrografları

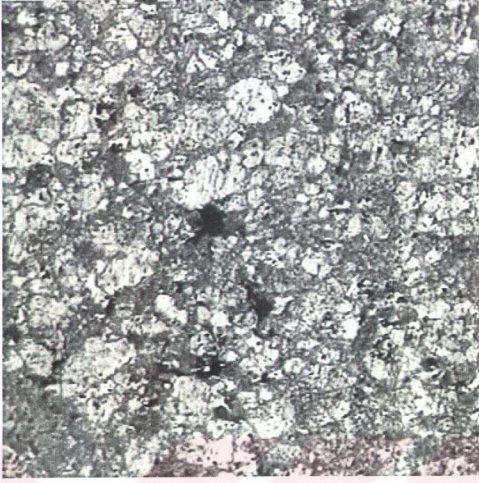
Aşağıda üç parçaya ait çeşitli mikrograflar verilmiştir.



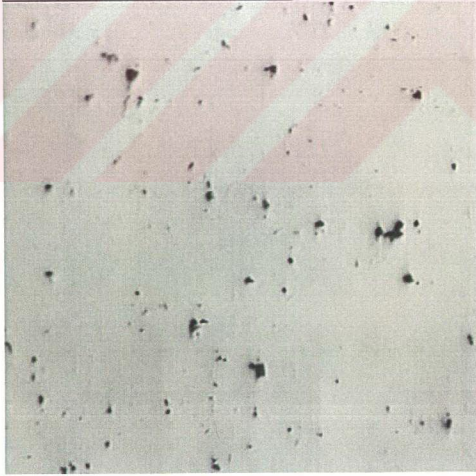
Şekil 7.20 801-3 numaralı parçanın preslenmiş durumdaki mikrografı. Dağlanmamış. 100X



Şekil 7.21 801-1 numaralı parçanın sinterlenmiş durumdaki mikrografı. Dağlanmamış. 100X.



Şekil 7.22 801-1 numaralı parçanın sinterlenmiş durumdaki mikrografı. %2 nital ile dağlanmış. 100X.



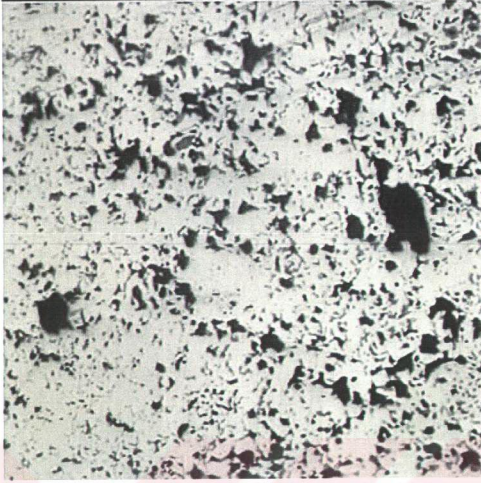
Şekil 7.23 1004-2 numaralı parçanın sinterlenmiş durumdaki mikrografı. Dağlanmamış. 100X



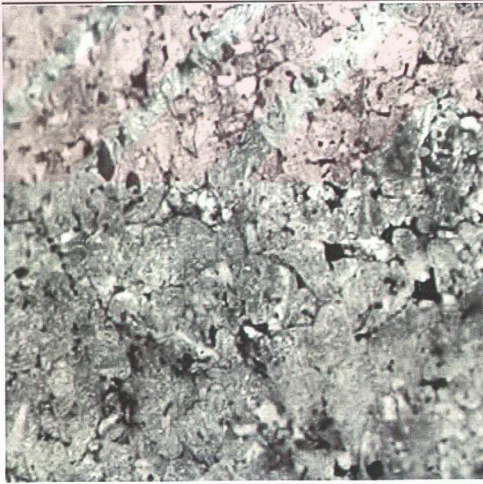
Şekil 7.24 1004-2 numaralı parçanın sinterlenmiş durumdaki mikrografı. %2 nital ile dağlanmış. 100X.



Şekil 7.25 Buhar karartmalı parçanın preslenmiş durumdaki mikrografı. Mikrograf parçanın iç kısmından alınmıştır. Dağlanmamış 100X.



Şekil 7.26 Buhar karartmalı parçanın preslenmiş durumdaki mikrografı. Mikrograf parçanın kenara yakın kısmından alınmıştır. Dağlanmamış 100X.



Şekil 7.27 Buhar karartmalı parçanın preslenmiş durumdaki mikrografı. Mikrograf parçanın iç kısmından alınmıştır. %2 nital ile dağlanmış 100X.



