

**BİLYALI DÖVMENİN Fe + % 2 Cu +% 0,5 C TOZ METAL ÇELİĞİN
YORULMA DAVRANIŞINA ETKİSİ**

76191

Hamza Kemal AKYILDIZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

76192

Eylül 1998

ANKARA

Hamza Kemal AKYILDIZ tarafından hazırlanan BİLYALI DÖVMENİN Fe +
% 2 Cu + %0,5 C TOZ METAL ÇELİĞİN YORULMA DAVRANIŞINA
ETKİSİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.



Prof. Dr. Süleyman SARITAŞ

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Makina Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Rafet ARIKAN



Üye : Prof. Dr. Süleyman SARITAŞ



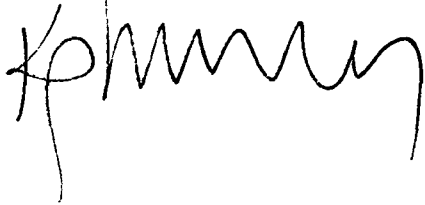
Üye : Doç. Dr. Eldar Kurbanoglu FETHULLAYEV



Üye :

Üye :

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına
uygundur.



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	iv
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. TOZ METALURJİSİ ÜRETİM TEKNİKLERİ.....	3
2.1. Giriş.....	3
2.2. Metal Tozu Üretim Teknikleri.....	4
2.2.1. İndirgeme yöntemi.....	4
2.2.2. Elektrolitik ayrıştırma.....	5
2.2.3. Karbonil yöntemi.....	5
2.2.4. Mekanik yöntemler.....	6
2.2.5 Atomizasyon yöntemi.....	6
2.2.5.1. Su jeti ile atomizasyon.....	7
2.2.5.2. Gaz atomizasyon.....	8
2.2.5.3. Döner disk atomizasyonu	10
2.2.5.4. Döner elektrod metodu.....	11
2.2.6. Sıvı veya gazdan çökeltme yöntemi.....	12
2.3. Tozların Özellikleri.....	12
2.3.1. Kimyasal özellikler.....	13
2.3.2. Fiziksel özellikler.....	13
2.3.2.1. Parçacık şekli ve boyutu.....	13

2.3.2.2.	Teorik ve görünür yoğunluk.....	16
2.3.2.3.	Tozların akış hızı.....	17
2.3.2.4.	Tozların sıkıştırılabilirliği.....	17
2.3.2.5.	Tozların yanıcılık ve zehirleyicilik özelliği.....	18
2.4.	Tozların Karıştırılması.....	19
2.4.1.	Yağlayıcılar.....	19
2.5.	Tozların Sıkıştırılması.....	20
2.5.1.	Sıkıştırma teorisi.....	22
2.5.2.	Sıkıştırma yöntemleri.....	25
2.5.2.1.	Kalıpta şekillendirme.....	26
2.5.2.2.	İzostatik sıkıştırma.....	29
2.5.2.3.	Yüksek enerjili sıkıştırma	30
2.5.2.4.	Ekstürüzyon yöntemi ile sıkıştırma.....	31
2.5.2.5.	Titreşimle sıkıştırma.....	31
2.5.2.6.	Enjeksiyonla sıkıştırma.....	31
2.6.	Sinterleme.....	32
2.6.1.	Sinterleme öncesi işlemler.....	32
2.6.2.	Sinterleme teorisi.....	33
2.6.2.1.	Taşınım mekanizması.....	35
2.6.2.2.	İlk sinterleme kademesi.....	37
2.6.2.3.	Ara kademe sinterleme.....	38
2.6.2.4.	Son kademe sinterleme.....	40
2.7.	Toz Metallerin Mekanik Özellikleri.....	41
2.7.1.	Toz metal parçaların sertlik özelliği.....	42
2.7.2.	Toz metal parçaların çekme, yorulma ve darbe mukavemetleri.....	44
2.8.	Toz Metal Malzemelerin Uygulamaları.....	46
2.8.1.	Talaşlı imalat gerektirmeyen makina parçaları.....	46
2.8.2.	Takım çelikleri.....	47

2.8.3.	Sert metaller.....	47
2.8.4.	Sermetler.....	48
2.8.5.	Kaymalı yataklar.....	48
2.8.6	Gözenekli metaller ve filitreler.....	49
2.8.7.	Sürtünme elemanları.....	50
2.8.8.	Elektirik ve magnetik uygulamaları.....	50
2.8.9.	Diğer uygulamalar.....	51
3.	BİLYALI DÖVME.....	52
3.1	Giriş.....	52
3.2.	Bilyalı Dövme İşlemi.....	54
3.2.1.	Bilyalı dövme makinaları.....	61
3.2.1.1.	İş Parçası tutma yöntemleri.....	69
3.2.1.2.	Makinadaki bilya sirkülasyonu.....	73
3.2.1.3.	Bilgisayar kontrollü bilyalı dövme.....	75
3.2.2.	Bilyalar.....	77
3.2.2.1.	Bilyaların sınıflandırılması.....	78
3.2.2.2.	Bilya üretimi ve özellikleri.....	79
3.2.2.3.	Bilya tüketimi ve konturolü.....	83
3.2.3.	Bilyalı dövmenin parametreleri.....	84
3.2.3.1.	Bilyanın büyüklüğü.....	85
3.2.3.2.	Bilyanın sertliği.....	86
3.2.3.3.	Bilyanın hızı.....	87
3.2.3.4.	Bilyanın çarpma açısı.....	87
3.2.3.5.	Bilya kırılması.....	88
3.2.3.6.	Bilya kalitesi.....	88
3.2.3.7.	Bilyalı dövmenin şiddeti.....	90
3.2.3.8.	Sarma oranı.....	95
3.2.3.9.	Bilyalı dövmede sınırlamalar.....	97
3.3.	Bilyalı Dövmenin Uygulama Alanları ve Etkileri.....	98

3.3.1.	Uygulama alanları.....	98
3.3.2.	Bilyalı dövmenin etkileri.....	102
3.3.2.1.	Bilyalı dövmenin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	102
3.3.2.2.	Aşınmaya etkisi.....	104
3.3.2.3.	Bilyalı dövmenin gerilmeli korozyona etkisi.....	104
3.3.2.4.	Alüminyum alaşımlarına etkileri	106
3.3.2.5.	Çelikler üzerine etkisi	107
3.3.2.6.	Nikel esaslı süper alaşımların yorulmasına bilyalı dövmenin etkisi.....	110
3.3.2.7.	Titanyum alaşımları üzerine etkileri.....	112
3.3.2.8.	Uçak ve helikopter kanat malzemelerinin yüzey hasarları üzerine etkisi.....	113
3.3.2.9.	Yayların yorulma ömrü üzerine etkisi	113
3.3.2.10.	Dişli ömürlerine etkisi ..	114
3.3.2.11.	Yağ pompa kollarının mekanik özelliklerine etkisi.....	115
3.3.2.12.	Toz metalurjisi parçalarına etkisi.....	116
3.3.3.	Yüzey katın kalitesine etki eden faktörler.....	117
4.	DENEYSEL ÇALIŞMA.....	122
4.1.	Giriş.....	122
4.2.	Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	122
4.2.1.	Deneylerde kullanılan malzemeler.....	122
4.2.2.	Deney numunelerinin hazırlanması.....	123
4.3.	Deneysel Çalışmalar.....	125
4.3.1.	Mekanik deneyler.....	125
4.3.2.	Bilyalı dövme işlemleri.....	126
4.3.2.1.	Tezgah özellikleri.....	127
4.3.2.2.	Bilyalı dövme öncesi yapılacak işlemler.....	128
4.3.3.3.	Cihazın çalıştırılması.....	130
4.3.2.4.	Cihazın kullanılması sırasında dikkat edilecek hususlar.....	130

4.3.2.5.	Bilyalı dövmenin şiddetinin belirlenmesi.....	131
4.4.	Yorulma Deneyleri.....	132
4.5.	Mikroyapı İncelemeleri.....	140
5	TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	142
KAYNAKLAR.....		149
ÖZGEÇMİŞ.....		154



**BİLYALI DÖVMENİN Fe + % 2 Cu + % 0,5 C TOZ METAL ÇELİĞİN
YORULMA DAVRANIŞINA ETKİSİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Hamza Kemal AKYILDIZ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Eylül 1998**

ÖZET

Bu çalışmada, Fe + %2 Cu + % 0,5 C metal çelik malzeme üretildi. Biriket malzemeden mekanik deney mumuneleri ve yorulma deney numuneleri hazırlandı. Hazırlanan bu numunelerden malzemenin mekanik özellikleri belirlendi. Yorulma numunelerinin bir gurubuna sinterlemeden hemen sonra hiçbir işlem uygulanmadan yorulma deneyi uygulandı ve malzemenin yorulma ömrü tespit edildi. Diğer gurup numunelere ise 20 A, 25 A, 25 A %200, ve 35 A şiddetlerinde bilyalı dövme işlemleri uygulandı ve yorulma ömürleri dönen eğmeli tip bir yorulma test cihazında belirlendi. Yorulma deneyleri sonucunda seçilen dövme şiddetlerinde uygulanan bilyalı dövme işleminin malzemenin yorulma ömründe artışlar oluşturduğu gözlemlendi. Bu artışların malzemenin dövülme şiddetine göre % 30-35 arasında değiştiği belirlendi. Ayrıca malzemenin mikroyapısı ve gözenek dağılımı incelendi.

Bilim Kodu : 625.00.00.625.02.05

Anahtar Kelimeler : Bilyalı Dövme, Yorulma, Toz Metalurjisi

Sayfa Adedi : 154

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Süleyman SARITAŞ

**THE EFFECT OF THE SHOT PEENING ON THE FATIGUE
BEHAVIOR OF Fe + 2%Cu + 0,5%C POWDER METALURGY STEEL
(M.Sc. Thesis)**

Hamza Kemal AKYILDIZ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
September 1998**

ABSTRACT

In this study, Fe + 2% Cu + %0,5 C Powder metalurgy steel was produced. Mechanical test pieces were machined from the sintered blanks. Mechanical properties of the as received blanks were determined. One group fatigue samples are tested on the fatigue test machine Then other fatigue samples were shot peened to 20A, 25A, 25A %200, and 35A peening intensities. Fatigue testing was carried out by using a rotating cantilever (Wöhler) type fatigue test machine . All shot peening intensities produced a pronounced effect on the fatigue life of the powder metal steel investigated. Aproximately 30-35 % increase was determined on the fatigue life of the powder metalurgy steel. Microsutructural examinations of the material was also carried out.

Science Code : 625.00.00.625.02.05
Key Words : Shot peening, Fatigue, Powder Metalurgy
Page Number : 154
Adviser : Prof. Dr. Süleyman SARITAŞ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans ders ve tez çalışmalarında beni yönlendiren, her türlü maddi ve manevi desteğini esirgemeyen saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Süleyman SARITAŞ'a, Teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmalarında yardımını esirgemeyen sayın Doç.Dr. Remzi VAROL'a, sayın Doç. Dr. Eldar Kurbanoglu FETHULLAYEV'e, sayın Bilal AKTAŞ'a, sayın İlhami YİĞİT'e sayın Mevlüt ARSLAN'a, sayın İbrahim USLAN'a teşekkür ederim. Ayrıca Sinter Metal A.Ş.' ye deneylerde kullanılan Toz Metal Çelik numuneleri hazırladığı için teşekkür ederim. Electronic Incorporated'in başkanı ve "The Shot Peener Newssletter" dergisi editörü sayın Jack CHAMPAIGNE'a da yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1 Yassı hüzmeli V jetleri.....	8
Şekil 2.2 Gaz atomizasyonu yöntemi ile metal tozu üretimi.....	9
Şekil 2.3 Atomizasyon modelinde damlacık oluşumu.....	10
Şekil 2.4 Döner disk atomizasyonu.....	11
Şekil 2.5 Döner elektrod metodu ile metal tozu üretimi.....	11
Şekil 2.6 Küresel ve pul şekilli parçacıklar.....	14
Şekil 2.7 Toz şekilleri.....	15
Şekil 2.8 Hall akış aparatı.....	16
Şekil 2.9 Toz metal sıkıştırma safhalarının basitleştirilmiş görünüşü.....	20
Şekil 2.10 Toz sıkıştırma esnasında işlem sırası.....	22
Şekil 2.11 Kalıp duvarlarında sürtünme kuvvetlerinden doğan, uygulanan ve iletilen basınçlar arasındaki kuvvetler	24
Şekil 2.12 Demi tozunun tek yönlü sıkıştırılmasında yoğunluk dağılımı.....	27
Şekil 2.13 Çift yönlü sıkıştırma	28
Şekil 2.14 Demir tozunun çift yönlü sıkıştırılmasında yoğunluk dağılımı.....	28
Şekil 2.15 Kuru kalıp ile izostatik sıkıştırma.....	29
Şekil 2.16 Yaş kalıp ile izostatik sıkıştırma.....	30
Şekil 2.17 a.) Sinterleme başlangıcında temas halinde parçacıklar.....	33
b.) X yarıçapında bir boyun ile iki küresel parçacığın sinterleme kesiti	
Şekil 2.18 Sinterleme aşamaları.....	34

Şekil 2.19 Kürelerin sinterlenmesinde oluşan iki tür sinterleme mekanizması	36
Şekil 2.20 Ara kademe sinterlemede gözeneklerin tane sınırlarının köşelerine veya içine yerleşmeleri.....	39
Şekil 2.21 Sinterlemenin son aşamasındaki gözeneklerin kapanması ve küreselleşmesi.....	40
Şekil 2.22 Altın ve bakırın sıkıştırma basıncına bağlı sertlik değerinin değişimi.....	42
Şekil 2.23 Sinterleme sıcaklığına bağlı olarak değişik basınçlar altında sıkıştırıldıktan sonra sinterlenen kaba bakır toz numunelerinin sertlik değişimi.....	43
Şekil 2.24 Çekiçle dövme ve T/M biyel kollarının yorulma özelliklerinin mukayesesi.....	45
Şekil 2.25 Kalıcı gözenegin mekanik özelliklere etkisi.....	46
Şekil 3.1 Bilyalı dövülmüş bir kırışte gerilme dağılımı.....	54
Şekil 3.2 Çelikte ve titanyumda dövme şiddeti ve kalıcı baskı gerilmeli tabaka derinliği.....	56
Şekil 3.3. Bilyalı dövme ile elde edilen kalıcı baskı gerilmeleri ve malzemenin maksimum çekme gerilmeleri.....	57
Şekil 3.4. İş parçası yüzeyine bilya çarpması.....	57
Şekil 3.5 Bilyalı dövmenin metal bir plakaya etkisi.....	58
Şekil 3.6 Bilyalı dövülmüş bir kırışteki gerilme profili.....	60
Şekil 3.7 Bilyalı dövülmüş ve dış yükle yüklenmiş kırış	60
Şekil 3.8 Dış bir yükle eğilmeye çalışılan bilyalı dövülmemiş bir kırışteki gerilme dağılımı.....	61
Şekil 3.9 Sifon indüksiyon makinası.....	63
Şekil 3.10 Yerçekimi indüksiyon makinası.....	64
Şekil 3.11 Direkt basınç ünitesi.....	65
Şekil 3.12 Nozul.....	66

Şekil 3.13	Çarklı bilya fırlatma ünitesi.....	67
Şekil 3.14	Ultrasonik dövme odaları.....	68
Şekil 3.15	Tek yönlü döner tutucu.....	70
Şekil 3.16	Doğru hatta hareketli döner tutucu.....	70
Şekil 3.17	Dairesel hatta hareketli döner tutucu.....	71
Şekil 3.18	Radyal dönüşlü konveyör.....	71
Şekil 3.19	Eksenel dönüşlü konveyör.....	72
Şekil 3.20	Kayış konveyörler.....	73
Şekil 3.21	Havalı bilya ayırıcı.....	75
Şekil 3.22	Bilgisayar kontrollü bilyalı dövme makinaları.....	76
Şekil 3.23	Bilya ile dövülen parça geometrisi ilişkisi.....	86
Şekil 3.24	Çelikte bilya sertliği ile gerilme değişimi.....	87
Şekil 3.25	Kabul edilebilir ve kabul edilemez bilya şekilleri.....	90
Şekil 3.26	Bilyalı dövmenin şiddetinin belirlenmesi.....	91
Şekil 3.27	Bilyalı dövmenin şiddetinin ölçüm basamakları.....	92
Şekil 3.28	Almen test şeritleri.....	94
Şekil 3.29	Dövme süresi dövme şiddeti ilişkisi.....	96
Şekil 3.30	Bilyalı dövülmüş çelik malzemede yüzey karakteristiği.....	103
Şekil 3.31	Bilyalı dövmenin gerilmeli korozyona etkisi.....	105
Şekil 3.32	Bilyalı dövmenin alüminyum 7075-T6 alaşımının yorulma ömrüne etkisi.....	107
Şekil 3.33	Bilyalı dövmenin çentikli ve çentiksiz çelik malzemenin yorulma ömrüne etkisi.....	108
Şekil 3.34	Karbürize edilmiş dişlilerin yorulma ömrüne bilyalı dövmenin etkisi.....	115
Şekil 4.1	Sinterlenmiş toz biriket, yorulma numuneleri, ve çekme numunesi şekilleri.....	124
Şekil 4.2	Bilyalı dövme işleminin yapıldığı bilyalama tezgahı.....	129
Şekil 4.3	Yorulma deneylerinin yapıldığı yorulma test cihazı.....	133

Şekil 4.4	Sinterlenmiş bilyalı dövülmemiş numune gurubu S-N grafiği..	135
Şekil 4.5	20 A şiddetinde bilyalı dövülmüş numune gurubu S-N grafiği.	136
Şekil 4.6	25 A şiddetinde bilyalı dövülmüş numune gurubu S-N grafiği.	137
Şekil 4.7	25 A şiddetinde %200 doyum süresinde bilyalı dövülmüş numune gurubu S-N grafiği.....	138
Şekil 4.8	35 A şiddetinde bilyalı dövülmüş numune gurubu S-N grafiği.	139
Şekil 4.9	Dövülmüş ve dövülmemiş numune gurupları S-N eğrileri.....	140
Şekil 4.10	Fe+%2 Cu+%0,5 C toz metal çeliğin gözenek dağılımı.....	141
Şekil 4.11	Fe+%2 Cu+%0,5 C toz metal çeliğin mikroyapısı.....	142
Şekil 4.12	Yorulma numunelerinde gözenek açılması.....	142
Şekil 4.13	Yorulma kırığı yüzeyinin genel görünüşü.....	143
Şekil 4.14	Yükü taşıyan demir tozlarının hasarlanması.....	143

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Standart elek analiz takımı.....	15
Çizelge 2.2. Farklı tane büyüklüğü ve farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş bakır tozunun sertlik değerleri.....	43
Çizelge 2.3. Hadde ve toz dövme çeliklerin özelliklerinin mukayesesi	44
Çizelge 2.4. Çeşitli T/M yatakların mekanik özellikleri	49
Çizelge 3.1. Dökme demir ve çelik bilya boyutları	80
Çizelge 3.2. Kesme tel bilya boyutları.....	81
Çizelge 3.3. Seramik bilya boyutları.....	82
Çizelge 3.4. Deforme olmuş ve kabul edilebilir bilya sayıları.....	89
Çizelge 3.5. Bilyalı dövmenin aşınmaya etkisi.....	104
Çizelge 3.6. Bilyalı dövmenin çeşitli makina elemanlarına etkisi.....	110
Çizelge 4.1. Toz Metal Çeliğin Mekanik Özellikleri.....	126
Çizelge 4.2. Bilyalı dövme işlem parametreleri	132

1. GİRİŞ

Toz metalurjisi (T/M), istenilen kimyasal kompozisyonu verecek şekilde karıştırılmış metal tozlarının, oda sıcaklığında , üretilecek parça şekli ve boyutlarına sahip kalıp içinde pres ile sıkıştırılarak şekillendirilmesi ve bu işlemi takiben koruyucu gaz atmosferi altında yüksek sıcaklıkta sinterlenmesinden oluşan bir üretim yöntemidir. 1970'lere kadar T/M denilince düşük mukavemetli gevrek ve gözenekli parçalar akla gelirken, T/M yöntemleri karmaşık parçaları emek, malzeme ve enerjiden büyük tasarrufla üretmeyi mümkün kılan alternatif imalat yöntemleri olarak endüstrideki yerini almaktadır. Bu gün alışılmış malzemeler için geçerli olan iyi yorulma özellikleri T/M parçalar içinde elde edilmektedir.

T/M parçaların mekanik özelliklerini geliştirmek için çeşitli Toz dövme (T/D) yöntemleri geliştirilmiştir. T/D sıkıştırılmış tozların ısıtılması ve dövülmesi ile tam yoğun (%99,99 dan fazla yoğun) malzemelerin elde edildiği bir yöntemdir. Ancak bu yöntem parça maaliyetini artırmaktadır . Bu nedenle T/M parçaların çeşitli ısı ve mekanik yüzey işlemleri uygulanarak yorulma özelliklerinin iyileştirilmesine çalışılmaktadır. Bu işlemler, nitrürasyon, karbo nitrürasyon, su verme-temperleme gibi ısı işlemler ile bilyalı dövme soğuk haddeleme gibi mekanik yüzey işlemleridir.

Bilyalı dövme çok sayıda bilyadan meydana gelen bir bilya jetinin dövülecek makina parçası yüzeyine, kontrollü şartlarda yönlendirilmesi olarak tarif edilebilir. Bilyalı dövme dövülen parçada üç önemli etkiye sahiptir.

i.)Dövülen parçanın yüzey pürüzlülük değerini yükseltir. ii.)Yüzeyde iş sertleşmesi oluşur. iii.)Yüzeyde kalıcı basma gerilmeli bir tabaka oluşur.

Artık gerilmelerin özelliklerinden birisi, dış kuvvetlerden kaynaklanan gerilmelerle cebrik olarak toplanabilmeleridir. Çalışma esnasında dış kuvvetlerin oluşturduğu gerilmeler ile kalıcı basma gerilmesi değeri toplandığında efektif gerilme değeri küçülmektedir. Bu durumda bilyalı dövülen malzemenin yorulma ömrü yükselmektedir.

Bu çalışmada önce toz metalurjisi üretim teknikleri anlatılmıştır. Daha sonra da bilyalı dövme işlemi hakkında genel bilgiler verilmiş çeşitli bilyalı dövme metotlarından bahsedilmiştir. Tezin deneysel çalışma bölümünde üretimi yapılan toz metal malzeme çeşitli dövme şiddetlerinde bilyalı dövme işlemine tabi tutularak işlemin malzemenin yorulma ömrüne etkisi incelenmiştir. Bu malzeme için maksimum yorulma ömrü verecek optimum bilyalı dövme işlem parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır.