Şekil 7.28 Buhar karartmalı parçanın preslenmiş durumdaki mikrografı. Mikrograf parçanın kenara yakın kısmından alınmıştır. %2 nital ile dağlanmış 100X.

8. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada toz metalürjik parçaların; boyutsal kontrolü, sertlik ölçümü, yoğunluk ölçümü, ultrasonik muayenesi, sıvı penetrasyon muayenesi, manyetik parçacıklarla muayenesi, öz direnç muayenesi, metalografik incelenmesi özetlenmiştir. Yukarıda anlatılan yöntemlerin dışında Eddy akımı yöntemi, gamma ışınları ile yoğunluk ölçümü, rezonans testi, ultrasonik taramalı akustik mikroskopi, taramalı lazer akustik mikroskopi, x-ışınlarıyla bilgisayarlı tomografi gibi daha birçok yöntem geliştirilmiştir. Her muayene türünün kendine göre sınırları ve kapasitesi vardır. Doğru bir sonuç elde etmek için incelenmek istenen hataya göre uygun muayene yöntemi seçilmelidir. Muayene yöntemleri ile ilgili uluslararası standartlara uyulmalıdır.

Deneyisel çalışmalarımızda elde ettiğimiz bulgular şunlardır:

1. Preslenmiş numuneler, sinterlenmiş olanlara göre daha az yoğunluğa sahiptirler ve daha fazla gözenek içerirler.
2. Preslenmiş numunelerin mekanik özellikleri ve sertlikleri sinterlenmiş hallerine kıyasla çok düşüktür.
3. Çekme çubuklarında artan sinterleme sıcaklığıyla yoğunluk, sertlik ve çekme dayanımları artmıştır, gözeneklik azalmıştır. Bunun sebebi artan sinterleme ile toz taneleri arasında oluşan bağların kuvvetlenmesidir. Sinterlenme ile beraber yoğunlaşma artmaktadır.
4. Sinterlenmiş parçalarda yoğunluk artıp gözeneklik azaldıkça ultrasonik hız artmaktadır.
5. Farklı sinterleme sıcaklıklarında üretilen çekme numunelerinde çekme dayanımı ve sertliğin artması ile birlikte ultrasonik hız değerleri de artmaktadır. Bu sonuç Patterson vd., (1981) tarafından da doğrulanmış ve ultrasonik hızın seri olarak parça muayenesinde kullanılabileceği önerilmiştir.
6. İmalat parçalarında yoğunluk ve sertliğin artması ile birlikte ultrasonik hız değerleri de artmaktadır.
7. Deneyisel çalışmalarda elde edilen grafiklerden yararlanarak bileşimi ve sinterleme sıcaklığı benzer imalat parçalarında ultrasonik hız ölçümleri yapılarak, yoğunluk, gözeneklik, sertlik, çekme dayanımı değerleri pek çok parça üzerinde kısa sürede kontrol edilebilir.

Bu çalışmada anlatılan tahribatsız muayene yöntemlerini uygulamak için gerekli teknik donanımlar, toz metalürjik parça üreten bir sanayi kuruluşu için fazla bir maliyete sahip değildir. Boyutsal kontrol, yoğunluk ölçümü, sertlik ölçümü kaçınılmaz olarak uygulanması gereken testlerdir. Tahribatlı testler yerine tahribatsız ultrasonik muayene kullanarak; çekme

dayanımı, gözeneklik, yoğunluk, sertlik değerlerinin belirlenebilir olması, hızlı bir kalite kontrol imkanı ile çok sayıda parçanın tahrip edilmeden muayenesini mümkün kılmaktadır. Bu durum kalite ve verimliliği önemli ölçüde arttıracaktır. Konu ile ilgili firmalara bundan yararlanılması önerilebilir.



KAYNAKLAR

Anık, S., Anık, E. B. ve Vural, M., (2000), Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Birsen Yayınevi, İstanbul.

ASM Metals Handbook, (1990), Forth Edition, Vol. 7, Powder Metallurgy: 291-573, 480-492.

ASM Metals Handbook, (1992), Fifth Edition, Vol. 9, Metallography and Microstructures: 503-512, 514-529.

ASM Metals Handbook, (1992), Second Edition, Vol. 17, Nondestructive Evaluation and Quality Control: 241-267, 536-548, 575-579.

ASTM B 276-91, "Standart Test Method for Apparent Porosity in Cemented Carbides", Philadelphia.

ASTM B 294-92, "Standart Test Method for Hardness Testing of Cemented Carbides", Philadelphia.

ASTM B 328-92, "Standart Test Method for Density, Oil Content, and Interconnected Porosity of Sintered Metal Structural Parts and Oil-Impregnated Bearings", Philadelphia.