2. TOZ METALURJİSİ ÜRETİM TEKNİKLERİ

2.1. GİRİŞ

Toz metalurjisi, metalurjinin metalik toz veya bu tozların şekillendirilip sinterlenmesiyle yapılan ürünlerin imalatı ile ilgili bölümüdür[1]. Bir başka ifadeyle uygun metotlarla hazırlanan metal tozlarının karıştırılıp iştenilen şekle sıkıştırılarak sokulduktan sonra atmosfer kontrollü fırınlarda sinterlenerek makina parçası üretimi metodudur.

Toz metalurjisi tarihi M.Ö. 2500-3000 yıllarına kadar uzanmaktadır. Eski mısırlılar bu tarihlerde demir oksidi indirgeyerek sünger demir elde etmişler, sonrada sünger demirden istedikleri şekilde kütle oluşturmuşlardır. M.S. 400 yıllarındada Hindistan'da bir demirci ustası günümüzdeki toz metalurjisi yöntemine benzer yöntemle 6,5 ton ağırlığında kütle elde etmiştir[2]. 1892 yılında W. H. Wolaston platini toz metalurjisi yöntemi ile elde ederek toz metalürjisinin uygulayıcısı ismini almıştır. 1826 yılında Rusya'da tedavüle çıkarılan platin para toz metalurjisinin ilk endüstriyel uygulaması olmuştur[3].

Toz metalurjisi ile biçimlendirmenin ilk modern uygulaması elektrik lambası flamanlarının yapılması ile başlamış ve gelişmiştir. Modern endüstride, toz metalurjisi sahasındaki gerek şekil ve gerekse ağırlık bakımından sınırlamalara rağmen bu usul gün geçtikçe hızla gelişmekte ve kullanım alanı bulmaktadır. Bu gün bazı makina parçalarının en ekonomik ve kolay üretim yöntemidir.

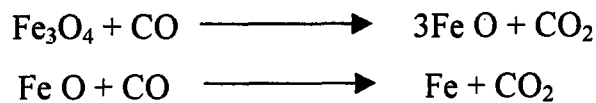
2.2. Metal Tozu Üretim Yöntemleri

Çeşitli metal tozu üretim yöntemleri vardır. Üretilen bu tozların özellikleri de üretim yöntemine göre değişiklik arzeder. Bu yöntemler şunlardır:

1. İndirgeme yöntemi
2. Elektrolitik ayrıştırma yöntemi
3. Karbonil yöntemi
4. Atomizasyon yöntemi
5. Sıvı veya gazdan çökeltme yöntemi
6. Mekanik yöntemler

2.2.1. İndirgeme yöntemi

İndirgeme yöntemi ile genellikle metal oksitlerinin (demir, bakır, tungsten, molibden) hidrojen içinde veya katı karbon ile indirgenmesi anlaşılr. Buradaki saflık bünyenin kalitesini belirler [4]. Halen tungsten ve molibden gibi bazı metaller için tek üretim yoludur. Bu yöntem genellikle demir tozu üretiminde kullanılır. Hammadde olarak magnetit ve haddehane oksitleri kullanılabilir. Üretim sırasında magnetit seramik kaplarda 1050-1200 °C sıcaklıkta fırınlarda bir kaç gün bekletilir. Kap içerisinde kok, kireç taşı, ve magnetit karıştırılır. Kireç taşı kükürdü absorbe eder. Fırında indirgenme sırasında CO gazı yanarak ısı verir. İndirgenmenin tamamlanması ile sünger demir elde edilmiş olunur.



İşlem sonunda kok ve kül demir külçelerden ayrılarak sünger demir kırılıp öğütülerek, yabancı maddelerden arındırılır. Elde edilen tozlar 1250 °C de birbirlerine hidrojenle tavlansarak sinterleme ile bağlanır. Daha sonra öğütülerek istenilen tane büyüklüğüne kırılır.

2.2.2. Elektrolitik ayrıştırma

Bu metotla genel olarak bakır tozları üretilir. Demir tozu da üretilebilir ama maliyeti fazla olduğu için sadece bu metot bakır tozu üretiminde kullanılmaktadır.

Son zamanlarda dentirik yapıli demir tozlarının yüksek derecede üretimi için de elektrolitik ayrıştırma kullanılmaktadır. Bu metotta tozlar doğrudan elektrolitik banyoda çökertilir yada iyi kırılabilme özelliğinde katodda toplanır [4]. Bu yöntemle üretilen demir tozları elektrolitin bulunduğu tekne içinde paslanmaz çelik olan katotta ortalama 48 saatte 2,5 mm kalınlıkta toplanır [5]. Toplanan tozlar yıkandıktan sonra katotdan sıyrılır, öğütölür ve indirgeyici gazlarla tavlansr. Tavlama ile toz parçacıkları yumuşatılarak sıkıştırılabilme özelliği iyileştirilmiş olur.

2.2.3. Karbonil yöntemi

Karbonil yönteminde demir, nikel ve CO gazı etkisinde karbonillerini veren metallerin tozları yüksek safiyetli , düzgün dağılmış küresel taneli yapıda elde edilir. Co, Fe, Mg, Ni uygun sıcaklıkta CO gazı etkisinde karbonille parçalanır ve tane boyları 2 ile 10 mikron olan son derece ince tozlardır [4].

2.2.4. Mekanik yöntemler

Çeşitli talaş kaldırma usulleri ile elde edilen metal talaşlı , kırma ve öğütme ile inceltilip sonrada reaksiyona sokularak tozlar üretilir. Yeterli gevreklikte olmayan metal parçaları ilave katık elemanı katılarak gevrekleştirilir. Böylece kolay kırılması sağlanır. Paslanmaz çelik ve nikel esaslı alaşımlar için çeşitli alaşımlar ısıtılma işlemiyle tane sınırlarında gevrek karbür çözeltisi elde edilerek kırılabilirliğe elverişli durum oluşturulur.

Mekanik yöntemlerde kırma işleminde dik dövücü çekiçler, çeneli kırıcılar ve döner kırıcılar kullanılmaktadır. Bu kırıcılardan birinde kırılan metal parçacıkları genellikle köşeli şekilde veya pul şeklindedir. Bu tozlar öğütülerek inceltirilir. Öğütmede Bilyalı öğütücülerde iri taneli parçacıklar döner fiçi içine konulur fiçi içinde bulunan aşınmaya dayanıklı cisimlerle birlikte döndürülerek parçaların ufalanması sağlanır. Burada fiçinin dönme hızı önemlidir. Hızlı dönerse toz, fiçi duvarlarına yapışabilir. Bu da toz hareketinin azalmasına neden olur. Uygun dönme hızı sağlandığında fiçi içindeki kırıcı bilyaların ve parçalanacak malzemenin fiçinin üst kısmına kadar yükselip düşmesi sağlanır. Tozu öğütmek için ayrıca pervaneli öğütücüler de kullanılabilir.

2.2.5. Atomizasyon yöntemi

Atomizasyon yöntemi eritilebilen tüm metallerden toz elde etmek için kullanılabilen bir yöntemdir. Bu yöntemin üretim tekniği : bir sıvı metalin pota dibindeki delikten akması sırasında ; ergimiş metalin üzerine basınçlı gaz veya sıvı gönderilmesi çok ince parçalara ayrılarak katılaşmasıdır.

Kullanılan bütün tozların %80'den fazlası atomizasyon yöntemi ile üretilir. Diğer üretim tekniklerine göre tane şekli, tane büyüklüğü ve dağılımı kontrolü çok kolaydır. Özellikle alaşım tozlarının üretiminde bu yöntem çok uygundur. Alaşım tozlarının tamamı atomizasyonla üretilir; çünkü en iyi homojenizasyon bu yöntemde sağlanır.

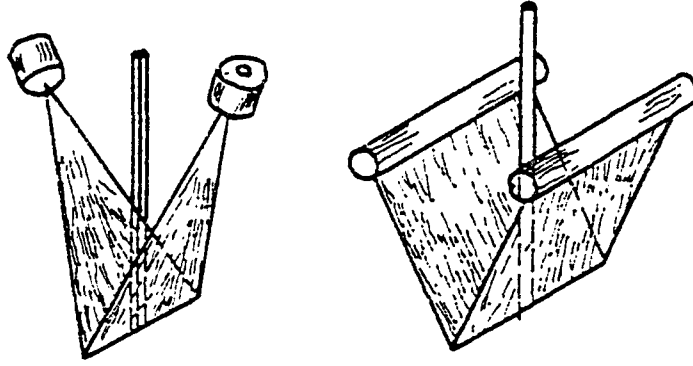
Bu yöntemde elde edilen tanelerin boyutları gönderilen hüzmelerin basıncı ile ilgilidir, şekilleri ise soğutma zamanı ve sıvı metal sıcaklığı ile ilgilidir. Uzun soğutma zamanı ve yüksek sıvı metal sıcaklığı, dağıtıcı hüzmeye gaz kullanımı sonucunda küresel taneler elde edilebildiği gibi su hüzmesi çabuk soğuma sağlayacağından muntazam olmayan şekilli taneler elde edilir.

Atomizasyonla metal tozu üretmede kullanılan değişik teknikler vardır . Bunlar:

1. Su jeti ile atomizasyon
2. Gaz jeti ile atomizasyon
3. Döner diskle atomizasyon
4. Döner elektrod metodu

2.2.5.1. Su jeti ile atomizasyon

Atomizasyonla üretilen tozların % 80'i sıvı metali su jeti ile keserek elde edilir. Şekil 2.1 de yaygın olarak kullanılan iki jet sistemi gösterilmektedir. Bu iki sisteme Yassı hüzmeli V jetleri adı verilir (Flat stream V-jets)[6]. Biri iki tarafında iki ağızlıktan dar açıyla ayrılan yassı hüzmeli, hüzmeli V jetleri, demir ve paslanmaz çelikten (su ile) nikel ve kobalt alaşımlarına (gaz ile) kadar yaygın olarak kullanılmaktadır.

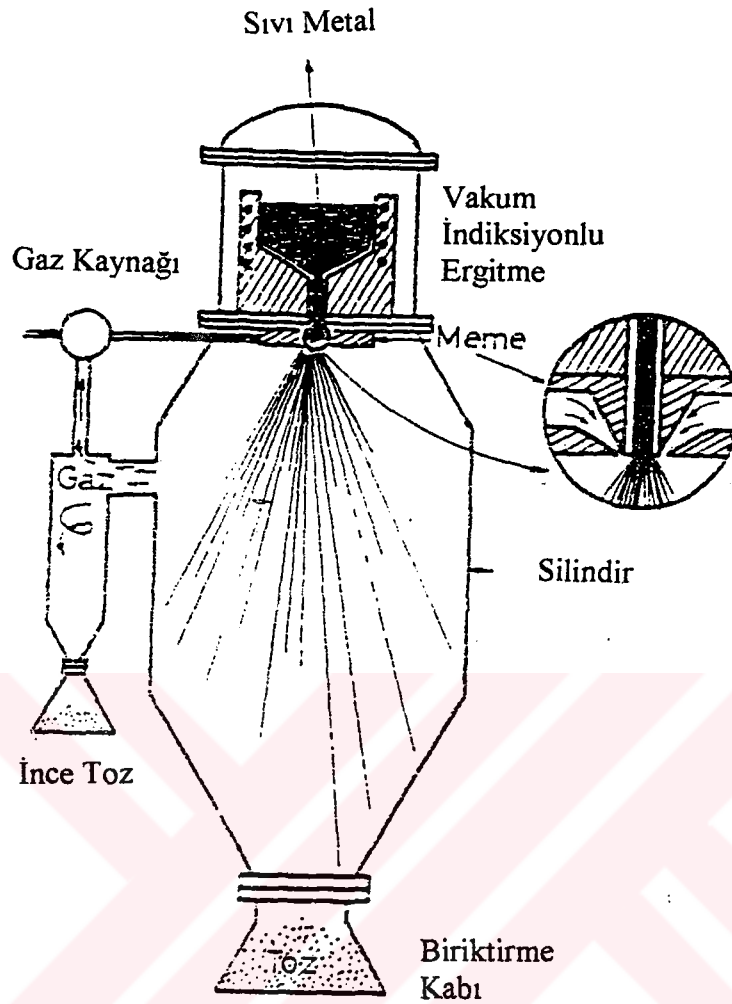


Şekil 2.1. Yassı Hüzme V Jetleri

2.2.5.2. Gaz atomizasyonu

Su ile atomizasyondan sonra en fazla gaz atomizasyonu kullanılır. Gaz atomizasyonunda genelde azot gazı kullanılmaktadır. Gaz atomizasyonu sıvı metal hüzmesine yüksek basınçlı gaz püskürterek hüzmenin dağılımı ile sıvı metal damlacıkları elde edilmesi işlemidir. Şekil 2.2.' te bir gaz atomizasyon düzeneği görülmektedir.

İki yada daha fazla ağızlık ; sıvı metalin akma ekseninin etrafına yerleştirilir. Ağızlık eksenleri sıvı metalin akma eksenine eşit açıdadırlar ve gaz jetleri ile sıvı metal bir noktada kesişirler. (Ters tepe noktası)

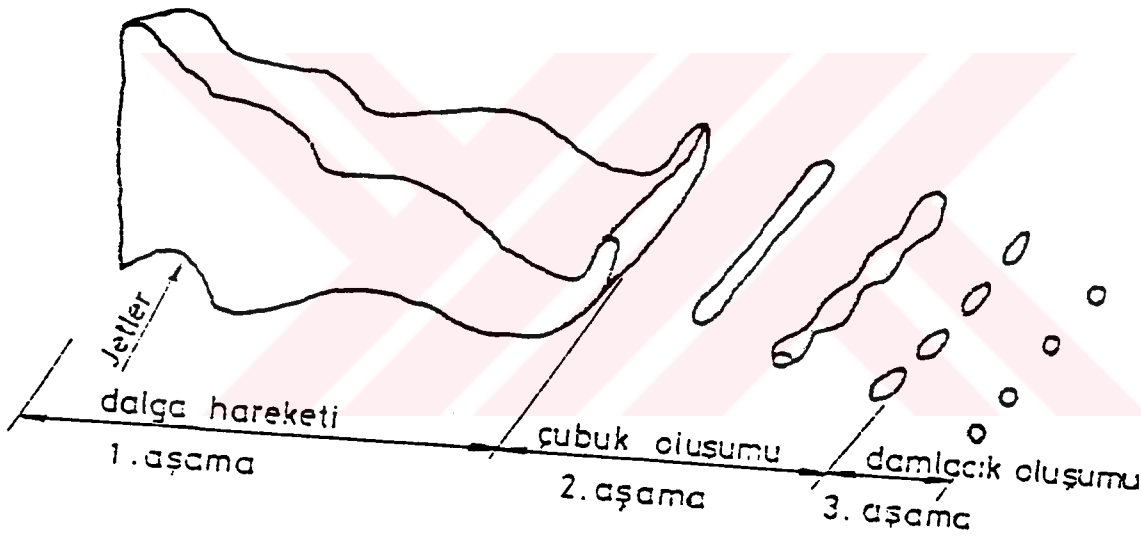


Şekil 2.2. Gaz atomizasyon yöntemi ile metal tozu üretimi

İki akışkanlı atomizasyon, metaller için en fazla kullanılan metottur. Su atomizasyonu gaz atomizasyonundan daha ekonomiktir. Gaz atomizasyonu; tozların oksijen miktarının düşük olması istendiğinde ve yuvarlak şekilli tozlar istendiğinde tercih edilen bir yöntemdir.

Atomizasyon mekanizması:

Atomizasyon mekanizması tam olarak bilinmemekle beraber üç aşamada gerçekleştiği varsayılır. Pota deliğinden akmakta olan metal hüzmesinde bir iç dağılma eğilimi vardır. Bu eğilim metal hüzmesini bir arada tutan yüzey gerilim kuvvetinden büyük hale geldiğinde sıvı metal dağılacaktır. Sıvı metalin dağılımından oluşan “Çubuk” ların atomizasyon akışkanının kinetik enerjisi ile parçalanmasından damlacıklar oluşur. Katılaşma çabuk oluşmaz ise damlacıklar küreseldirler.

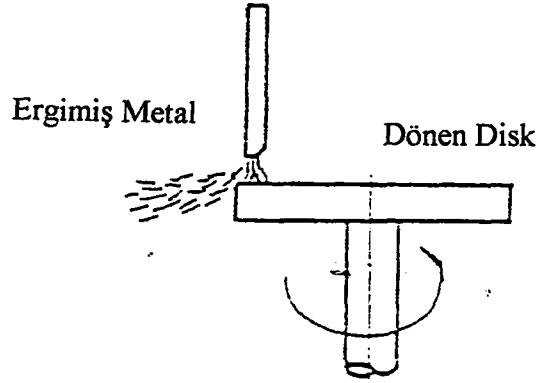


Şekil 2.3. Atomizasyon modelinde damlacık oluşumu

2.2.5.3. Döner disk atomizasyonu

Sıvı metal bir potadan dönmekte olan disk üzerine akar, diskin dönme hareketinden dolayı metal hüzme saçılarak bir potaya toplanır. Sıvı metal ile disk

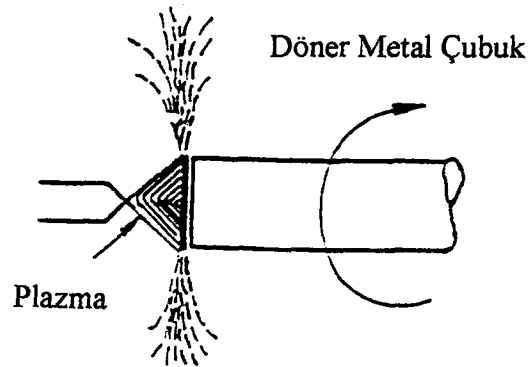
arasındaki sürtünmenin kontrol güçlüğü bu yöntemin tek problemidir. Döner disk atomizasyonunda düz disk, çanak disk gibi değişik diskler vardır .



Şekil 2.4. Döner disk atomizasyonu

2.2.5.4. Döner elektrod metodu

Aşağıdaki şekilde Bu metotla metal tozu üretimi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Döner Elektrod Metodu ile Metal Tozu Üretimi

Bu yöntemde ön arafı bir ark plazma ile ısıtılan bir metal çubuğun çok hızlı devirlerde dönmesi ile (1000dev/dk veya daha yüksek) ergimiş damlacıklar merkez kaç kuvveti etkisi ile savrulurlar. Bu damlacıklar özel odacıkta toplanır. Bu yöntemle 30-500 mikron [5] tane büyüklüğünde iyi saflıkata tozlar elde edilir.

2.2.6. Sıvı veya gazdan çökertme yöntemi

Çeşitli sıvı veya gazlardan faydalanarak kimyasal yollarla metal tozları üretmek mümkündür. Metal iyonları kapsayan eriyiklerden daha az asal olan başka bir elamanla kimyasal yerdeğiştirme suretiyle metal tozları üretilir. Örneğin kimyasal reaksiyon sonucu bakır tozlarının demirle yerdeğiştirmesi gibi.

2.3. Tozların Özellikleri

Metal tozlarının birçok özellikleri üretim tekniklerine göre belirlenmektedir. Bu sebeple TİM parçaların kullanım alanlarına göre değişik metotlarla üretilen tozlar kullanılmaktadır. Bazı durumlarda da farklı imal yöntemi ile hazırlanmış tozlar aynı tip bir parçanın imalında eşdeğer olarak kullanılabilir. Örneğin elektrolitik ve indirgenmiş bakır tozlarının bronz yataklarda kullanılması gibi [5]. Metal tozlarının özelliklerini iki ana başlık altında toplamak mümkündür.

1. Tozların kimyasal özellikleri
2. Tozların fiziksel özellikleri.

2.3.1. Kimyasal özellikler

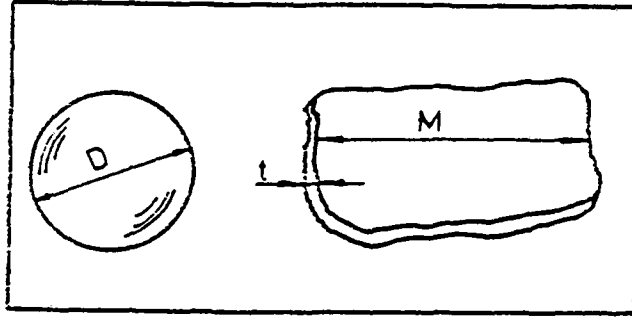
Kimyasal özelliklerden tozun bileşimi ve saflığı anlaşılmaktadır. Genellikle tozların içerisinde üretim sırasında kimyasal indirgeme sırasında yabancı parçacıklar karışır. Yeterli indirgenmemiş toz taneciklerinde oksit kalıntılarına rastlanabileceği gibi tane sınırlarında da oksitler görülür. Tozların hava ile teması sonucu da tozlar oksitlenebilir. Tozların preslenmesi sırasında Cr, Zr, Al, Pb, Sn gibi metallerin dengeli oksitlerinin kalıp ve zımba yüzeylerinde olumsuz etkileri gözlenmiştir.

2.3.2. Fiziksel özellikler

Tozların fiziksel özelliklerini; parçacık boyutu, parçacık şekli, yapısı, özgül yüzey, görünür yoğunluk ve akış hızı gibi özellikler belirler

2.3.2.1. Parçacık şekli ve boyutu

Toz tanelerinin eleklerle veya diğer yöntemlerle tespit edilen boyutlarıdır. Tozların tamamının aynı boyutta olduğu söylenemez; ancak ortalama tane boyutundan söz edilebilir. Toz şekli; parçacık şekli karmaşık oldukça parçacık boyutu ölçüm şekilleri de değişir. Şekil 2.6.'da görüldüğü gibi küresel bir toz için bir tek çap ölçmek yeterli iken pul şeklindeki parçacıklarda pul kalınlığı ve düzlem yönündeki boyutun da ölçülmesi gerekir.



Şekil 2.6. Küresel ve Pul şekilli Parçacıklar.

Parçacık toz karmaşık ise üç dört boyutun ölçülmesi gerekebilir. Çok fazla karmaşık parçacığın tane boyutu yüzey alanından gidilerek bulunabilir.

Tozların tane büyüklükleri genellikle elek analizi ölçüm tekniği ile yapılır. Ölçüm döküm kumu tane büyüklüğünün tespiti gibi yapılır. Elek büyüklüğü delik büyüklüğü ile ölçülür. Elek büyüklüğü Meş (mesh) ile belirlenir. Günümüzde metrik sisteme geçildiğinden artık eleklerde delik cinsinin mikron olarak değeri yazılıdır.

Elek hiçbir zaman bir toz tanesinin gerçek boyutunu ölçmez sadece belirli bir değerdan büyüktür veya küçüktür diye ayırır.

Parçacık şekli; tozların akış, görünür yoğunluk, sıkıştırılabilirlik; ham mukavemet, gerginlik, sinterlenebilirlik gibi özelliklerini etkileyen önemli etkenlerdir. Şekil 2.7.' de görüldüğü gibi toz parçacık şekilleri homojen bir şekilde değildir. Tek boyutlu (İğne, düzgün olmayan çubuk) , iki boyutlu dentirik, pul ve üç boyutlu (Küresel, yumru v. b) olarak sınıflandırılabilir [7].

Çizelge 2.1. Standart Elek Analiz Takımı [12].

Meş	Delik Büyüklüğü [Mikron]	Hata [Mikron]
30	600	25
40	425	19
50	300	14
60	250	12
80	180	9
100	150	8
140	106	6
200	75	5
230	63	4
235	45	3

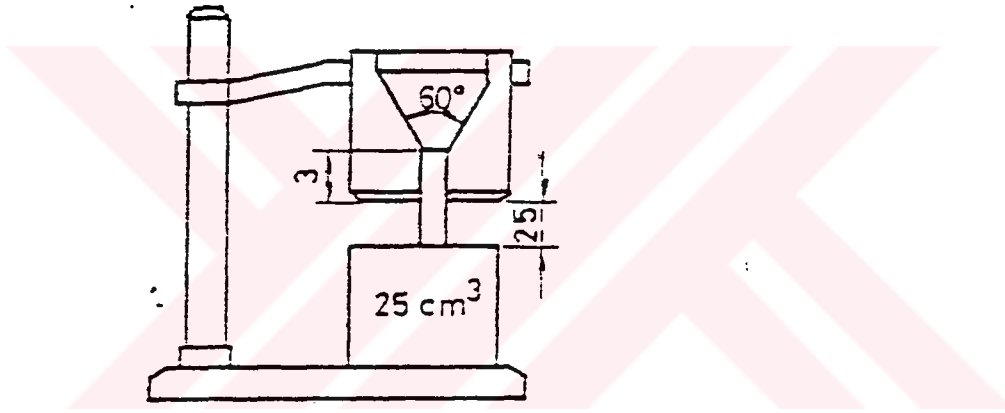
Aşağıda şekil 2.7’de çeşitli üretim metotları ile üretilmiş toz şekilleri gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Toz Şekilleri

2.3.2.2. Teorik ve görünür yoğunluk

Hall akış aparatı ile ölçülen görünür yoğunluk parçacık şekli, boyutu, yüzey alanı ve parçacıkların düzeni gibi faktörlerle yakından ilgilidir. Hall akış aparatı Şekil 2.8.' de görüldüğü gibidir. Aparatın standart yükseklikteki hunisinden 25 cm^3 hacimdeki kabına toz doldurulur. Toz hunisinden akarak altındaki kabı doldurur. Kab dolunca ağırlığı tartılarak yoğunluğu bulunur. Görünür yoğunluk belli şartlar altında dökülerek elde edilen tozun yoğunluğudur [1]. Başka bir ifadeyle görünür yoğunluk sıkıştırılmamış tozun ağırlığıdır.



Şekil 2.8. Hall Akış Aparatı

Teorik yoğunluk ise ergitilerek dökülmüş malzemenin yoğunluğudur. Metal tozlarından parça üretimi sırasında tozlar titreşime maruz kaldıkları için tozlara ait vurgu yoğunluğunun bilinmesinde fayda vardır. Kaba toz doldurulur ve sonra bu kap herhangi bir titreşimli cihazda titreştirilir veya kaba dışarıdan vurularak tozun kap içinde titreşim sonucu sıkışması sağlanır. Daha sonra son durumdaki tozun kap içindeki gösterge karşılığı hacmi okunarak toz ağırlığı tartılır. Tartılan toz kütle okunan hacme bölünerek tozun vurgu yoğunluğu tespit edilir.

2.3.2.3. Tozların akış hızı

Toz metal parça üreten firmalarda üretim sırasında tozların kolay akması önem arzeder. Çünkü üretimin hızlı ve seri olabilmesi için tozların kaplardan kalıplara, dolayısı ile kalıplar içerisinde kolay akması gerekir. Tozların akış hızı zamanı da kısaltacağından görünür yoğunluk ve akış arasında da bir ilişki mevcuttur. Görünür yoğunluğu yüksek olan tozlar kısa akış süresine sahiptir.

Tozların akış hızı yine Hall akış aparatından faydalanılarak bulunabilir. Bunun için; 50 gr toz 100 °C ta bir saat kurutulduktan sonra Hall akış aparatına doldurulur ve akış süresi zaman olarak tespit edilir. Kütlenin (gr) zamana (sn) bölümü toza ait akış hızını verir.

İyi akış özelliğine sahip olmayan tozlar ise şev açısından faydalanarak bulunur. Şev açısı; tozun belirli şartlar altında yatay bir yüzey üzerine serbestçe döküldüğünde oluşturduğu yığının taban açısıdır [1].

2.3.2.4. Tozların sıkıştırılabilirliği

Uygulanan basınç ile kolay sıkışabilme ve yüksek yoğunluk sağlama kabiliyetidir. Sıkıştırılabilirlik yoğunlaşma parametresi ile tanımlanır.

$$\text{Yoğunlaşma parametresi} = \frac{P_h - P_g}{P_t - P_g}$$

Burada,

P_h = Ham yoğunluk

P_g = Görünür yoğunluk

P_t = Teorik yoğunluk

Ham yoğunluk sıkıştırılmış tozun sinterlemeden önceki yoğunluğudur. Yani tozun sıkıştırmadan sonra, sinterlemeden önceki yoğunluğudur.

Yoğunlaşma parametresi tozların yoğunlaşma oranını gösterir, bu oran ham yoğunluk teorik yoğunluğa yaklaştıkça 1 görünür yoğunluğa yaklaştıkça 0 olur [7].

Sıkıştırma oranı ise tozun sıkıştırmadan önceki hacminin sıkıştırmadan sonraki hacmine oranıdır. Tozun sıkıştırılabilirliği, tane büyüklüğüne ve dağılımına, tozun sertliğine ve kullanılan yağlayıcıya bağlıdır.

2.3.2.5. Tozların yanıcılık ve zehirleyicilik özelliği

Bir çok toz çeşidi düşük denebilecek sıcaklıklarda, bazıları oda sıcaklığında oksijenle birleşerek ateşlenebilir. Ateşleme yönü ile 50 mikronun altındaki parçacıklar zararlı, 1 mikronun altındaki parçacıkların ise tehlikeli olduğu söylenebilir [7]. İnsan vücuduna solunum ve sindirim yoluyla alınan tozların vücutta birikmesi neticesi teklikeli rahatsızlıklar ortaya çıkmaktadır. Radyo aktiflik arzeden tozlar ise özellikle tehlikelidirler. Bunlara karşı gerekli önlemler alınmalıdır.

2.4. Tozların Karıştırılması

Tozların karıştırılması çift konili karıştırıcılarda yapılmaktadır. Karıştırma ünüform bir toz elde etmek amacı ile belli sürede, tane boyu ve şekline göre birikimleri engelleme amacı ile yapılmaktadır. Karıştırma süresinin uzun tutulması; toz taneciklerinin, kırılarak küreleşmesine neden olacağından sıkıştırma özelliğini azaltacaktır.

2.4.1. Yağlayıcılar

Şekillendirmede meydana gelen enerji kayıplarını gidermek veya azaltmak amacı ile tozlara belli yüzdelerde yağlayıcılar ilave edilmektedir. Tozlara yağlayıcı olarak toz grafit, MoS_2 , çinko stearat ve stearik asit katılabilir. Metal stearitler ergime noktası düşük organik bileşiklerdir. Yağlayıcıların yoğunlukları düşük olduğundan ağırlıkça az miktar ilave edildiğinde hacim olarak büyük yer işgal eder. Grafit tozu metal tozlara yağlayıcı olarak % 1-1,5 oranında katılır ve iyi sonuçlar verir.

Şekillendirme basıncı ve yoğunluk arttıkça sıyırma basıncı da o oranda artar. Sıyırma basıncı şekillendirilmiş parçanın kalıptan çıkarılmasını gerektiren basınçtır ve yağlayıcının özelliğine bağlıdır. Sıyırma basıncını düşük tutan bir yağlayıcı iyi bir yağlayıcıdır.

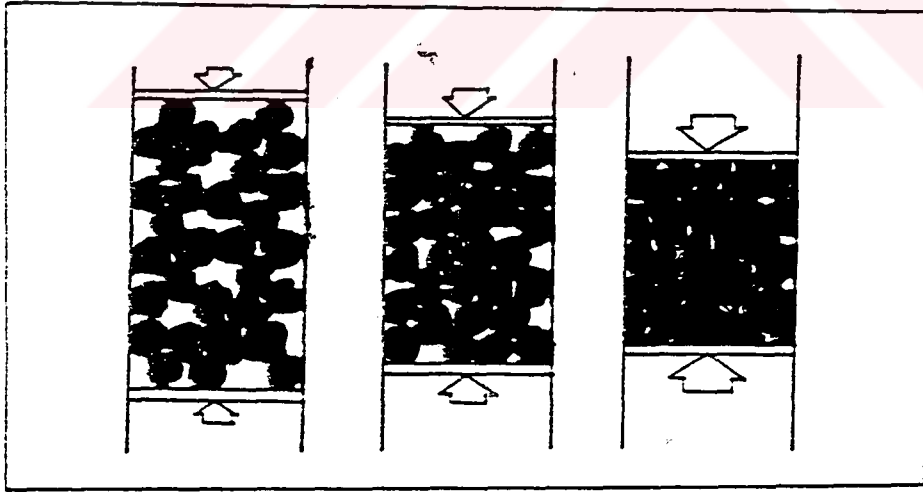
Metal tozlarına ilave edilen yağlayıcılar yapıştırıcı vazifesi görüp parça mukavemetini artırdığı gibi bazı yağlayıcılarda (Ergime derecesi düşük olanlar) sinterleme sırasında gözenek oluşturabileceğinden sinterleme sonrası yoğunluk ve

mukavemet artması gerektiği halde bazı durumlarda azalması yağlayıcıdan kaynaklanabilir.

2.5. Tozların Sıkıştırılması

Yağlayıcı ile karıştırılan metal tozları kalıplara koyulur ve presle sıkıştırılır. Sıkıştırma; toz malzemeye parça şeklini vermek, istenilen oranda gözeneklilik sağlamak gibi amaçlar için yapılır. Sıkıştırmada kullanılan kalıp ve zımbalar kusursuz olmalıdır. Kalıp ve maça pimi tungsten karbürden, alt ve üst zımbalar yüksek kaliteli takım çeliğinden yapılmalıdır.

Basınç uygulamada ilk geçişme gevşek tanecik düzeninden daha sıkı bir paketleme yönündedir. Uygulanan basıncın artması ile tanecikler arası nokta teması bozulur.



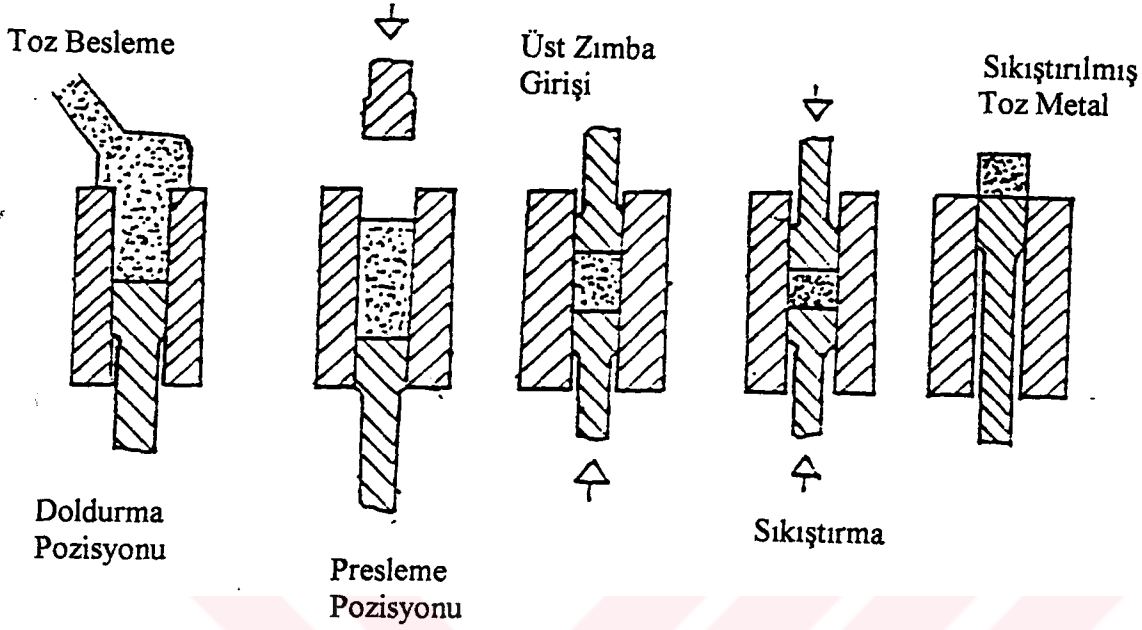
Şekil 2.9. Toz metal sıkıştırma safhalarının basitleştirilmiş görünüşü

Başlangıçta toz, yaklaşık olarak görünür yoğunluğa eşit bir yoğunluğa sahiptir. Tanecikler arasında boşluklar vardır. Basınç arttıkça gözeneklilik azalır, taneler arası temas sayısı ve alanı da artma gösterir.

Artan basınçla plastik deformasyon sayesinde temas genişlemesi ile yoğunluk artar. Böylece basınç, temaslarda lokalleşmiş deformasyona sebep olur. Tanecikler arası mesafe azaldığından yeni temaslar oluşur ve gerilme sertleşmesi sağlanır.

Sıkıştırma basıncı arttıkça plastik deformasyona uğrayan tanecik sayısı artar. Yeterli sıkıştırma basıncında gözeneklilik miktarı azaldığından bütün tanecikler sertleşmiş(iç gerilmeli) hale gelir.

Genellikle toz sıkıştırma şekil 2.10.' da görülen safhalarda sert kalıpiçinde yapılır. Çoğu zaman sıkıştırma üst ve alt zimbalar kullanılarak yapılır. Üst zimba tozu doldurma esnasında geri çekilir. Toz girişi sırasında alt zimba pozisyonuna dolu pozisyon denilir. Bu önceden belirlenmiş toz miktarının dolmasına izin verir. Doldurmadan sonra alt zimba presleme pozisyonuna düşer ve üst zimba kalıp içine gömülür. İşlemden sonra üst zimba kalkar alt zimba parçayı yukarı doğru çıkarır işlem bitmiş olur.



Şekil 2.10. Toz sıkıştırma esnasında işlem sırası

2.5.1. Sıkıştırma teorisi

Şekillendirme sırasında kütle hareketi tozların daha yoğun bir hal almasına neden olur. Sıkıştırma genellikle uygulanan sıkıştırma kuvveti doğrultusunda meydana gelirken sıkıştırma sırasında birbiri üstüne yığılan tozların zorlanması ile kalıp yanlarına doğru bir hareket meydana gelir. Düşük yoğunluklu tozlar arasında tanecikler arası temas azdır. Bununla birlikte taneciklerin hareket edeceği hacim fazla olduğundan toz kütle hareketi daha kolay olur.

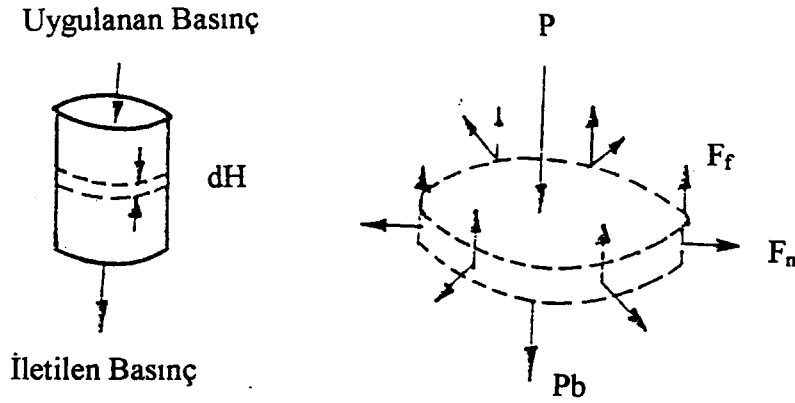
Sıkıştırma sırasında taneciklerin plastik deformasyona uğraması ile şekillendirilen parçadaki gözenek miktarı azalır, yoğunluk artışı görülür. Şekillendirmede değişik basınçlarla preslenen parçaların mikrosertliklerindeki artan değerler

plastik deformasyondan kaynaklanan sertleşmenin bir sonucudur. Yoğunluktaki bu artış hava ile dolu boşlukların yerini sıkıştırma sonucu metalin almasından ileri gelir. Boşlukların yerlerini tozların alması ancak havanın yapıyı terk etmesi ile mümkündür. Artan sıkıştırma basınçlarında havanın bir kısmı gözenekleri terkedemeyerek hapis kalır. Bu gözeneklerde hapis edilen hava yüksek sıkıştırma basınçlarında iç yapıda hasara yol açar. Bu nedenle yoğunluk arttıkça mukavemetin de artması gerekirken %86' nın üzerindeki yoğunluklarda çekme mukavemetinin azalmasını Sarıtaş havanın izoleli gözeneklerde hapsedilmesi ile izah etmiştir [8].

Toz sıkıştırmada önemli bir problem toz ile kalıp duvarı sürtünmesidir. Bu sürtünme uygulanan basıncın tozun kalıp içindeki derinlik mesafesi ile azalmasına sebep olur. Şekil 2.11 'de çapı D ve yüksekliği H olan silindirik katı bir toz metalin sıkıştırılmasında yüksekliğin ince bir kesitini incelemek, elemanın tepedeki p basıncı ile elemanın tabanına iletilen Pb basıncının sürtünmeye karşı etki eden dikey kuvvet ile farklılaşacağını gösterir. Kuvvetler dengesi aşağıdaki gibi ifade edilir [9].

$$F = 0 = A (P - P_b) + U \cdot F_n$$

Burada ; F_n normal (dikey) kuvvettir. U, ise toz ve kalıp duvarı arasındaki sürtünme katsayısı, A, kesit alanıdır.



Şekil 2.11. Kalıp duvarındaki sürtünme kuvvetlerinden doğan, uygulanan ve iletilen basınçlar arasındaki fark sıkıştırma esnasında kuvveti dengeler

Normal kuvvet bir orantı sabiti olan Z ile uygulanan basıncın terimleri olarak verilebilir. Z faktörü radyal gerilmenin aksel gerilmeye oranıdır. Böylece

$$F_n = \pi Z.P.D.dH \quad \text{olur.}$$

F_f sürtünme kuvveti, normal kuvvet ve sürtünme katsayısından şöyle hesaplanır.

$$F_f = \pi.U.Z.P.D.dH$$

Toz elemanın üstü ve altı arasındaki basınç farkı dP şöyle verilir

$$DP = P - P_b = -F_1.A = 4.u.z.Pd.H/D$$

Sıkıştırma yüksekliği açısından basınç teriminin entegrasyonu sıkıştırma elemanı altındaki her hangi bir X pozisyonundaki basınç aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$P_x / P = \exp (-4.u.z.x / D)$$

Bu ifade tek etkili preslemeye uygulanabilir. Basıncın kalıp derinliği ile azaldığını gösterir. Tek etkili presleme için ortalama sıkıştırma gerilmesi

$$\sigma = P (1- Z u z H /D)$$

Çift etkili presleme için ortalama gerilme yaklaşık şöyledir.

$$\sigma = P (1- 4 u z H /D)$$

Ortalama gerilme ise boy/çap oranına, tanecikler arası sürtünme Z ve kalıp duvarları sürtünmesi U' ya bağlıdır. Yüksek ortalama gerilmeler kısa katılar halinde büyük çaplı ve yağlanmış kalıp duvarları ortamlarında elde edilir. Kalıp duvarlarının yağlanması sürtünme kuvvetini düşürerek sıkıştırmaya yardım eder.

Sıkıştırmadan meydana gelen tanecikler arası bağlar ham mukavemeti sağlar. Bu katı yüzeyler tanecikler arasındaki nokta temasından vuku bulan bozulma ve kaynaklaşmadan meydana gelir.

2.5.2. Sıkıştırma yöntemleri

Tozların sıkıştırılmasında uygulanan şekillendirme metotları şu şekilde sınıflandırılabilir.

1. Kalıpta sıkıştırma

2. İzostatik sıkıştırma
3. Yüksek enerji sıkıştırma
4. Ekstrüzyonla sıkıştırma
5. Titreşimle sıkıştırma
6. Enjeksiyonla sıkıştırma

2.5.2.1. Kalıpta şekillendirme

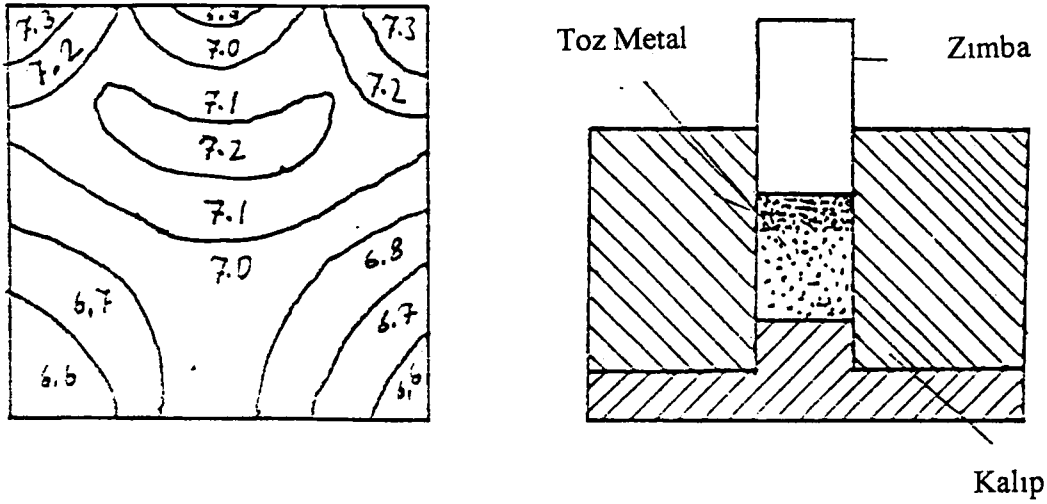
En çok kullanılan metot budur. Bu metotta 10 Mpa ile 200 Mpa arasında basınç kullanılır. Tespit edilen basınç şekillendirilecek kalıp içindeki toz kütlesinin tek ve çift tarafından dikey doğrultuda uygulanır. Basınç uygulama şekline göre;

1. Tek Yönlü Sıkıştırma
2. Çift Yönlü Sıkıştırma

Olarak ikiye ayrılır.