ASTM B 610-93, "Standart Test Method for Measuring Dimensional Change of Metal Powder Specimens Due to Sintering", Philadelphia.

ASTM E 1418-92, "Standart Test Method for Visible Penetrant Examination Using the Water-Washable Process", Philadelphia.

ASTM E 1444-93, "Standart Practice for Magnetic Particle Examination", Philadelphia.

ASTM E 494-92a, "Standart Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials", Philadelphia.

Bakkaloğlu, A., (2000), Toz Metalürjisi Ders Notları, İstanbul.

Baydur, G., (1987), Malzeme, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul: 336-337.

Bozacı, C., (2002), Özel Görüşme.

Claytor, T. N., Frost, H. M., Feiertag, T. H., Sheppard, G. A. ve Shalek, P. D., (1989), "Nondestructive Measurement of Microstructure Evolution in Ceramics", Materials Evaluation, Vol. 47(May 1989): 532-537.

Crack Test for P/M Compacts, Prec. Metal Mold, March 1967, 66.

Dawson, A. LeR., Piché, L. ve Hamel, A., (1996), "On Line Ultrasonic Monitoring of Iron Powder During Compaction", Powder Metallurgy, Vol. 39, No 3: 213-218.

Geçkinli, A. E., (1992), İleri Teknoloji Malzemeleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul: 191-195.

Generazio, E. R., Roth, D. J. ve Baaklini, Y. G., (1988), "Acoustic Imaging of Subtle Porosity Variations in Ceramics", *Materials Evaluation*, Vol. 46(Sempember 1991): 1338-1339.

ISO 3369-1975 (E), "Impermeable Sintered Metal Materials and Hardmetals - Determination of Density".

ISO 3878-1983 (E), "Hardmetals - Vickers Hardness Test".

ISO 4505-1978 (E), "Hardmetals-Metallographic Determination of Porosity and Uncombined Carbon".

Kulaksız, Ö., (2000), *Metal Mesleğinde Tablolar*, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul: 141.

Kunerth D. C., Telshow, K. L. ve Walter J. B., (1989), "Characterization of Porosity Distributions in Advanced Ceramics: A Comparison of Ultrasonic Methods", *Materials Evaluation*, Vol. 47(May 1989): 571-575.

Molinari, A., Straffellini, G., Fontanari, V. ve Canteri, R., (1992), "Sintering and Microstructure of Phosphorus Steels", *Powder Metallurgy*, Vol. 35, No 4: 285-291.

Nasuhoğlu, R. ve Tokmakçioğlu, E., (1990), *Modern Üniversite Fizigi Cilt 2*, Çağlayan Kitabevi, İstanbul: 74-77.

Öveçoğlu, M. L., (1997), "Toz Metalürjisi: Tarihsel Gelişim, Üretim Aşamaları ve Yeni Eğilimler", 9. Uluslararası Metalürji ve Malzeme Kongresi, 11-15. 06. 1997, İstanbul.

Özbek, S., (2001), *İleri Toz Metalürjisi Ders Notları*, İstanbul.

Panakkal, J. P., Ghosh, J. K. ve Roy, P. R., (1984), "Use of Ultrasonic Velocity for Measurement of Density of Sintered Fuel Pellets", *J. Phys. D.: Applied Physics* 17: 1791-1795.

Panakkal, J. P., Willems, ve H., Arnold, W., (1990), "Nondestructive Evaluation of Elastic Parameters of Sintered Iron Powder Compacts", *Journal of Materials Science*, 25: 1397-1402.

Patterson, B. R., Bates, C. E. ve Knopp, W. V., (1981), "Nondestructive Evaluation of P/M Materials", *Progress in Powder Metallurgy*, MPIF, Vol. 37, Princeton, NJ, 67-79.

Patterson, B. R., Miljus, K. L. ve Knopp, W. V., (1982), "Ultrasonic Evaluation of The Strength of P/M Materials", *Progress in Powder Metallurgy*, MPIF, Princeton, NJ, 401-410.

Roebuch, Gee, M. G. ve Morrell, R., (1996), "Developments in Testing and Mechanical Properties of Hard Metals", *Powder Metallurgy*, Vol. 39, No 3: 213-218.

Roth, D. J., Stang, D. B., Swickard, S. M., De Guire, M. R., ve Dolhert, L. E., (1991), "Review, Modeling, and Statistical Analysis of Ultrasonic Velocity – Pore Fraction Relations in Polycrystalline Materials", *Materials Evaluation*, Vol. 49(July 1991): 883-888.

Schlieper, G., Huppmann W. J. ve Kozuch A., (1987), "Non-destructive Determination of Sectional Densities by the Gamma-Densomat", *Progress in Powder Metallurgy*, MPIF, Princeton, NJ, 351-362.