2.5.2.1.1. Tek yönlü sıkıştırma

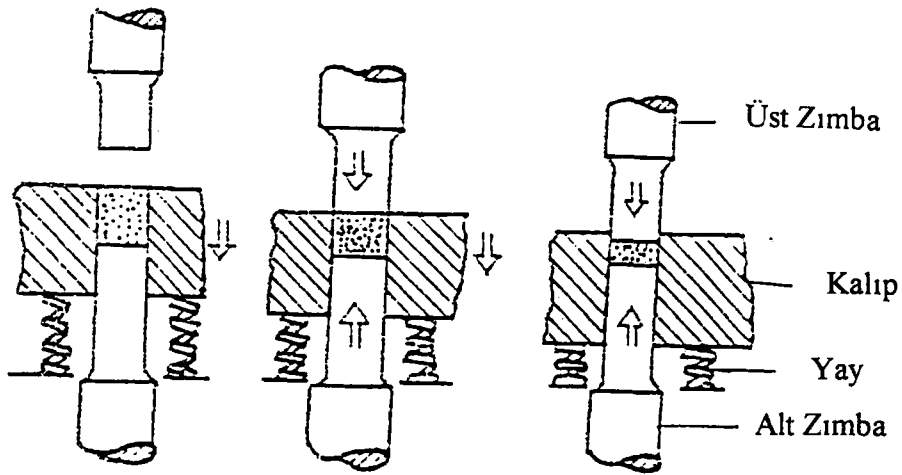
Bu sıkıştırma yönteminde pres tek yönlü kuvvet uygular. Üst zımba kalıp boşluğuna girerek sıkıştırılacak tozu sabit olan alt zımbaya kalıp boşluğunda sıkıştırır. Tek yönlü sıkıştırmada tozlar arası ve tozlarla kalıp yüzeyi arasında oluşan sürtünme düzensiz bir basınç dağılımına neden olur. Uygulanan sıkıştırma kuvveti kalıp boyunca düzenli olarak uygulanamadığından sıkıştırılan parçadaki yoğunluk homojen bir dağılım göstermemektedir. Yoğunluk hareketli zımbaya yakın bölgelerde daha büyüktür ve sabit zımbaya doğru gidildikçe azalmaktadır.



Şekil 2.12. Tek yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımı. Demir tozu (gr / Cm^3)

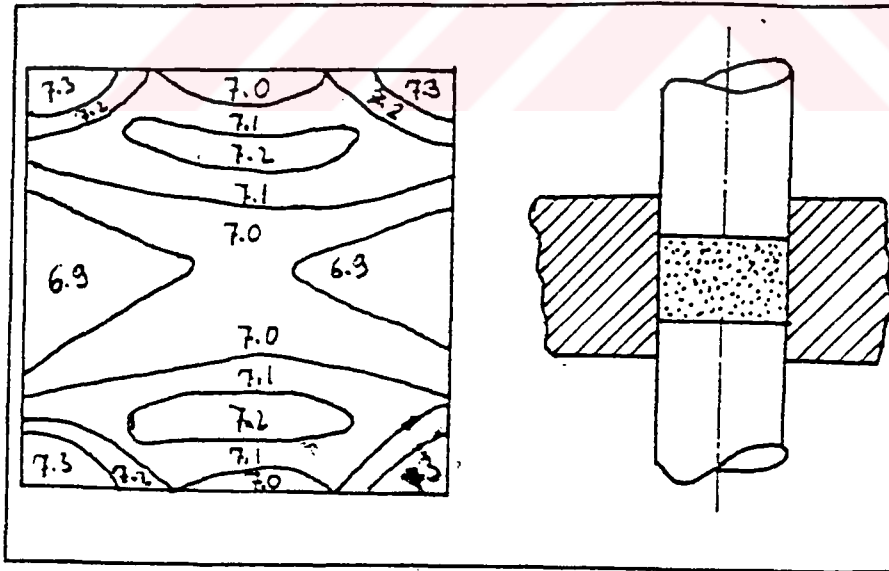
2.5 sıkıştırma

Bu metotda toz alt ve üst zimbalar tarafından aynı anda sıkıştırılmaktadır. Alt ve üst zimba tarafından eşit veya farklı basınçlar uygulanabilir [10]. Çift yönlü sıkıştırma yönteminde üst zimbanın toza uyguladığı basınç sonucu kalıp yüzeyleri ile toz arasındaki sürtünme kuvveti kalıbı destekleyen (Yay v.b.) kuvvetleri geçtiğinde kalıp aşağı hareket ederek sanki alt zimba yukarı hareket ediyormuş görünümü verir. Gerekli basınç uygulandıktan sonra sıkıştırma işlemi tamamlandığında iş parçası alt zimbanın yukarı hareketi ile kalıptan çıkarılır.



Şekil 2.13. Çift Yönlü sıkıştırma

Çift yönlü sıkıştırmada parçanın yoğunluk dağılımı tekyönlü sıkıştırmadan daha homojendir. Şekil 2.14' te çift yönlü preslenmiş toz metalin yoğunluk dağılımı gösterilmektedir.



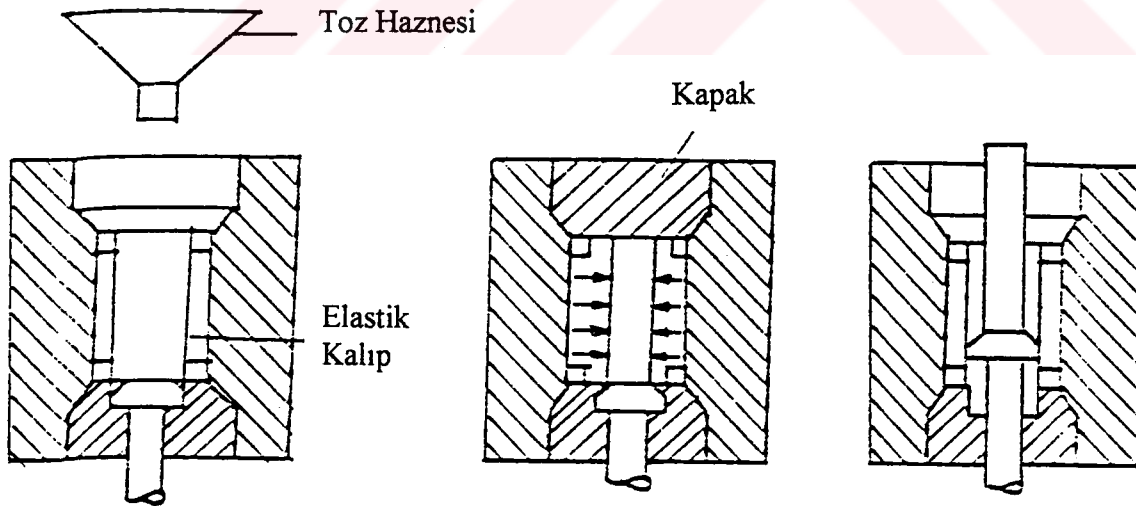
Şekil 2.14. Çift Yönlü Sıkıştırmada Yoğunluk Dağılımı

2.5.2.2. İzostatik sıkıştırma

Toz metal parçalarda homojen yoğunluk elde etmek ancak izostatik presleme ile mümkündür. Boy / çap oranı fazla olan parçalar bu yöntemle sıkıştırılabilir. Sıkıştırma basıncı bir gaz veya sıvı yardımı ile parçaya her yönden eşit olarak uygulanır. İzostatik sıkıştırma iki şekilde yapılır [7]. Bunlar : yaş ve kuru kalıp ile izostatik sıkıştırmalardır

2.5.2.2.1. Kuru kalıp

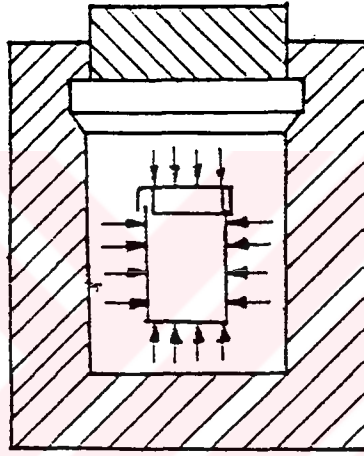
Elastik toz kalıbı değişmez. Bir kalıpta birden çok parça sıkıştırılabilir. Sıkıştırma kalıbı basınç hücrelerine yerleştirilerek metal tozu kalıba doldurulur. Sonra kalıp kapağı kapatılarak gerekli sıkıştırma basıncı uygulanır. Sonra basınç düşürülerek kalıbın kapağı açılır ve parça kalıptan alt zımbanın yukarı hareketi ile çıkarılır



Şekil 2.15. Kuru Kalıp ile İzostatik Sıkıştırma

2.5.2.2.2. Yaş kalıp

Metal tozları kalıp görevi yapan elastik bir kaba doldurularak sıkıca kapatılır. Kalıp basınç hücresinin içine koyularak basınç uygulanır. Gerekli basınç uygulandıktan sonra basınç düşürülerek kalıp çıkarılır. Sıkışan toz metal parçanın üzerinden kalıp sıyrılarak çıkarılır. Yaş kalıplamada kalıp bir defa kullanılır birdaha kullanılmaz



Şekil 2.16. Yaş Kalıp ile İzostatik Sıkıştırma

2.5.2.3. Yüksek enerjili sıkıştırma

Pnömatik, mekanik ve patlayıcı gibi sıkıştırmada basınç uygulama teknikleri geliştirilmiştir. Bu yöntem çok yüksek bir basıncın kısa bir süre için uygulandığı basınçtır. Basınç süresi $50 \mu s$ ile $50 Ms$ arasındadır. Bu kısa basınç süresinde malzemeye $6,89 \times 10^2$ - $1,034 \times 10^5$ Mpa değerinde basınç uygulanır [10].

2.5.2.4. Ekstrüzyon yöntemi ile sıkıştırma

Tozlar kapalı bir kap içerisine koyulup kabın havası vakumla alınır. Daha sonra kab içindeki tozlar ısıtılarak ekstrüzyon yoluyla parça üretimi yapılır. Bu yöntemde yüksek yoğunluk elde edilir. Ekstrüzyon öncesi tozlar ısıtılmışsa sinterlemeye gerek yoktur. Ekstrüzyon genellikle daha önce izostatik preslenmiş tozlar için uygulanır ve en çok takım çeliklerinin üretiminde uygulanır.

2.5.2.5. Titreşimle sıkıştırma

Sert bir kalıp içerisindeki toza basınç uygulanırken bir yandan da titreştirilir. Böylece daha az basınçla kalıpta şekillendirilmeye eşdeğer bir yoğunluk elde edilir. Bu uygulamalarda frekans ve genlik önemlidir. Herhangi bir basınç için en uygun genlik ve frekans vardır.

2.5.2.6. Enjeksiyonla sıkıştırma

Bu yöntem daha çok diğer yöntemlerle sıkıştırılamayan ve ya sıkıştırılması çok zor olan karmaşık parçaların kalıplanmasında iyi bir kalıplama şekli olmuştur. Enjeksiyon makinasının içine bağlayıcılarla karıştırılmış ve granül hale getirilmiş olan toz koyulur. Enjeksiyon makinası içindeki bağlayıcıları ergitecek şekilde ısı verilir. Ergimiş bağlayıcı içinde bulunan metal tozunu, enjeksiyon makinasının yapısına göre helezon veya piston yardımı ile enjeksiyon makinasına bağlanmış kalıba basılır. Böylece kalıbın içine giden bağlayıcı toz karışımı kalıbın şeklini almış olur. Kalıptan çıkarılan şekil almış karışım ısıtılarak yağlayıcısı ayrıştırılır ve sinterlenerek kullanılacak hale gelir.

2.6. Sinterleme

Sinterleme, dayanımı artırma amacı ile toza veya sıkıştırılmış kütleye esas bileşenin ergime noktasının altındaki sıcaklıkta uygulanan ısı işlemdir [1]. Tek bileşenli sistemlerde sıcaklığı genellikle metalin ergime sıcaklığının 2 / 3 veya 4 / 5 katı alınarak tespit edilirken birden fazla bileşenli sistemlerde ise ergime derecesi düşük olan metalin ergime sıcaklığının üzerinde, ergime derecesi yüksek olan metalin ergime sıcaklığının altında yapılır. Demir gurubu metal alaşımları 1000–1300 °C, sert alaşımlar 1400–1600 °C arasında, refrakter metaller (Molibden, tantal, wolfram) 2000–2900 °C arasında sinterlenirler. Gözenekli bronzlar ve bronz alaşımları 600–800 °C arasında sinterlenirler [3]. Sinterleme süresi kullanılan malzemeye göre değişir. Sinterleme süresi ile sinterleme sıcaklığı arasında ilişki mevcuttur. Sinterleme sıcaklığı yükseldikçe sinterleme süresi kısalmır. Sinterleme süresin uzun tutulduğunda sıcaklığın düşük olması gerekir.

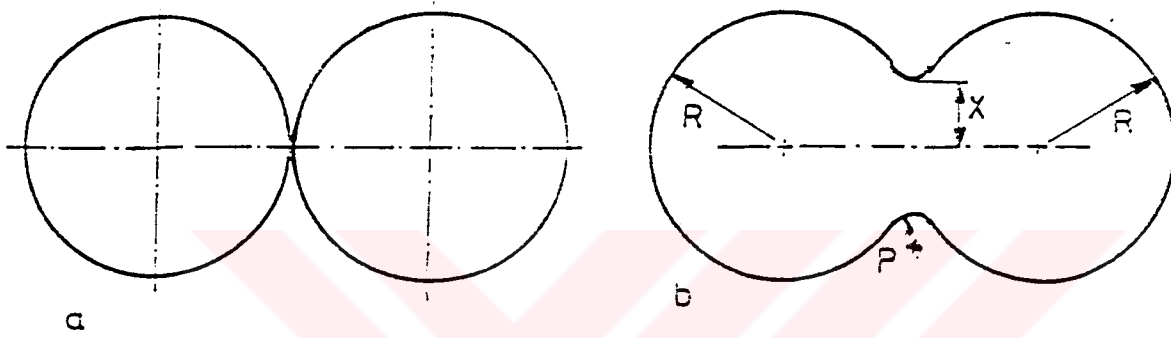
2.6.1. Sinterleme öncesi işlemler

Sinterleme için bir toz kütlesinin hazırlanması normalde birbirine komşu parçacıkları sıkı şekilde temas ettirerek yüzey filimlerini yırtarak sıkıştırmak gerekir. Bu sıkıştırma tekniği kullanılan tozun üretim tekniği, biçimi ve sıkıştırılabilme özelliği ile doğrudan ilgilidir.

Bazı durumlarda ise gevşek toz kütle sıkıştırılmadan doğrudan sinterlenir. Bu gibi gevşek toz sinterlenmesi genellikle büyük gözenekli filitre vb. Malzeme üretimi için arzu edilir.

2.6.2. Sinterleme teorisi

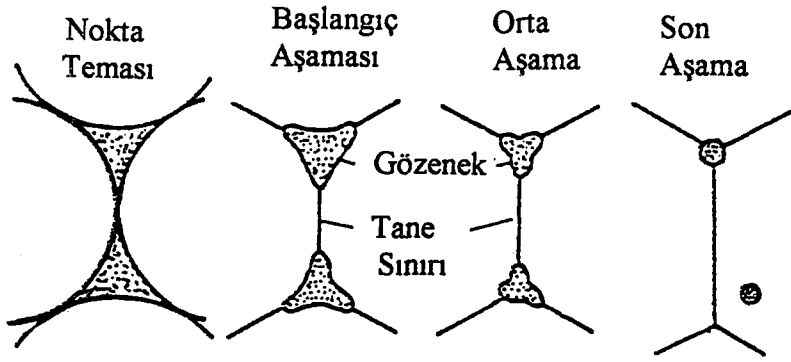
İki küresel parça Şekil 2.17 'de görüldüğü gibi temas halinde olduğu kabul edilir. Sinterleme sırasında parçacıklarda önce bir boyun büyümesi ilerleyen sinterleme zamanı ile gözeneklerde büzülme olur. Gözenek kanalları kapanarak gözenekler kapalı gözenek şekline döner.



Şekil 2.17. a. Sinterleme başlangıcında temas halinde parçacıklar.

b. X yarıçapında bir boyun ile iki küresel parçacığın sinterleme kesiti

Parçacıklar arasındaki bağ büyürken mikro yapı Şekil 2.18' de gösterildiği gibi değişir. Sıkıştırılmamış tozların sinterlenmesinde oluşan boyundaki yarıçapın, parçacık çapına (X / R) oranının 0,3 ten az olduğu kısım sinterlemenin ilk aşaması olarak tanımlanır [9].



Şekil 2.18. Sinterleme aşamaları

Orta kademedeki gözenekler ilk kademeye göre daha düzgün şekillidir ve birbirlerine bağlı silindirik bir yapıya sahiptirler. Orta kademedeki (Sıkıştırma özelliklerinin) yüzey ve tane bağları enerjisinin her ikisini de kapsayan ara yüzey enerjisinden dolayı sıkıştırma özelliklerinin gelişimi görülür. Ara kademenin sonraki oranlarında tane büyümesinin yaygın olması sonucu gözenekler birbirlerinden ayrılabilirler.

Yüksek bir sinterleme oranı elde etmede tane sınırları önemlidir. Bununla birlikte tane büyümesi ve gözenek ayrılması istenmeyen bir durumdur. Gözenek yapılarının çekilmesi ile yaklaşık % 8 gözeneklilikte kararlı olmayan silindirikler oluşur. Bu noktada silindirik gözenekler yavaş tane büyümesinde etkili olmayan küresel gözenek şekline dönüşür. Bir çok durumda da tane sınırlarından ayrılmış gözeneklerin mevcut olduğu mikro yapı oluşur. Tane içindeki gözeneklerin ayrışması sertlik artışına neden olur. Gözeneklerdeki küresel görünüm, ayrılmış gözenekler sinterlemenin son aşamasının başlangıç göstergesidir.

Sinterlemenin son aşamasında hareketler çok yavaştır. Buna sebep katı gözenek arayüzeyinin giderilmesidir. Gözenekler içerisinde hapsedilen gazlar son yoğunlaşma kademesinin miktarını sınırlar.

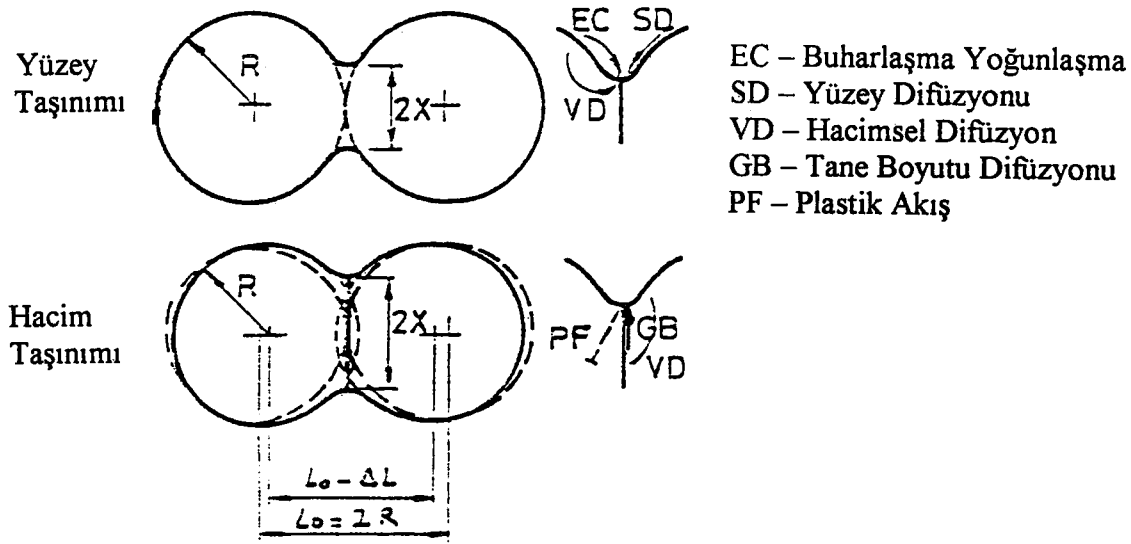
Genellikle ilk kademe geniş eğim açılı bir mikro yapıya benzer. Boyun büyüme oranları ve büzülme küçük ve tane büyüklüğü toz büyüklüğünden daha azdır.

Orta kademe gözenekler daha pürüzsüzdür. Fakat bu kademe birbiri arasında hala tam bağ vardır. Teorik yoğunluk % 92 ' den daha azdır ve tane büyümesi ara kademe daha sonradan oluşabilir.

Son sinterleme kademesinde gözenekler küreselleşir ve kapanır. Bu kademe teorik yoğunluğun %92 ' yi geçtiği görülür.

2.6.2.1. Taşınım mekanizması

Sinterleme sırasında, yüzey taşınımı ve hacim taşınımı olmak üzere iki sınıf taşınım meydana gelir. Yüzey taşınımı Şekil 2.18' de gösterildiği gibi parçacık aralıklarında bir değişme olmaksızın boyun büyümesini kapsar. Sinterlemeyi kontrol eden yüzey taşınımı parçacık yüzeylerindeki uçlandırma ve kütle akması sonucu meydana gelir.



Şekil 2.19. Kürelerin sinterlenmesinde oluşan iki tür sinterleme mekanizması

Yüzey taşınımında net bir boyutsal değişim yoktur. Yoğunluk sabit kalır. Şekil 2.19 'da görüldüğü gibi yüzey taşınım mekanizması yüzey kaynaklarından kütle hareketi ile boyun büyümesini sağlar.

Hacimsel taşınımında iç kütle kaynakları kullanılır. Hacimsel taşınım mekanizmaları büzülme vererek net bir boyutsal değişime neden olur. Şekil 2.20'de gösterildiği gibi boyun bölgesindeki çökeltiler ile toz içinde yeni bir kütle oluşur. Hacimsel taşınım mekanizmaları, hacimsel difüzyonu, tane sınırı difüzyonunu, plastik akışı ve amorf yapıli katılar için yapışkan akışı kapsar. Sinterleme esnasında katılaşılan yüzey gerilmeleri yeni dislokasyonlar oluşturmak için yeterli değildir. Bununla birlikte elektron mikroskobu ince tozların ısıtılması esnasında boyun bölgelerinde dislokasyon hareketleri oluştuğunu göstermiştir [9].

Bu nedenle plastik akış yalnızca aktif olarak ısıtma esnasındaki kısa süreli bir işlem olduğu göz önünde tutulur.

2.6.2.2. İlk sinterleme kademesi

Bir noktada iki parçacık temas ettiğinde kütle transfer mekanizmalarına bağlı olarak bir boyun oluştuğu söylenmişti . İlk sinterleme safhasında eğilmiş yüzey ile birleşik gerilme kelvin denklemi ile şu şekilde ifade edilir

$$\sigma = \frac{\delta \cdot \Omega}{k \cdot T} (1/R_1 + 1/R_2)$$

Burada

δ = Yüzey gerilimi

Ω = Atomik hacim

k = Boltzman sabiti

T = Mutlak sıcaklık

$R_{1,2}$ = Yüzeyler için çap

Bu denklemin ilk sinterleme kademesine uygulanması buharlaşma basıncındaki farklılığın etkisini, boşluk konsantrasyonunu ve sinterlenen kesit üzerindeki gerilmeleri belirler. Bu ilişkilerin tamamına aşağıdaki denklem yol gösterir. Çünkü boyun bölgesinin içine doğru bir kütle akışı vardır. Eğilmiş yüzey altındaki boşluk konsantrasyonu şu formülle hesaplanır [9].

$$Co - C = Co \frac{\delta \cdot \Omega}{K \cdot T} (1/R_1 + 1/R_2)$$

Burada :

Co = Dengeli boşluk konsantrasyonu

C = Yüzey eğriliğinden dolayı denge değeri

Sinterlemenin ilk aşamasında boyun büyümesi Thummler ve Thomma ve Exener [11, 12] lerin araştırmaları ile gösterilir. Birbirleri ile nokta teması halinde bulunan kütlelerin boyun büyümeleri tek bir mekanizma tarafından aşağıda verilen genel bir denklemlerle verilir.

$$(X/R)^n = B \cdot T/R^m$$

Burada:

X = Boyun yarıçapı

R = Partikül yarıçapı

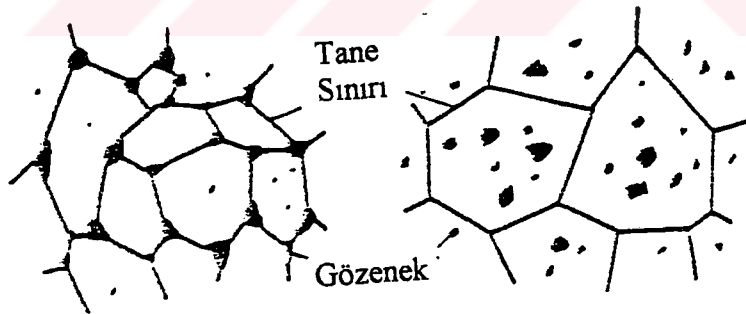
T = İzotermal sinterleme zamanı

Bu denklemde n , m ve B 'nin değerleri kütle taşınım mekanizmalarına bağlıdır. Yukarıdaki formül boyun yarıçapı ve partikül yarıçapı oranı $(X/R) = 0.3$ ' ten daha az bir boyun bölge oranı için geçerlidir.

2.6.2.3. Ara kademe sinterleme

Sinterlemenin ikinci aşaması olan bu aşamada, hacim ve tane sınırları difüzyonu ile yoğunlaşma sağlanmaktadır. Gözenek yapısı düzgün bir hal alırken,

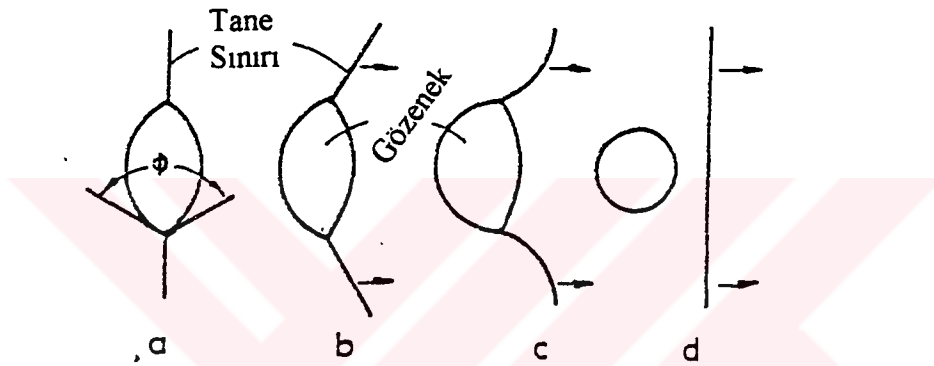
gözeneklerin birbirine bağımlılığı son kademeye kadar devam eder. Ara kademenin başlangıcında gözenek geometrisi tane sınırlarında yerleşmiş ve helezonik şekildedir. İlerleyen sinterleme zamanı ile gözenekler silindirik bir şekle dönüşür. Sinterleme esnasında gözenekler ve tane sınırları arasında birbirlerine tesir etme iki şekilde olur. Birincisi, herhangi bir tane büyümesi esnasında tane sınırlarının hareketi ile gözenekler sürüklenebilir, veya ikincisi, tane sınırları kırılabilir. Ve taneler içindeki gözenekler birbirinden ayrılarak uzaklaşabilir. Sıcaklık arttığı zaman tane sınırları hareketinin oranı artacağından tane sınırlarının gözeneklerden ayrılması metdana gelir. Çünkü gözenekler tane sınırlarından daha yavaş hareket ederler. Hareket eden bir tane sınırı gerilimi altındaki gözenek hareketi, hacim veya yüzey difüzyonu ve hatta buharlaşma yoğunlaşmasının gözeneği kesmesi ile mümkündür. Şekil 2.20' de görüleceği gibi gözenekler tane sınırlarının köşelerine veya içine yerleştirilebilirler. Gözeneklerin tane köşelerini tutumaları için sistem enerjisi daha düşüktür. Çünkü gözenek toplam tane sınırları alanlarını azaltır. Bu nedenle enerjisi azalır.



Şekil 2.20. Ara kademe sinterlemede gözeneklerin tane sınırlarının köşelerine veya içine yerleşmeleri

2.6.2.4. Son kademe sinterleme

Yavaş bir işlem olan sinterlemenin orta kademesinde izole edilmiş küresel gözenekler hacimsel difüzyon tarafından büzülürler. Ara kademe sinterlemeden sinterlemenin son kademesindeki bir gözeneğin izole edilmesi, kapanması Şekil 2.21' de gösterilmiştir.



Şekil 2.21. Sinterlemenin son aşamasındaki gözeneğin kapanması ve küreselleşmesi

- a. Tane sınırı üzerindeki gözenek çift açılı bir denge oluşturur.
- b,c. Tane büyüklüğüne bağlı gözenek sürüklenmesi
- d. Tane kırılmasından dolayı gözenek kapanması

Küresel gözeneklerin tane sınırlarından ayrılıp (kırılıp) uzaklaşacağı düşünülür. Sinterlemenin uzatılması ile gözeneklerin sayısında azalma meydana gelirken gözenek kabalaşması istenmeyen gözenek büyümesine neden olur.

Yüzey taşınım işlemi vasıtası ile gözenekler küreselleşir. Gözeneklerin küreselleşmesi, son aşama sinterlemenin başlamasına işarettir. Eğer kapalı gözenekler yeteri kadar hareketli ise tane yapısına bağlı kalır.

Son aşama sinterlemede homojen tane büyüklüğü ve çözünmüş gaz, yoğunlaşmaya yardım eder. Sinterleme sırasında gözlenen gözenek büyüklüğü, büzülme, birleşme ve kabalaşmayı kapsayan olayların etkileşmesine bağlıdır. Gözenek kabalaşması düzgün olmayan boşluk konsantrasyonundan kaynaklanır. Gözenek büyüklüğündeki değişim büzülmeden kaynaklanır. Büzülme aynı zamanda gözenek büyüklüğünün küçülmesine neden olur. Eğer hacim difüzyon oranı yüksek ve birleşme oranı düşük ise gözenek büyüklüğü sürekli azalır.

Gözenek büzülmesi için hacim taşınım mekanizması gerekir. Gözenek yoğunluğu, gözenek çapı, hacim difüzyonu, tane büyüklüğü ve gerilim etkilerine bağlı olan son aşamada gözeneklerin oranı azalır. Gerçek gerilim yüzey enerjisi ve büzülmeye karşı koyan gözeneklerde hapis edilmiş gaz basıncı gibi dış kaynaklardan oluşur. Sinterleme ile % 100 yoğunluğa ulaşmak zordur.

2.7. Toz Metallerin Mekanik özellikleri

T/M malzemelerin mekanik mukavemetleri şekillendirme sonrası uygulanan pişirme işlemi ile kazandırılır. Oda sıcaklığında sıkıştırılan T/M parçalarında mekanik bağlar oluşur. Sonra uygulanan pişirme ile mekanik bağlar kimyasal bağlara dönüştürülerek mekanik özellikler iyileştirilir.

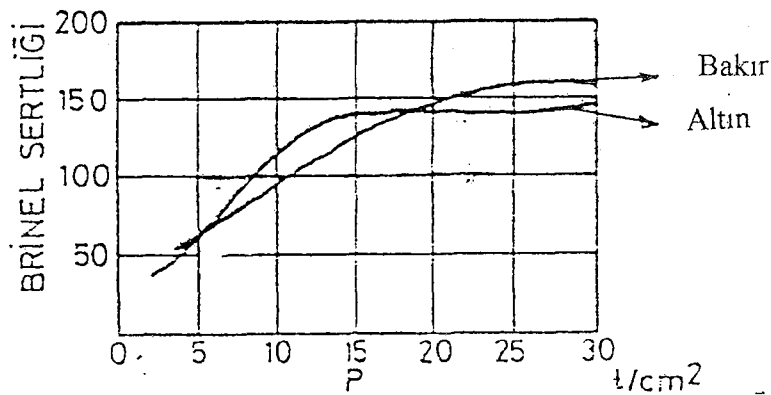
T/M parçaları ile ergitilerek elde edilmiş parçalar arasındaki en önemli fark T/M parçaların gözenekli yapıya sahip olmalarıdır. Gözeneklilik sinterleme

sıcaklığına ve atmosferine, presleme basıncına, tane büyüklüğüne bağlı olarak değiştiğinden T/M parçaların özellikleri ergitilerek elde edilen metallerin özelliklerine göre daha farklı özellikler gösterirler.

2.7.1. T/M parçaların sertliği

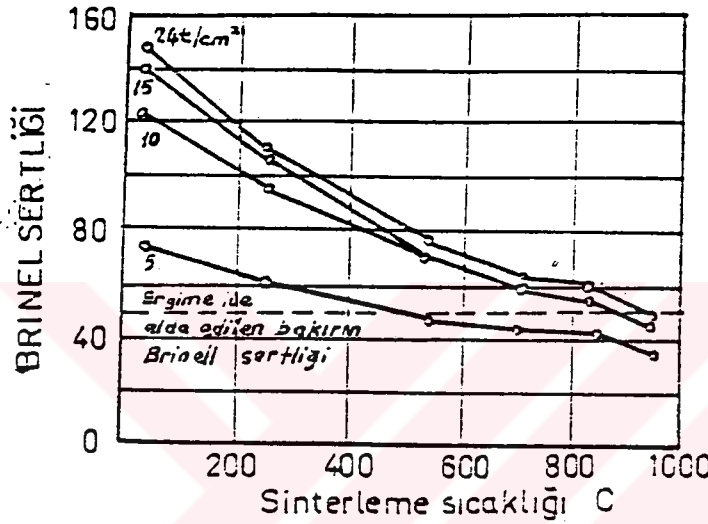
T/m parçaların sertlik ölçümleri genellikle Brinell sıkalası kullanılarak yapılır. Ergime ile elde edilmiş metallerde sertlik ile çekme mukavemeti arasındaki doğrusal ilişki T/M parçalar için sözkonusu değildir. T/M parçalarda gözeneklerden dolayı ölçüm yapılan yere dikkat edilmelidir.

T/M parçaların sertlik değerleri parçanın sıkıştırma basıncına göre de değişir. Altın ve bakır tozlarının sıkıştırma basıncı ile sertlik değişimi şekil 2.22.' de verilmiştir. Ergime ile üretilen bakırın sertliği $40 - 60 \text{ kg/mm}^2$ olduğu halde T/M yöntemi ile üretilen bakırda bunu % 100 artırmak mümkündür. Sertliğin bu kadar artması tozun soğuk şekillendirme ile mekanik mukavemetinin çok artması ile izah edilebilir.



Şekil 2.22. Altın ve bakırın sıkıştırma basıncına bağlı sertlik değerinin değişimi [3].

Bakır tozlarının değişik basınçlar altında preslenmesiyle elde edilen T/M parçaların artan sinterleme sıcaklıkları sonucu sertlik değeri şekil 2.23.'de verilmiştir. Yüksek sinterleme sıcaklığında T/M parçalar, ergitilerek üretilen parçaların sertliğine yakın sertlik değeri gösterirler. Farklı tane boyutlarındaki bakır tozları üzerinde yapılan deney sonuçları çizelge 2.2.' de verilmiştir.



Şekil 2.23. Sinterleme sıcaklığına bağlı olarak değişik basınçlar altında sıkıştırıldıktan sonra sinterlenen kaba bakır toz numunelerinin sertlik değişimi [3].

Çizelge 2.2. Farklı Tane Büyüklüğü ve Farklı Sıcaklıklarda Sinterlenmiş Bakır Tozunun Sertlik Değerleri

Tane Büyüklüğü [mm]	Sıkıştırma [kg/mm ²]	Brinell Sertliği				
		Sinterleme Sıcaklığı				
		260	530	700	840	920
0,08	152,4	120,5	78,4	64	50,9	43,5
0,1	141,5	104,5	75,4	64,2	50,7	43,3
0,15	131,6	98,2	70,5	59,7	50,5	44
0,3	116,9	90,5	65,2	56,4	50,1	45,3

2.7.2. T/M parçaların çekme, yorulma ve darbe mukavemetleri

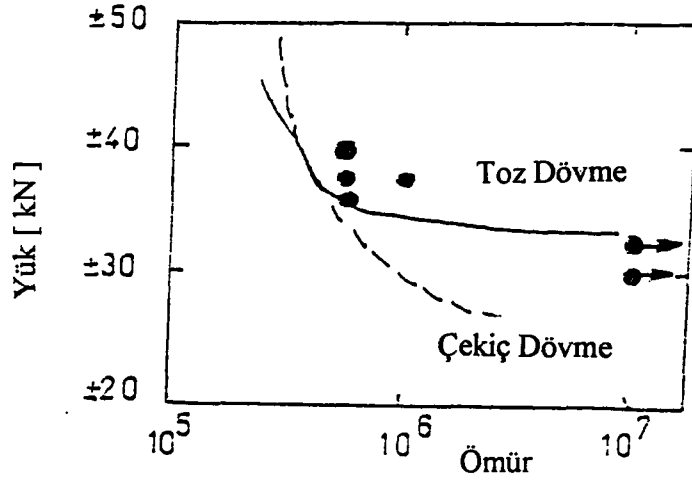
T/M parçaların çekme deneyleri sırasında parçada önemli bir uzama meydana gelmeden parça kopar. T/M parçaların çekme mukavemetleri ergitilerek üretilen parçaların çekme mukavemetlerinin ölçülmesi gibi ölçülür. T/M parçaların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde sıcak dövme yolu ile dökme - dövme malzemelere eşit bazanda üstün özellikler sağlanır. Çizelge 2.3 'de dövme ile %99.9 yoğunluğa kavuşmuş çeliklerin çekme ve darbe mukavemetleri verilmiştir.

Çizelge 2.3. Hadde ve T/D çeliklerin özelliklerinin mukayyesi

MALZEME		Çekme G. [Mpa]	Uzama %	Kesit Daralması %	Darbe Enerjisi
Mn-Mo Hadde Yönü	Haddeye	920-980	17-19	60-62	100
	Dik Yön	910-950			10
T/D Ni-Mo		900-930	13-15	40-50	27

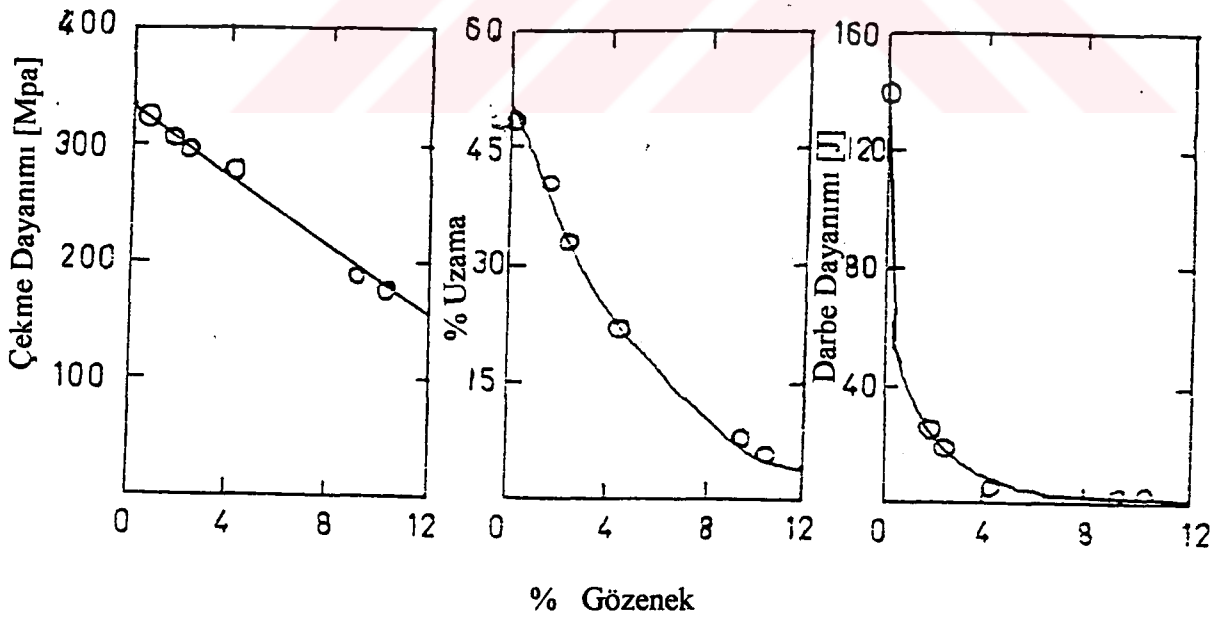
T/M parçaların yüzey kalitelerinden dolayı, özellikle T/M çeliklerin yük taşıma kabiliyetleri bazen hadde çeliklerinden bile üstündür.

Şekil 2.24'de motor silindirindeki şartlara benzer şekilde yapılan yorulma deneyi sonucunda, çekiç dövme ve T/M biyel kolları yorulmaya karşı mukayese edilmiştir [13].



Şekil 2.24. Çekiçle Dövme ve T/M Biyel Kollarının Yorulma Özelliklerinin Mukayesesi [13].

T/M parçalarda kalıcı gözenek mekanik özelliklere tesir eder. Çekme mukavemeti ve mıkmatıslık kalıcı gözenek ile az değışmektedir. Süneklik ise çok süratli değışmektedir. Şekil 2.25.'de kalıcı gözenegin mekanik özelliklere etkisi görölmektedir.



Şekil 2.25. Kalıcı Gözenegin Mekanik Özelleklere Etkisi

T/M parçaların mekanik özelliklerine kalıcı gözeneklerden başka oksijen miktarının da etkisi vardır. Süneklik, darbe mukavemeti, darbe tokluğu ve yorulma mukavemeti oksijen miktarı ile önemli oranda değişmektedir. Çatlak genellikle kalıcı gözenekleri ve toz yüzü oksitlerini takip etmektedir [13].

2.8. Toz Metal Malzemelerin Uygulamaları

T/M ile üretilen parçalar özellikle 1900'lü yılların başından itibaren kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. T/M yöntemi artık endüstrinin önemli bir kısmında uygulanır hale gelmiştir. Toz metalurjisinin uygulama alanları kısaca şöyle özetlenebilir:

- a. Talaşlı imalat gerektirmeyen makina parçalar
- b. Takım çelikleri
- c. Sert metaller
- d. Sermetler
- e. Kaymalı yataklar
- f. Gözenekli metaller ve filitreler
- g. Elektrik ve magnetik uygulamalar
- h. Diğer uygulamalar

2.8.1. Talaşlı imalat gerektirmeyen makina parçaları

Bu parçaların çoğu otomotiv sanayiinde kullanılmaktadır. Bu parçalar tozun sıkıştırılıp pişirilmesi ile doğrudan son şekillerine sokulmaktadırlar. İşlemde malzeme tasarrufu % 100 dür.

1950 'li yıllara kadar genellikle düşük mukavemetli ve yoğunluklu parçalar üretilmekte idi. Ancak 1960' dan sonra dayanım 550 Mpa' lın üzerine çıkarılmıştır. Ayrıca, kullanılan toz alaşımları soğuk iş sertleşebilir seçilerek bu parçalara pişirmeden sonra ısıtıl işlem gereği de kalmamıştır. T / M yöntemi ile hiç talaşsız üretilen yakıt pompası elemanlarında % 50 maliyet ucuzlaması sağlanmıştır. Amortisör pistonu, şanzuman senkromeşleri, zincir dişlileri, tekstil dişlileri, çeşitli sektör dişlileri, mandallar ve daha yüzlerce parça bu gün T / M yöntemi ile talaşsız üretilmektedir.

2.8.2. Takım çelikleri

T/M yöntemi ile üretilen takım çelikleri dökümle üretilen takım çeliklerine göre daha tok ve uzun ömürlüdürler. Bu üstünlüğün sebebi; dökümle üretilen çeliklerde karbürler belirli bölgelere toplanıp irileşirken, T/M çelikte çok ince ve homojen olarak dağılırlar [14]

2.8.3. Sert metaller

Sert metaller T/M yöntemi ile üretilmiş çok sert ve aşınmaya dayanıklı malzemelerdir. İlk patentler 1920 'li yıllarda Krupp firması tarafından Almanya' da alınmıştır. Ana bileşimde tungsten karbür, kobalt ve matal tozları karıştırılıp sıkıştırıldıktan sonra kobaltın ergime sıcaklığında sıvı-fazlı pişirme yapılarak karbür taneleri birbirine kobalt ile bağlanır. Olay çimetonun çakılla bağlanmasına benzediğinden “ Semente Karbür “ olarak isimlendirilirler.