Simchi, A., Danniger, H. ve Gierl, C., (2001), "Electrical Conductivity and Microstructures of Sintered Ferrous Materials: Iron-Graphite Compacts", Powder Metallurgy, Vol. 44, No 2: 148-155.

Simchi, A., Danniger, H. ve Weiss, B., (2000), "Microstructural Modeling of Electrical Conductivity and Mechanical Properties of Sintered Ferrous Materials", Powder Metallurgy, Vol. 43, No 3: 219-227.

Simchi, A., Danniger, H., (2000), "Electrical Conductivity and Microstructures of Sintered Ferrous Materials: Sintered Iron", Powder Metallurgy, Vol. 43, No 3: 209-217.

Topuz, A., (1993), Tahribatsız Muayeneler, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul: 143-145.

Wang, J. C., (1984), "Young's Modulus of Porous Materials", Journals of Materials Science, 19: 809-814.

İNTERNET KAYNAKLARI

- [1] <http://www.mpif.org/technology/whatis.html>
- [2] <http://www.tozmetal.com>
- [3] <http://www.sinter-metal.com>
- [4] http://www.sintermetal-bg.com/product_structural.htm
- [5] <http://www.metal-powder.net/mayfeat1.html>
- [6] http://www.sintermetal-bg.com/frameset_en.htm
- [7] http://www.sintermetal-bg.com/product_soft.htm
- [8] <http://www.gordonengland.co.uk/hardness/vickers.htm>

EKLER

Ek 1 ISO 4505 referans gözenek mikrografları



Ek 1 ISO 4505 referans gözenek mikrografları

A02 %0.02 gözenek



A04 %0.06 gözenek

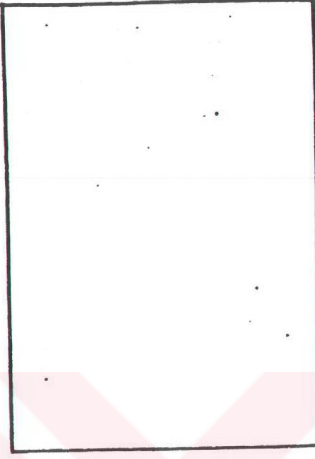


A06 %0.2 gözenek



A08 %0.6 gözenek

Şekil Ek 1.1 Tip A görünür gözenekler (x100) (ISO 4505).



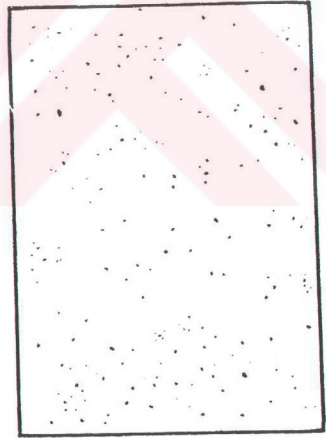
A02 %0.02 gözenek



A04 %0.06 gözenek

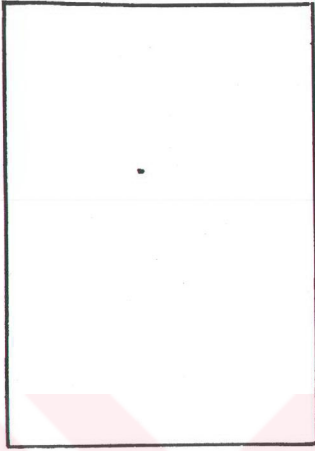


A06 %0.2 gözenek

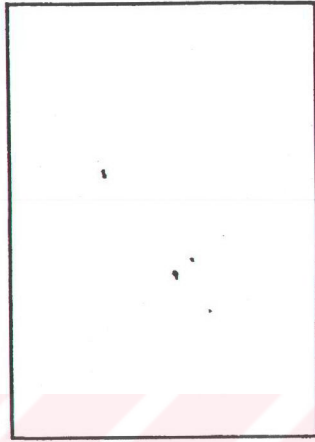


A08 %0.6 gözenek

Şekil Ek 1.2 Tip A görünür gözenekler (x200) (ISO 4505).



B02 %0.02 gözenek
140 gözenek/cm²



B04 %0.06 gözenek
430 gözenek/cm²



B06 %0.2 gözenek
1300 gözenek/cm²



B08 %0.6 gözenek
4000 gözenek/cm²

Şekil Ek 1.3 Tip B görünür gözenekler (x100) (ISO 4505).

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi	28.12.1978	
Doğum Yeri	İstanbul	
Lise	1992-1995	Özel Şişli Terakki Lisesi
Lisans	1995-1999	İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü
Yüksek Lisans	2001-	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Müh. Anabilim Dalı, Malzeme Programı