Sert metaller aşınmaya dayanıklı uygulamalar için geliştirilmişlerdir. Bu gün; kesici takımı, kaya delici, taş kesici ve şekillendirme kalıbı olarak kullanılmaktadır.

Son yıllarda sert metallerin verimini daha da artırmak için yüzeyleri kaplanmaya başlamıştır. Çeşitli kaplama teknikleri ile yüzeyler TiC ve /veya TiN ile 5 mikron kalınlığında kaplanmaktadır [14].

2.8.4. Sermetler

Sermet seramik ve metal kelimesinin başkısımlarının birleştirilmesinden oluşur. Çeşitli seramik tozlarının bir metal veya alaşımla bağlanmasını ifade eder. Seramik tozun miktarı hacimce %15 ile %85 arasında değişebilir. Seramik ile metal toz arasında çok az çözülme vardır. Bileşik gereçlerin tersine, sermetlerde seramik faz, elyaf veya tabaka halinde deyildir ve eş eksenli tanecik kabul edilebilir.

Sermetlerde seramik faz olarak uranyum oksit, uranyum karbür, zirkonyum borid, silikon karbür, silikon oksit, alüminyum oksit, titanyum karbür, grafit veya elmas kullanılmaktadır. Metalik bağlayıcı faz olarak; kobalt, demir, krom, nikel, molibden, tungsten veya paslanmaz çelik, bronz ve süper alaşımlar kullanılabilir [14] .

2.8.5. Kaymalı yataklar

Pek çok yatak malzemesini üretmek için toz metalurjisi tek yoldur. Yatakların çoğu bronz, kalay ve grafit tozlarından üretilir. Alüminyum, kurşun ve diğer

metal veya metal dışı maddelerde kullanılabilir. Granit veya molibden disülfid kuru yağlayıcı toz olarak eklenir.

Yatak malzemelerinde gözenek % 40 'a kadar çıkarılabilir. Kuru yağlamanın istenmediği hallerde bu gözenekler; yağ, gres veya uygun bir plastikte doldurulur. Böylece bu yatak veya burç ömür boyu yağlama istemez.

Çizelge 2.4. Çeşitli T/M yatakların mekanik özellikleri [14] .

ÖZELLİK	Yatak Malzemesi		
	Bronz	Demir	Demir-Bronz
Çekme Mukavemeti [Mpa]	80-100	-	80-200
Sertlik [B.S]	30-40	40-50	-
Maksimum Statik Yük [Mpa]	22-28	25-55	28
Maksimum Yavaş Dönme Yüğü [Mpa]	1,7-3,9	1,6-4,8	1,4-2,8
Maksimum Hız [m/sn]	7,6	4	-
Maksimum PV [Mpa,m/sn]	40000-50000	30000-40000	25000-50000
Maksimum Çalışma Sıcaklığı [C]	65	65	-

2.8.6. Gözenekli metaller ve filitreler

Toz metal filitreler seramik filitrelerden daha fazla darbe mukavemetine sahiptirler.filtre gözenek miktarı % 80 ' e kadar çıkarılabilir. Genellikle sıcak gazların filitre edilmesinde kullanılırlar. Paslanmaz çelik tozlarından üretilen

filitreler, basınçlı gaz sanayiinde alev engelleyici olarak kullanılırlar. Uçakların kanatlarında ve hava emme kanallarında buzlanmayı önlemek için ve silah sanayiinde susturucu olarak kullanılırlar.

2.8.7. Sürtünme elemanları

Sürtünme elemanları, makina parçalarının temaslarından oluşan mekanik enerjiyi ısıya çevirirler. Isı enerjisi emilir ve iletilerek o bölgeden uzaklaştırılır.

Metal esaslı sürtünme elemanları ağır hizmet uygulamalarında kullanılır : Uçak, tank, iş makinaları ve büyük preslerin frenleri ve debriyaj balataları gibi.

Isı iletici toz olarak bakır ve kalay, sürtünme sağlayıcı olarak silikon karbür, veya alümina kullanılır. Ayrıca sürtünme katsayısını istenilen değere ayarlamak için kurşun, çinko veya grafit tozları kullanılır [14] .

2.8.8. Elektirik ve magnetik uygulamalar

Toz metalürjisi yöntemi ile çok kaliteli yumuşak manyetik malzemeler üretildiği gibi tabii mıknatısın 1000 katı gücünde kalıcı mıknatıslar da üretilmektedir. Demir, nikel, alüminyum ve kobalt tozlarının karıştırılıp şekillendirildikten sonra pişirilmeleri ile “Alnico” mıknatısları elde edilir. Metal oksitlerin preslenip pişirilmesi ile elde edilen “Ferrite” tipi daimi mıknatıslar hafıza kaydında ve teyp bandlarında kullanılmaktadırlar.

Tungsten veya molibden ‘den oluşan ampul flemantlarını üretmenin tekyolu T/M dir. Bu metalleri teknolojik olarak ergetmek mümkün değildir. Ayrıca elektirik

motorlarında bulunan metal grafit fırçalar ve daha bir çok eleman da yine T/M ile üretilmektedir.

2.8.9. Diğer uygulamalar

Tahribatsız çatlak muayenesi için demir oksit tozu kullanılmaktadır. Fotokopi ve benzer uygulamalarda tonerin içinde çeşitli metal ve termo plastik tozlar kullanılmaktadır. Metal tozu “taşıyıcı” olarak kullanılır. Metal tozu bir reçine ile kaplanır ve bu reçineye termoplastik renk vericilerin yapışması sağlanır. Metal tozu olarak küresel demir tozu kullanılır. Kullanılan metal tozu temizlenip yeniden kaplanarak yeniden kullanılabilir.

Demir tozları ot tohumlarının tahıl tohumlarından otomatik yöntemlerle ayrılmasında kullanılır. Çeşitli yakıt ve patlayıcı sistemlerinde metal tozları kullanılır. Demir tozu gıda zenginleştirici olarak kullanılır. Diş dolgu amolğamlarının önemli bileşeni gümüş esaslı metal tozlarıdır. Çeşitli metalik boyalar ve yaldızların üretiminde metal tozları kullanılmaktadır.

Çeşitli ferro alaşımlar ve metal tozları kaynak elektrodu örtüsünde kullanılmaktadır. Krom, boron, manganez, silikon ve vanadyum ferro-alaşımları ve nikel, manganezle krom ve demir metallerinin tozları elektrod örtüsünde kullanılmaktadır. Bu amaçla kullanılan demir tozu miktarı toplam demir tozu üretiminin % 10' unu bulmaktadır.

3. BİLYALI DÖVME

3.1 Giriş

Bilyalı dövme küresel küçük ve sert bilyaların bir yüzeye kontrollü şartlarda püskürtülerek, yüzeyde plastik deformasyon oluşturulması işlemi olarak tarif edilebilir. Asıl hedeflenen plastik deformasyon ile kalıcı baskı gerilmeli bir tabaka oluşturmaktır. Bu tabaka sayesinde malzemenin yorulma ömründe dikkate değer artışlar elde edilebilmektedir [15].

Malzemeye uygulanan bu işlemin malzemenin yorulma ömrünü artırdığı 1928-1929 yılları arasında General Motor'un Buick Motor bölümünde yapılmakta olan bazı kumlama uygulamaları sırasında tesadüfen ortaya çıkmıştır. Supap yaylarındaki beneklerin kumlama ile temizlenmesi esnasında iri taneli kumların kullanıldığı bazı uygulamalarda yayların yorulma ömürlerinde belirgin bir artış olduğu saptandı [15]. Bu keşiften sonra bugünkü anlamda modern bilyalı dövmenin temelini oluşturan çalışmalar başlamıştır.

İlk zamanlarda yorulma ömründeki artışın sebebi, işlem esnasında malzeme yüzeyinde oluşan plastik deforme olmuş tabakadaki deformasyon pekleşmesi olarak kabul edildi. Daha sonra yapılan çalışmalarda yorulma ömrünün artmasında asıl rolü bu deforme olmuş tabaka içinde hapsedilmiş kalıcı baskı gerilmesinin oynadığı ortaya çıkarılmıştır [15]. Böylece bilyalı dövme esnasında oluşturulan kalıcı baskı gerilmeli tabaka malzeme yüzeyinde o bölgede oluşabilecek çatlak başlangıcını engellemekte veya geciktirmektedir [16].

Ticari anlamda ilk bilyalı dövme işlemi II. Dünya savaşı sırasında J. O. Almen ve J. Staroub tarafından yapılmaya başlandı. O yıllarda üretilen tank palet pimleri çok çabuk kopuyordu. Pimlere bilyalı dövme işlemi uygulandı ve çok iyi sonuç verdi. Palet pimlerinin ömürleri işlemden sonra belirgin bir şekilde arttı. İşlemin ucuzluğu ve malzeme ömrüne yaptığı bu belirgin artış işlemin ticari manada gelişmesini sağladı [15].

Bilyalı dövme kontrollü şartlarda çok sayıda küresel bilyanın, işlem görecekt metal parçanın yüzeyine değişik metotlarla fırlatılması ve böylece bilya akışına tutulan parçanın yüzeyinde bir basma gerilmeli tabaka oluşturmayı maksat kabul eden bir soğuk yüzey işlemidir. Bu bakımdan bilyalı dövme, kumlama işleminden esas gaye olarak tamamen farklı bir işlemdir. Bilyalı dövmenin gayesi yüzey temizleme olmamakla beraber işlem görmüş malzemenin yüzeyide temizlenmiş olur. İşlem esas olarak metallerden imal edilmiş makina parçalarının yorulma, korozyonlu yorulma ve gerilmeli korozyon gibi hasarlanma türlerine karşı direncini artırmak için kullanılmaktadır [17].

Bilyalı dövmenin bir avantajı da parçanın üretim yöntemine ve metalin cinsine bakılmadan her tür makina parçasına uygulanabilir olmasıdır [18,19]. Yine bilyalı dövme ince metal plakaların istenilen formlarda şekillendirilmesi, yüzey sertleştirme, yüzey kalitesinin artırılması için yüzeydeki gözeneklerin giderilmesi gibi çeşitli amaçlar için kullanılan ucuz ve etkili bir yüzey işlemi olarak bu gün yerini almıştır [19].

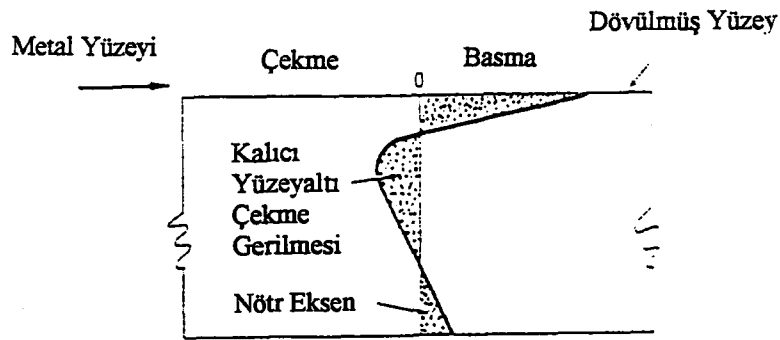
Bu gün bilyalı dövme işlemi yüksek teknoloji gerektiren havacılık ve uzay sanayiinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bilyalı dövme işleminin uygulandığı bazı makina parçalarına şunlar örnek olarak verilebilir: Her türlü dişli çarklar, akslar, helisel ve yaprak yaylar, şaftlar, uçak iniş takımları, kontrol

panelleri, helikopter kanat ve pervaneleri, pistonlar, kranklar, biyel kolları, supaplar, bloklar, rotlar vs. [15,20,21].

3.2 Bilyalı Dövme İşlemi

Malzemede yorulma hasarı malzeme yüzeyinde isteyerek oluşturulan veya herhangi bir imalat işleminden sonra istenmeden artık olarak oluşan çekme gerilmesinden kaynaklanır. İstenmeden oluşan bu zararlı gerilmeler kalıcı baskı gerilmeli bir tabaka ile safdışı edilerek malzeme ömründe dikkate değer bir artış sağlanabilir.

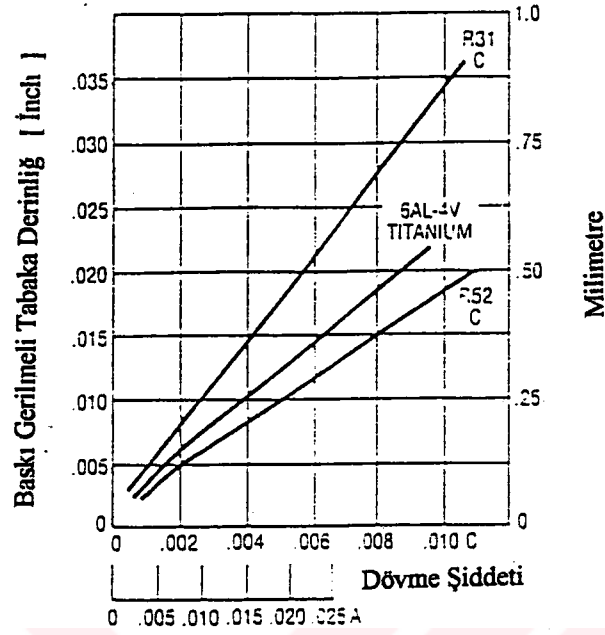
Çok yüksek hızlarda fırlatılan bilyaların malzeme yüzeyine çarptırılması ile bu baskı gerilmeli tabaka malzeme yüzeyinde oluşturulur. Yüzeye çarpan her bir bilya tanesi malzeme içine kalıcı gerilmeyi hapseden plastik akmayı ve yüzeyde plastik deforme olmuş ince bir tabakayı oluşturur. Bu durum şekil 3.1' de gösterilmiştir. Burada yüzeydeki büyük miktardaki basma gerilmesi, yüzeyin altındaki düşük miktardaki çekme gerilmesi ile dengelenmektedir [22].



Şekil 3.1. Bilyalı dövülmüş bir kirişteki gerilme dağılımı [22]

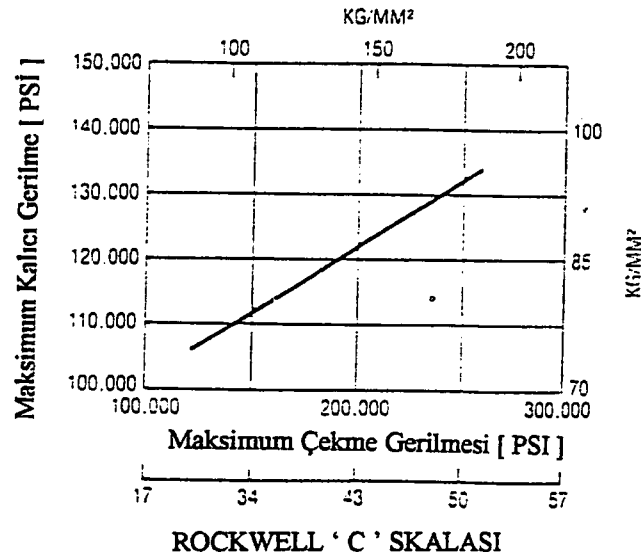
Bilyalı dövme işleminde tek bir bilya tanesinin hareketi ele alınıp incelendiğinde: küre şekilli bir bilya düz parça yüzeyine çarptığında yüzeydeki ince bir tabakada plastik akmanın meydana geldiği, küre takkesine benzer bir iz oluştuğu görülür. Genel olarak bütün bilyalar beraber düşünüldüğünde dövülen malzemenin tüm yüzeyinde bir plastik akmanın oluştuğu görülür. Akmanın oluştuğu dıştaki tabaka uzayarak daha fazla hacim kaplamak isteyecek, elastik olarak şekil değiştiren iç kısımlar buna izin vermeyecektir. Başka deyişle içtabakadaki elastik şekil değiştirmiş bölge, ezilen dış tabakanın orjinal boyutlarına dönmesine izin vermeyecektir. Bunun sonucu olarak yüzeyde plastik deforme olmuş tabakada, belli bir derinliğe kadar kalıcı baskı gerilmesi var iken iç taraftaki bölgelerde çekme gerilmesi oluşacaktır [23].

Yüzeyde oluşan kalıcı baskı gerilmeli tabakanın derinliği bir çok etkene bağlı olarak 0.005 mm ile 1 mm arasında değişmektedir. Ancak bazı şartlarda daha büyük derinlikler de elde etmek mümkündür. Şekil 3.2’de farklı bilya sertliği ve dövme şiddetlerinde elde edilebilecek baskı gerilmeli tabaka derinliğini göstermektedir. Burada Almen dövme şiddeti dövme işlemi sırasında transfer edilen enerjinin bir göstergesidir[22].



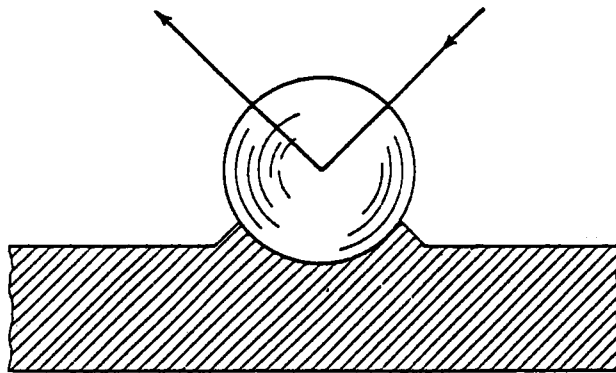
Şekil 3.2. Çelik ve Titanyumda dövme şiddeti ve kalıcı baskı gerilmeli tabaka derinliği [22].

Yüzeyde oluşturulan kalıcı basma gerilmesinin büyüklüğü malzemenin akma gerilmesinin yaklaşık %60 ına kadar ulaşabilir .Bu şekil 3.3'te gösterilmektedir.



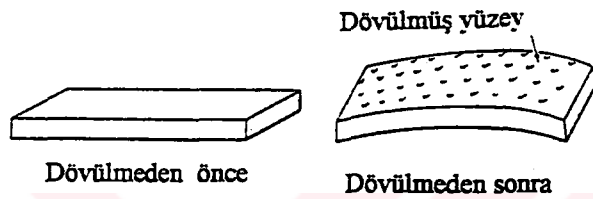
Şekil 3.3 .Bilyalı dövme ile elde edilen kalıcı Baskı Gerilmeleri ve malzemelerin maksimum çekme gerilmeleri [22]

Bilyalı dövme işlemi ile sağlanan kalıcı baskı gerilmesi yüzey tanelerindeki plastik deformasyonun bir sonucudur. Plastik deforme olmuş alan çarpan bilya çapıyla orantılı olarak merkezden radyal olarak genişler. Bu şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. İş parçası yüzeyine bilya çarpması [24].

Ayrıca şekil 3.5'te ince bir metal plakanın dövülmeden önce ve sonraki durumu gösterilmiştir. Buradaki dövme tek taraflıdır. Bu şekil işlemten sonra parçada oluşan gerilmeyi göstermektedir. Eğer dövüldükten sonra oluşan gerilmelerden dolayı şekildeki gibi bükülen plaka tekrar eski haline eğilerek getirilirse orjinal şekline döner ve öylece kalır. Bu da oluşan gerilmelerin yüzeydeki çok ince bir tabakada oluştuğunu gösterir. Plakayı şekildeki gibi eksen kuvvet basmaya yöneliktir[24].



Şekil 3.5. Bilyalı dövmenin metal bir plakaya etkisi [24].

Daha önce belirtildiği gibi bilyalı dövme metali akma noktasının ötesinde plastik veya altında elastik şekil değişikliğine uğrattır. Ezilmiş yüzey tabakası daha fazla yer kaplar, buda plakada işlem sonrasında oluşan plastik bir eğilme ile karşılaşılır. Eğilmenin boyutunu basma ve çekme gerilmeleri arasındaki denge belirler. Oluşan maksimum basma gerilmesi oluşan maksimum çekme gerilmesinden daha küçüktür. Çünkü biri akma noktasının altında diğeri ise üstündedir. Maksimum basma gerilmesi yüzeyden biraz içerde oluşur[22].

Deformasyonla sertleştirilmeyen malzemelerde kalıcı gerilme yaklaşık olarak malzemenin akma gerilmesinin yarısına eşittir. Ancak sertleştirmede pekiştirme bir faktör olduğunda kalıcı gerilme daha yüksek değerlere çıkabilmektedir. Ve yine gerilme altındaki malzemelere işlem uygulandığında oluşacak kalıcı gerilme de çok daha yüksek olabilir. Malzemenin akma gerilmesine yaklaşabilir [25].

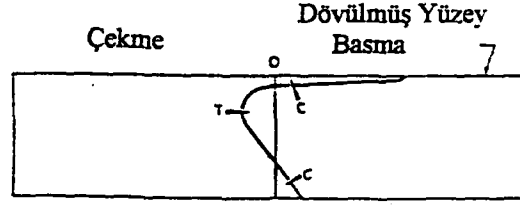
Yorulma çatlakları, genellikle parçanın yüzeyinde başlar. Bilyalı dövmenin faydalı etkiler oluşturmamasının sebebi :yüzeydeki kalıcı gerilmeli tabaka içinde çatlağın başlamasının ve yayılmasının çok zor olmasından kaynaklanmaktadır [22].

Kalıcı gerilme: toplam gerilme malzemenin akma gerilmesini geçip malzeme akana kadar o tabakada varlığını sürdürecektir. Akma gerçekleştiğinde ise etkisini kaybedecektir. Ayrıca gerilme dinamik akma gerilmesinin iki katına çıktığında veya ortam sıcaklığı malzemenin gerilme gevşetme sıcaklığının üzerine çıktığında malzeme gevşeyecek ve gerilme etkisini kaybedecektir.

Yorulma çatlakları genellikle gerilmenin uygulandığı bölgelerde ve bu gerilmenin uygulanış yönüne dik doğrultularda oluşurlar. Bilyalı dövülmüş yüzeyde oluşan kalıcı baskı gerilmesi malzemede oluşacak çatlağa karşı direnci artırır. Çatlağın başlangıcını geciktirir. Çatlak oluşmasından sonra ise yayılmasını engeller veya geciktirir. Bu etkiyi en az iki şekilde oluşturur:

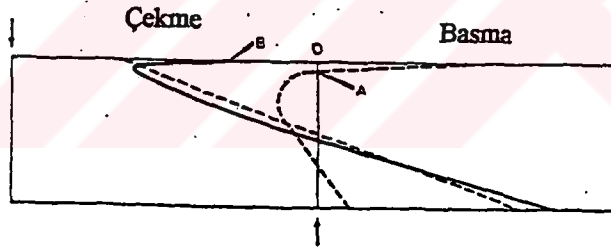
İlk olarak bu tabakada dışardan gelen kuvvetlerin oluşturduğu çekme gerilmesini karşılar ve yüzeydeki ince tabakanın kayma gerilmesi yönünde kaymasına karşı direnç oluşturur. Böylece bu tahribatı oluşturmak için daha fazla kuvvet gerekir.

Şekil 3.6'da hiçbir dış yüke maruz olmayan ve sadece bilyalı dövülmüş kirişteki gerilme dağılımı gösterilmiştir. Kiriş dengede olduğu ve hiçbir dış kuvvet olmadığı için baskı gerilmeli bölgenin alanı çekme gerilmeli bölgenin alanına eşit olacaktır. Böylece kirişteki toplam moment sıfırdır [24].



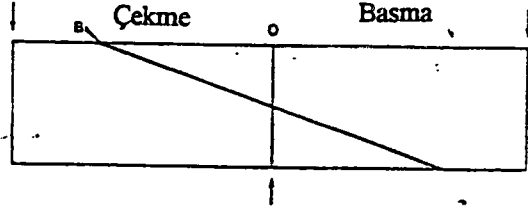
Şekil 3.6. Bilyalı Dövülmüş Bir Kirişteki Gerilme Profili [24]

Şekil 3.7' de ise aynı kirişe bir dış eğme momenti uygulandıktan sonraki gerilme dağılımı gösterilmektedir. Herhangi bir derinlikteki toplam gerilme dışardan uygulanan gerilme ile malzemede bulunan kalıcı gerilmenin cebrik toplamına eşit olacaktır. Bu toplam bileşke gerilme katı sürekli çizgi ile gösterilmiştir. Bileşenleri ise kesik çizgilerle gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Bilyalı dövülmüş ve dış yükle yüklenmiş kiriş [24].

Burada dikkat edilmelidir ki bilyalı dövülmüş kirişteki toplam yüzey gerilmesi kalıcı gerilmeli yüklenmemiş kirişteki kıyasla daha düşük bir değerdedir



Şekil 3.8. Dış bir yükte eğilmeye çalışılan bilyalı dövülmemiş bir kirişteki gerilme dağılımı [24].

Bilyalı dövmenin en önemli parametresi olan dövme şiddetinin yorulmaya maruz makina elemanının kalınlığından yada elemanın kesit alanından etkilendiği saptanmıştır. Dövmenin şiddeti: Bilyanın hızına, sertliğine, çarpma açısına, kütlesine bağlıdır. Bunların hepsi bilya akımının potansiyel enerjisi ile ilgilidir. Ayrıca dövme şiddeti dövme zamanı ve sarma oranına da bağlıdır.

Isı, yorulma dayanımını azaltır çünkü baskı gerilmesinin büyüklüğünü azaltır veya tamamen yokeder. Yay çeliklerinde kalıcı gerilme 260 °C ye kadar tam etkili olarak varlığını sürdürür. 260-427 °C arasında kısmen varlık gösterebilir [24].

3.2.1. Bilyalı dövme makinaları

Bilyalı dövme makinaları bilya fırlatma şekillerine göre üç ana gruba ayrılabilir. Bunlar: pinomatik, santrifugal ve sulu dövme makinaları

Tipik bir bilyalı dövme makinası aşağıdaki ana ekipmanlardan oluşur:

Bilya fırlatma ünitesi, bilyaları istenilen hıza ivmelendirme işini yapar. Bir başka deyişle işlem sırasında bilyaların parça yüzeyine transfer ettikleri enerjiyi bilyalara verir.

Yükseltici, bir çevrim sonucu fırlatma ünitesinden geçen bilyaları tekrar ayırıcıya yükseltir. Bilyalar ayırıcıdan çıkıp tekrar fırlatma ünitesine girer.

Ayırıcı, sürekli çevrimde bulunan hasarlanmış, deforme olmuş bilyaları ayırır ve onların vereceği zararlı etkileri ortadan kaldırır.

Bilya ekleme ünitesi, ayırıcıda ayrılan bilyaların yenilerini sisteme yükleyerek çevrimdeki bilya miktarını ayarlar. Parça tutucu, iş parçasını bilya akımına doğru tutar. Parçanın her yanında eşit bir dövme şiddetinin üniform bir şekilde oluşmasını sağlar.

Kabin, makinaı sınırlandırarak bilya sıçramasını engeller ve işlem sırasında olusan tozların toz toplayıcıya verilmesini sağlar.

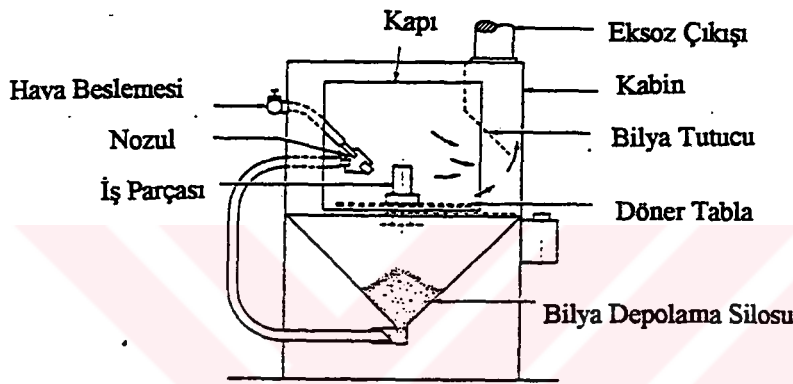
A) Pinomatik bilyalı dövme makinaları

Bilyaları gerekli hıza ulaştırmak için bir hava jeti kullanan makinalardır. Bu tür bilyalı dövme makinaları bilyayı hava jetine alma şekillerine göre üç gruba ayırırlar.

- Sifon indüksiyon metodu

Bu tip makinalarda sıkıştırılmış hava bir nozulda genişleştirilir. Aynı anda bilyanın nozula giriş kısmında bir vakum oluşur ve böylece bilya hava jeti içine çekilir. Bilya hava jetine girdikten sonra istenilen hıza ivmelendirilir. Bu tür

dövme makinaları en basit bilyalı dövme makinalarıdır. Bu metot genellikle az miktarlarda ve küçük boyutlarda iş parçalarının düşük dövme şiddetlerinde dövülmesi amacı ile kullanılan makinalarda tercih edilmektedir. Bu tür makinalar ayrıca çeşitli labaratuvar uygulamaları ve diğer değişik amaçlar için de kullanılmaktadırlar. Bu metotla çalışan makina aşağıdaki şekilde gösterilmiştir [24]

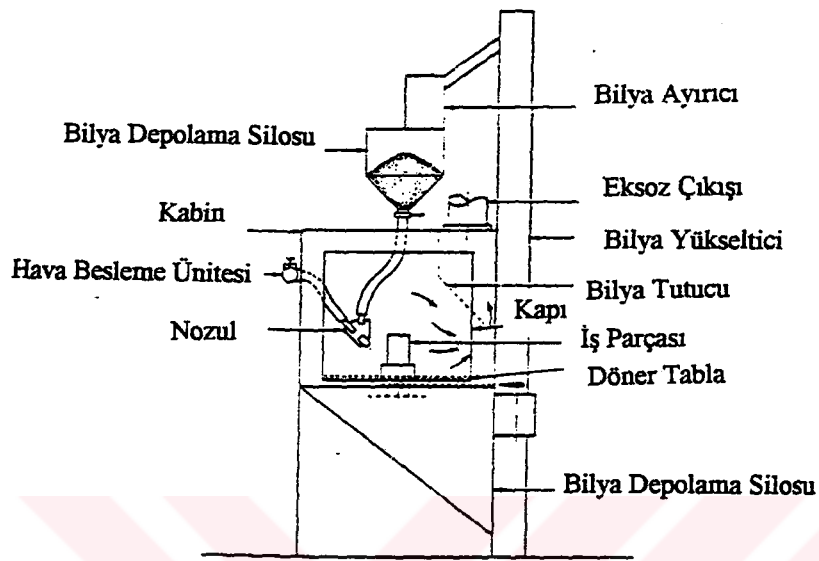


Şekil 3.9. Sifon İndüksiyon Makinası [24]

- Yerçekimi indüksiyon metodu

Bu tip makinalarda bilya kabin üzerinde bir haznede depolanır. Bilya nozul içindeki hava jetine kendi ağırlığı ile indirilir. Burada kullanılan nozul sifon indüksiyon metodunda kullanılan nozula benzemektedir. Farklı olarak ayarlanabilen bir hava jetine sahiptir. Buda dövme şiddetinin ayarlanmasında etkili olmaktadır. Bu tür bir bilyalı dövme makinasında birbirinden bağımsız 20 ayrı nozulda dövme yapılabilir. Her bir nozul birbirinden bağımsız olarak ayarlanabilir. Bilya debisi, çarpma açısı, gibi ayarlamalar nozul üzerinde yapılabilir. Nozulun yatay ve dikey hareketine olanak vardır. Bu özellik değişik geometrilerdeki iş parçalarının dövülebilmesini sağlamaktadır. Bilgisayar

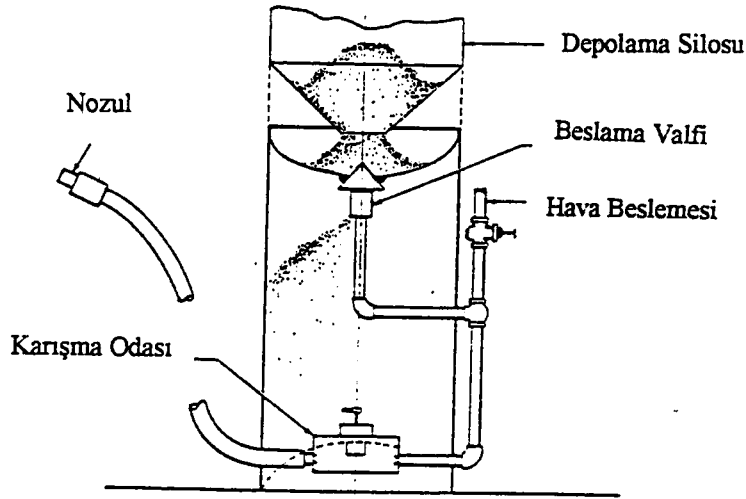
kontrollü için bu tip bilyalı dövme makinaları ideal makinalardır. Bu makina şekil 3.10'da gösterilmiştir [24].



Şekil 3.10. Yerçekimi İndüksiyon Makinası [24].

- Direkt basınç makinaları

Bu tip bilyalı dövme makinalarında bilya, bilyayı nozuldan fırlatan basınca eşdeğer basınca sahip bir tüp içinde tutulur. Bu basınçlı tüp içerisinde bulunan karıştırıcıda karıştırılan bilyalar sonra nozula verilir ve iş parçasına püskürtülür. Bu sistemi taşıyan makinalar genellikle yüksek dövme şiddeti gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır [26].



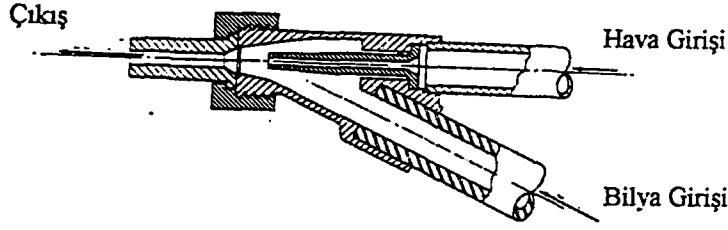
Şekil 3.11. Direkt Basınç Ünitesi [24].

- Nozullar

Yukardaki her üç tip makinada da bilyalar bir nozul aracılığı ile iş parçasına fırlatılır. Nozullar püskürtme çaplarına göre ölçülendirilirler. Buçap 6 mm den 9 mm'ye kadar değişmektedir(1/4 inch ten 3/4 inche).

Nozul çapları işlemde kullanılacak bilya çaplarına göre belirlenir. Nozul çapını belirlemek için baz alınacak büyüklükler ise akış hacmi, istenilen dövme şiddeti, dövülecek alanın büyüklüğü gibi etkenlerdir.

Bilya akış hacmi; bilya boyutuna, hava basıncına ve hava jetinin pozisyonuna ve büyüklüğüne bağlı olarak 0,11 kg/dk dan 22 kg/dk ya kadar değişebilmektedir(1/4-50lb/dk). Bu tür makinalarda nozulla ilgili iki özellik göze çarpmaktadır [24]:



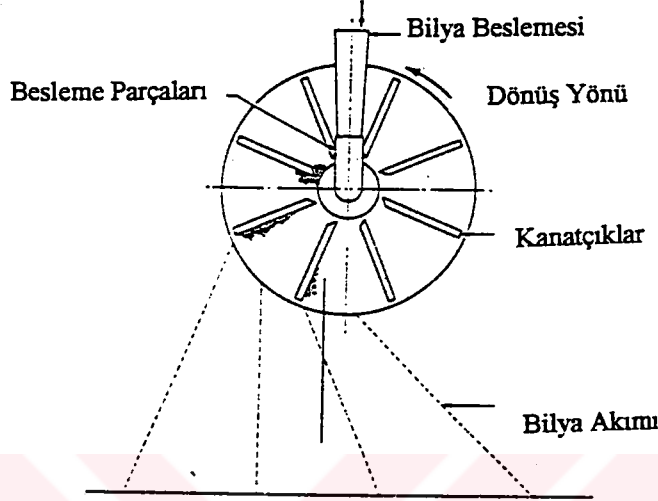
Şekil 3.12. Nozul [24]

- a.) Nozulun bosalma ucundan fırlatılan bilyalar aşındırıcı etkilerinden dolayı bu ucu aşındırırlar. Nozulun aşınma miktarı kendi kompozisyonuna ve içinden akmakta olan bilyaların kompozisyonuna bağlıdır. Uzun aşınma ömürlü nozulların püskürtme uçları hemen hemen sabit kaldıklarından dolayı üniform bir bilya akışı ve buna bağlı olarak ta yine üniform bir dövme sağlarlar.
- b.) Pnömatik dövme makinalarında hava basıncını hassas ayarlayacak iyi bir basınç regülatörü çok önemlidir. Ayrıca basınçlı hava hattındaki suyu alacak bir sistemde gerekir. Aşırı su oluşumu bilyalara zarar vermekte bilya kütlelerinin oluşmasını sağlamaktadır [24].

B) Santrifüj bilyalı dövme makinaları

Bu makinalarda bilya merkez kaç kuvveti yardımıyla fırlatılır. Bilya kendi ağırlığı ile veya düşük bir hızda üzerinde kanatçıklar veya bıçaklar olan ve dönen bir çarkın merkezine bırakılır. Çark üzerindeki kontrol üniteleri yardımı ile bilya bıçaklara doğru yönlendirilir ve böylece merkez kaç kuvvetinin etkisi ile dönen çarkın merkezinden dışarı doğru bilya fırlatılmış olur. Düz iş parçalarını dövme durumunda bu fan şekilli bilya jeti akımı mümkün olduğunca yoğun olmalıdır.

Arzu edilen bilya akış istikameti tekerlek üzerindeki bıçaklarda yapılan açısal ayarlamalarla elde edilir [24].



Şekil 3.13. Çarklı bilya Fırlatma Ünitesi [24]

C) Sulu dövme makinaları

Bu tür dövme makinaları jet türbin kanatçıkları gibi çok ince ve hassas parçaların hafif dövme şiddetlerinde dövülmesinde kullanılır. Bu makinalarda seramik veya cam bilyalardan oluşmuş sulu bir karışım kullanılır. Bu karışım hava basıncı ve bir pompalama sistemi ile nozula ve oradan da sisteme gönderilir ve bu çevrim dövme işlemi boyunca devam eder. Bu tür makinaların her türlü ekipmanları ıslak ortama göre dizayn edilmiştir [24].

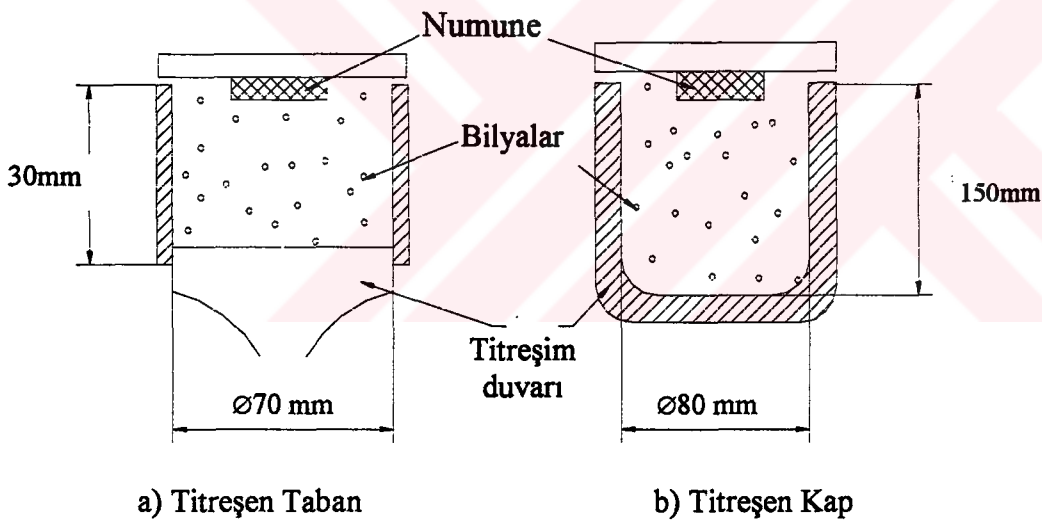
D) Ultrasonik bilyalı dövme makinaları

Ultrasonik bilyalı dövme hacimli parçalarda faydalı kalıcı gerilme oluşturmak için geliştirilmiş yeni bir bilyalı dövme işlemidir. Ultrasonik bilyalı dövme ve

bilyalı dövme arasındaki esas fark, küresel bilya vuruşunda ultrasonik titreşimin kullanılmasıdır. Ultrasonik bilyalı dövmede iki tip titreşim odası vardır.

Ultrasonik bilyalı dövme şu parametreleri kapsar:

- Bilya çapı 0,4 ila 3 mm arasındadır. Bu çaplar konvansiyonel bilyalı dövme işlemlerinde kullanılan bilyaların çaplarından daha büyüktür. Ultrasonik bilyalı dövme uygulamalarında bilyaların hepsi kontrol edilmiş ve aynı çaptadır.
- Bilyaların parçaya çarpma hızları 20 m/s ile sınırlandırılmıştır.
- Bilyaların sayısı limitlendirilmiştir ve işlem için gerekli olan kadardır.
- Rulman bilyaları gibi (>60 HRC) konvansiyonel sert bilyaların kullanımına müsaade edilebilir, bu ultrasonik bilyalı dövme sırasında bilya kırılmalarını önler.



Şekil 3.14. Ultrasonik bilyalı dövme odaları [27].

Ultrasonik bilyalı dövmede partiküller ve parçalar 20 000 Hz'de kapatılmış titreşim odasındadır. İşlenmiş parçalar titreşime karşı akustik izole edilmiştir. Güç kaynağı açıldığında dövme parçaları, bir Brownian hareketinde odanın

duvarlarına titreşimden dolayı rastgele hareket ederler. Bu, parçalarda rastgele darbe üretimi işleminin yapılmasıdır.

Ultrasonik bilyalı dövme cihazları plastiklerin ultrasonik kaynağında kullanılan ticari elemanlardan ibarettir. Ultrasonik bilyalı dövme 3 KW'lık elektrik enerjisine ihtiyaç duyar. İşlemde şu parametreler etkilidir [27].

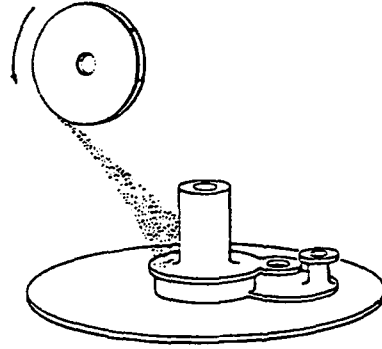
- İşlemin süresi
- Odadaki bilya miktarı ve bilya çapı
- Titreşimin büyüklük ve sıklığı
- Oda'da dövülecek parçaların yerleştirilmesi ve geometrisi

3.2.1.1. İş parçası tutma yöntemleri

Mümkün olduğu kadar üniform bir dövülmüş yüzey elde edebilmek için çeşitli iş parçası tutma yöntemleri geliştirilmiştir. Şekil 3.15' de hem hava basınçlı hemde santrüfujal dövme makinalarında ortak olarak kullanılan bir iş parçası tutucusu gösterilmektedir.

- Tek yönlü dönel tutucu

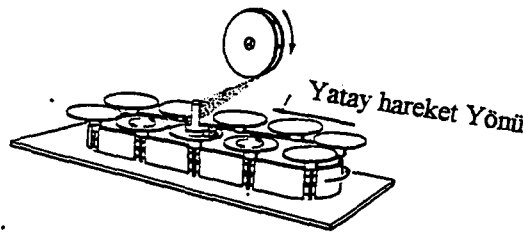
Dikey bir eksen etrafında dönebilen bir tutucu yüzeydir ve iş parçası bu yüzey üzerine sabitlenmiştir. İş parçası bu yüzeyle birlikte dönerken bilya akımına maruz kalır. Dövülen parça yüzeyin dönme merkezine simetrik olarak tuturulmuştur. Böylece parçanın her tarafında üniform bir dövme şiddeti elde edilir.



Şekil 3.15. Tek Yönlü Döner Tutucu [24]

- Doğru hatta hareketli döner tutucu

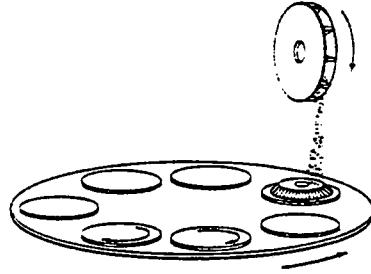
Bu tip tutucular yukardaki yöntemin değişik bir versiyonudurlar. Farklı olarak kendi etrafı-nda dönebilen tutucu yüzey aynı zamanda doğru bir hat üzerinde de hareket e-debilmektedir. Bu sistemin kullanıldığı makinalarda bilya konsantrasyonu bu hat üzerinde yoğunlaşmıştır ve bilyalı dövme veriminin enyüksek olduğu nokta bu hat üzerindedir.



Şekil 3.16. Doğru Hatta Hareketli Döner Tutucu [24]

- Dairesel hatta hareketli döner tutucu

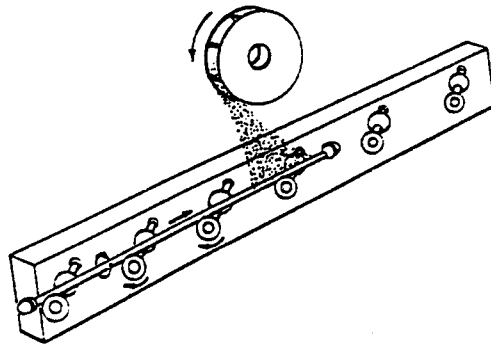
Bu Tür tutucularda döner tutucu dairesel bir hatta hareket eder. Şekil 3.17' de gösterildiği gibi bilya akımı istenilen dövme şiddetini ve sarma oranını verecek şekilde pozisyonlandırılmıştır.



Şekil 3.17. Dairesel Hatta Döner Tutucu [24]

- Radyal dönüşlü konveyörler

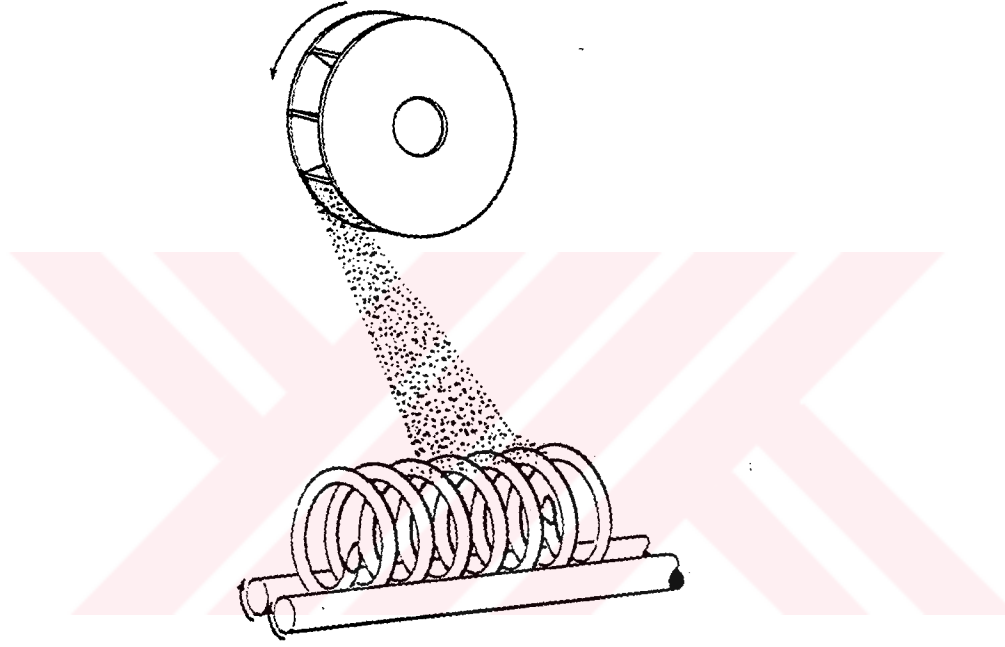
Uzun iş parçalarını bilya akımına maruz bırakmak için tercih edilen bir tutucu metottur. Silindirik konveyör üzerinde aksenal yönde ilerleyen ve bilya akımına maruz kalan iş parçasının kendi eksenini etrafında dönebilmesi de sağlanmaktadır



Şekil 3.18. Radyal Dönüşlü Konveyör [24].

- Eksenel dönuşlü konveyörler

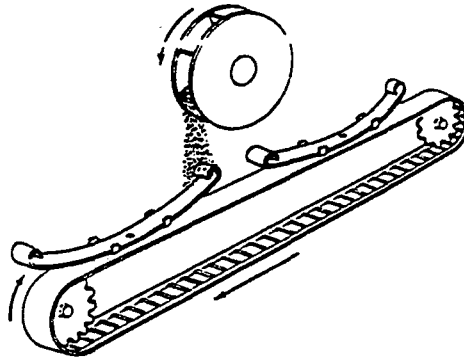
Bu tür tutucular yatay ve birbirine paralel çubuklardan oluşur. Yine bu tutucu konveyörlerde de bir öncekinde olduğu gibi iş parçasına eksenel ve radyal hareket verilir. Fakat bu tür tutucular daha kısa boylu ve büyük çaplı iş parçalarında tercih edilirler. Bir besleme ünitesi iş parçasını makina boyunca ilerletir.



Şekil 3.19. Eksenel dönuşlü konveyör [24]

- Kayış konveyörler

Bu rada iş parçası makinada dönmeden düz bir hat üzerinde ilerler. Bu şekil 3.20’ de gösterilmektedir. Bu şekilde yaprak yaylar sonsuz bir kayış konveyör üzerinde bilya akımına maruz bırakılmaktadır.



Şekil 3.20. Kayış konveyörler [24]

3.2.1.2. Makinada bilya sirkülasyonu

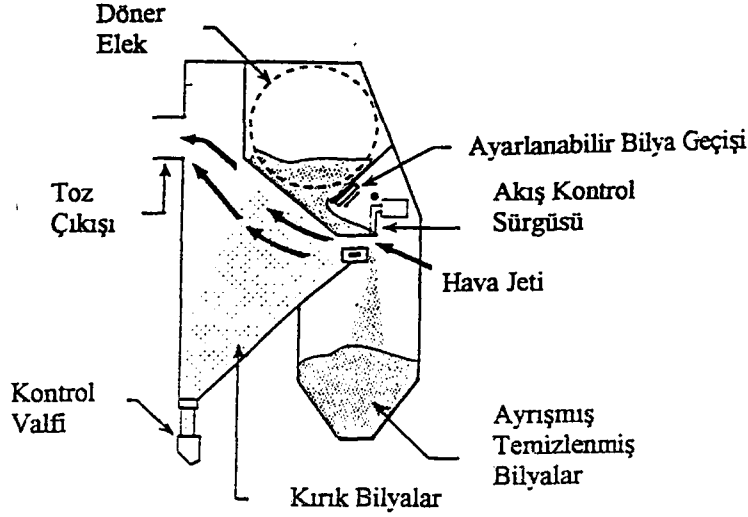
Tezgahı çevreleyen duvarlar veya kabin, iş parçasına çarpan bilyaların sıçramasını engeller ve bu sıçramalardan doğabilecek tehlikeleri önler. Ayrıca bilyalı dövme işlemi sırasında oluşan tozu tutar ve bir çıkışla toz toplama ünitesine vererek ortamdaki uzaklaşmasını sağlar. Kabin ayrıca iş parçasına çarpan bilyaların içinde toplandığı bir silo görevi de görür. Burada toplanan bilyalar bir yükseltici vasıtası ile eleme ünitesine taşınır. Burada kırılan, aşınan bilyalar ve iş parçasından koparak bilyaya karışan partiküller temizlenir ayrıştırılır.

- a-) Bilyalı dövmede kullanılan makinalar sürekli olarak istenilen dövme şiddetini verbilecek dövme şartlarını sağlayabilmelidir. Bu özellik sadece sulu dövme makinalarından beklenmez. Çünkü dövme sıvısındaki bilyalar sürekli kırılır ve aşınırlar. Dövme makinasında sistemdeki kırık ve boyut toleransları dışındaki bilyaları tespit edecek ve onları ortamdaki uzaklaştıracak kapasitede

olmalıdır.Makinadaki kırık bilya miktarı uygulamada birçok işlem parametresini etkilemektedir.

b-) Kırık bilyaların ayrılması ve yabancı partiküllerin temizlenmesi için bir bilya ayırıcı ünitesi kullanılır. Bu ayırıcıda bütün bilyalar her çevrim esnasında ince bir tabaka üzerinden hava akımına çapraz olarak akar.Bu kanaldaki hava akımı bilyaların ayrışmasını sağlar.Boyut altı bilyalar ve kırık bilyalar kütleleri azaldığından hava akımının etkisi ile dışarıya açılan bir kanala atılırlar. Normal boyutlu sağlam bilyalar daha ağır oldukları ve kütlelerinden birşey kaybetmedikleri için hava akımından etkilenmez ve yollarına devam ederek bilya haznesine düşerler. Bu ayırıcı ünitelerdeki kanalların durumu hava akımının hızı gibi değişkenler bilya boyutları ile ilgilidir ve ona göre belirlenir.(şekil 3.21)

c-) Uzu süreli dövme işlemlerinde üniform dövme şartlarının sağlanabilmesi için ayırıcı üniteye ayrılan bilya miktarı kadar bilyanın çevrime eklenmesi ve sirkülasyondaki bilya miktarının sabitlenmesi gerekir. Yine bu işi yapabilecek bir ekipmanın da bilyalı dövme makinasında bulunması gerekir [24].



Şekil 3.21. Havalı Bilya Ayırıcı [24]

3.2.1.3. Bilgisayar kontrollü bilyalı dövme makinaları

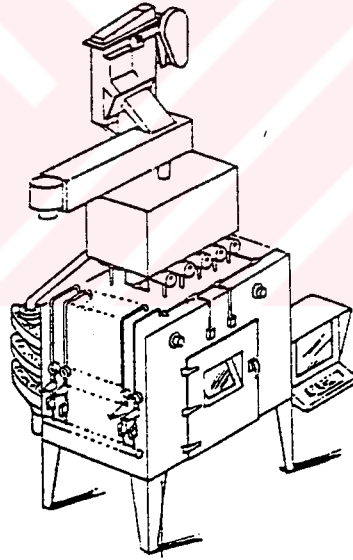
Bilgisayar denetimi, bilyalı dövme işleminde iş parçası yüzeyinde istenilen şartları sağlayabilmek açısından idealdir. Bu parametrelerin sürekliliği kalıcı gerilmelerin üniform olmasını sağlamaktadır. Bilgisayar denetimi dizayn ve üretim mühendislerine işlemi her alanda uygulama kolaylığı ve istenilen şartlarda bir dövülmüş yüzeye tam olarak ulaşma olamagı vermiştir. Bilgisayar denetimli bilyalı dövme tezgahlarında aşağıdaki parametreleri sürekli olarak kontrol etmek ve kaydetmek mümkündür.

- Her bir nozuldaki veya çarktaki bilya akışı
- Her bir nozuldaki bilya akış debisi ve hava basıncı
- Çarkın dönme hızı
- Nozulların konumları veya hareket hızları

- Döner tutucuların veya konveyörlerin hızları

Avantajlar ise temel olarak şunlardır:

- a-) Bilyalı dövme işlemi sırasında her hangi bir parametre verilen limitlerin dışına çıkarsa bilgisayar makineyi durdurur ve ekrana oluşan hatanın cinsini belirten bir mesaj yazar
- b-) Bütün operasyonun bir printer çıktısı her çevrim için ayrı ayrı alınabilir. Ayrıca bu bilgiler daha sonraki uygulamalara referans olması açısından depolanabilir.



Şekil 3.22. Bilgisayar kontrollu bilyalı dövme makinaları [24]

3.2.2. Bilyalar

Bilyalı dövme işleminde makina parçalarına uzun yorulma ömrü kazandırmak için kullanılan çeşitli bilya tipleri vardır. Bunlar demir ve demirdışı bilyalar, kesme tel bilyalar, cam bilyalar, ve seramik bilyalardır. Seçilecek bilyanın çeşidi dövülecek makina parçasının cinsine, istenilen dövme şiddetine ve bilyalı dövme makinasındaki ekipmanlara bağlıdır.

Dövme işleminde elde edilecek şiddeti, kullanılan bilya çeşidinin herbir tanesinin kütlesi ve ağırlığı doğrudan etkiler. Buna bağlı olarak Yüksek dövme şiddeti istenilen uygulamalarda (Almen “C” ve Almen “A”) kesme tel bilya veya çelik bilyalar, kütlelerinden ve işlem sırasındaki dayanıklılıklarından dolayı kullanılma durumundadırlar. Cam ve seramik bilyalar genellikle Almen “N” sıklasıyla ölçülen ve Almen A sıklasına göre daha düşük dövme şiddeti gerektiren uygulamalarda kullanılırlar. Bu bilyalar düşük kütlelerinden dolayı çok yüksek hızlara çıkarlar ve hacimlerinin küçük olması da bilyanın yüzeyin ne kadarına temas ettiğinin bir göstergesi olan sarma oranını artırır. Çünkü bu tür bilyalarda birim parça alanı başına düşen bilya sayısı artmaktadır.

Çelik bilyalar en yaygın olarak kullanılan bilyalardır. Bu tür bilyalar santrüfj dövme makinalarında olduğu gibi yüksek miktarlarda bilya akışı gerektiren makinalarında kullanılırlar. Direkt basınç makinaları ve yerçekimi indüksiyon makinalarında ise her tür bilya kullanma olanağı vardır. Sifon indüksiyon makinalarında sadece cam seramik ve 600 mikronluk elekten geçen çelik bilyalar kullanılır.

Paslanmaz çelik veya demirdışı iş parçaları dövüleceği zaman, özel paslanmaz çelik kesme tel bilyalar, cam ve seramik bilyalar kullanılır böylece demir bilyalardan kaynaklanabilecek kirlenme sorunları giderilir.

Uzun bir peryot boyunca işlenen bütün numunelerde ve numunelerin bütün yüzeylerinde ideal dövmenin sağlanabilmesi için bilyalarda taneden taneye aşağıdaki karakteristikler üniform olarak sağlanabilmesi gerekir. Bunlar kontrol altında tutulmadığı taktirde bilyalı dövme işleminin faydalı etkilerine tamamen kavuşulamaz hatta zarar vermesi söz konusu hale gelir. Bu bilya karakteristikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir [24]

- Boyut
- Geometri
- Yoğunluk
- Sertlik
- Dayanıklılı

3.2.2.1. Bilyaların sınıflandırılması

- Demir bilyalar

Demir bilyalar aşağıdaki guruplardan oluşurlar.

a. Dökme çelik bilyalar

1. Yüksek karbonlu (%0.85- %1.2) dökme çelik bilyalar.(SAE J827)
2. Düşük karbonlu (%0.15 ten az) dökme çelik bilyalar. (SAE J2175)

b. Dökme demir bilyalar (Yüksek karbonlu %1.7 den fazla)

- c. Özel işlem görmüş carbonlu veya paslanmaz çelik kesme tel bilyalar. (SAE J441)
 - d. Sertleştirilmiş bilyalar. Bunlar çelik ve alaşımlı çelik olabilirler. (AMS 2431/59)
 - e. Atomize edilmiş toz bilyalar. Mikron boyutunda çeşitli boyutlarda olabilirler.
- Demir dışı bilyalar.

Demir dışı bilyalar aşağıdaki guruplardan oluşur.

- a. Sentetik-metalik olmayan
 - 1. Cam bilyalar, SAE J1173
 - 2. Seramik bilyalar, SAE1830
- b. Metalik demir olmayan bilyalar

3.2.2 Bilya üretimi ve özellikleri

- Dökme çelik bilya

Bu bilyalar atomizasyonla erimiş çeliğin istenilen şekilde kontrollü şartlar altında hızlı katılaştırılması ile üretilirler. Bu esnada yüksek karbonlu çelikler östenize olarak istenilen sertliğe ulaşırlar. (SAE J827) Düşük karbonlu çelikler alaşımlandırılırlar ve istenen sertliğe ulaştırılırlar.(SAE J2175) İki tür malzemedan üretilen bilyalar da SAE J444 te gösterilen ve S70 ten S1320 ye kadar süren bir aralıkta elenerek sınıflandırılırlar[24].

Bu bilyaların kimyasal analizleri, sertlik, mikroyapı özellikleri ve fiziksel karakteristikleri SAE J827 ve SAE J2175 te gösterilmiştir. Dökme çelik bilyaların sertlikleri ortalama 40-50 HRC arasındadır. Bazan yüksek karbonlu dökme çelik bilyaların sertlik değerleri 67 HRC ye kadar çıkabilir [24].

Çizelge 3.1 Dökme Demir ve Çelik Bilya Boyutları [28].

Dökme Bilya Gösterim	Bilya Çapları	
	İnch	mm
S 330	0,0331	0,841
S 230	0,0232	0,589
S 170	0,0165	0,419
S 130	0,0138	0,350
S 110	0,0117	0,297
S 70	0,0070	0,178

- Dökme demir- soğuk işlenmiş- dövülmüş bilyalar

Bu bilyalar son yıllarda yaygın olarak kullanılmamasına rağmen bazı özel yorulma ömrünü artırma uygulamalarında kullanılmaktadır.

1. Soğuk işlenmiş demir bilyalar % 2.5- 3.5 karbon bunun yanı sıra % 0.030 –1 arasında fosfor ihtiva ederler. Ortalama sertlik değerleri malzemenin mikro yapısına bağlı olarak 55-66 HRC arasında değişir.
2. Dövme bilyalar ise soğuk demir bilyaların müstemilatıdır. Önceki yapı ısıtılıp feritten perlitte dönüştürülür. Böylece bu bilyaların sertlikleri 22-40 HRC arasına iner.

- Özel kesme tel bilyalar

Bu tür bilyalar soğuk olarak sürülen bir telin yaklaşık olarak çapına yakın uzunlukta kesilmesi ile üretilirler.(SAE J741) Bu kısa kısa silindirler kesildikten sonra dövme bilyası olarak kullanılabilmesi için keskin köşeleri yuvarlatılır.Bu yuvarlatma işleminin miktarı kesme tel bilyanın nihai şeklini belirler. Sekil silindirden küreye dönüşür. Bu bilyalar genellikle paslenmaz çelik yada karbon çeliklerinden üretilir.

Çizelge 3.2 Kesme Tel Bilya Boyutları [28].

Kesme Tel Bilya Tipi	Nominal tel çapı (mm)	Referans çap (inç)
CCW 14	$0,35 \pm 0,02$	0,014
CCW 20	$0,50 \pm 0,02$	0,020
CCW 31	$0,80 \pm 0,02$	0,031

- Sertleştirilmiş küreler

Bunlar da soğuk olarak telden küçük silindirler olarak üretilirler ve sonra küreye dönüştürülürler. Sertlikleri 57-63 HRC arasındadır. Boyutları ise 1.5- 6 mm arasında değişmektedir. Bu bilyalar havalı dövme makinalarında kullanılırlar.

- Sentetik bilyalar

- a. Cam bilyalar

Bu bilyalar optik seramik camdan üretilirler. Atmosferik neme asitler ve alkalilere karşı dayanıklıdırlar. Küre şeklinde oldukları için gerilmeleri her taraflarında eşittir ve aşınma ve kırılmaya karşı dayanıklıdırlar. Bu bilyaların boyutları SAE J1173 te belirtilen boyutlarla uyumludur. Sertlikleri 45 HRC civarındadır.

- b. Seramik bilyalar

Cam bilyalar silikon ve zirkonyumun bilur kristalleri elde etmek için oksitlerin elektro füzyonundan elde edilir. Seramik bilyaların sertlik değerleri 57-63 HRC arasında değişmektedir. Bilyaların boyutları ve diğer özellikleri SAE J1830 da belirtilmiştir.

Çizelge 3.3. Seramik Bilya Boyutları [28].

Sembol Z	Nominal boyutlar inç (mm)	
Z 850	0,850 / 1,180	0,033 / 0,046
Z 600	0,600 / 0,850	0,024 / 0,033
Z 425	0,425 / 0,600	0,017 / 0,024
Z 300	0,300 / 0,425	0,011 / 0,017
Z 210	0,210 / 0,300	0,008 / 0,011
Z 150	0,150 / 0,210	0,006 / 0,008

- Metalik-demirolmayan bilyalar

Bu tür bilyalar demir olmayan makina parçalarının işlenmesinde kullanılırlar. Demir olmayan parçaların demir esaslı bilyalarla dövülmesi esnasında bazı kirlenme ve yüzeyin renginin değişmesi ile ilgili problemler çıkmaktadır. Bakır, çinko, bronz ve alüminyum alaşımlarından çeşitli üretim teknikleri kullanılarak üretilirler. Düşük sertliklerinden dolayı sınırlı uygulamalarda kullanılırlar. Genelde demir olmayan döküm parçaların döküm pürüzlerini gidermek için kullanılırlar.

3.2.2.3. Bilya tüketimi ve kontrolü

Bir bilyalı dövme operasyonunda tüketilen bilya miktarı aşağıdaki değişkenlere bağlıdır.

- Üretim şartlarından kaynaklanan ve bilyaya özgü bir özellik olan bilya dayanıklılığına bağlıdır.
- Bilyanın hızı, çarpma açısı, sertliği gibi bilya parametrelerine bağlıdır.
- Dış faktörlere bağlıdır.

Demir esaslı bilyaların dayanıklılıkları direkt olarak fiziksel, kimyasal üretim kontrolden ile kesme tel bilyaların dayanıklılıkları da telin gördüğü soğuk ve sıcak işlem miktarlarına bağlıdır. Nihai elde edilen mikro yapı ve bilya boyutları bilyaların mekanik özelliklerini belirler. Tip, miktar ve fazların dağılımı demirde

sertliği, çarpma gerilmesini, aşınma direncini, tokluğunu ve dayanıklılığa etki eden diğer bilya özelliklerini belirler [24].

Demir esaslı bilyalar içinde en dayanıklı bilya çeşidi kesme tel bilyadır. Bu bilyayı ikinci olarak dökme elik bilyalar takib eder. Demir olmayan bilya eşitleri içinde cam bilyalar yaygındır, ömürleri uzundur. Seramik bilyaların ömürleri ise demir ve cam bilyaların ömürleri arasındadır. Bütün bilya çeşitlerinde tane kırılması bilyaların sertliklerini etkiler ve bilya sertliği arttıkada kırılma oranı artar.

Dövme parametreleri parça dizaynıyla, sertliğiyle, ve parçanın maruz kalacağı dövme şiddeti ile belirlenir. Parça yüzeyinde oluşturulacak maksimum gerilmeyi artırmak için parçayı dövmede kullanılan bilyaların sertliği enaz parçanın sertliği kadar veya ondan daha sert olmalıdır.

Dış faktörler ise bilya ayırıcı, bilya besleme nitesi, makinanın durumu, bilyanın dışarda bekleme şartları, bilya dayanıklılığı, dövme parametreleri ve dövülecek parçanın sertliğinden kaynaklanan faktörlerdir. Bilya dayanıklılığı, işlem parametreleri, dövülecek malzemenin sertliği ve dış faktörlerin birbirlerinden etkileşimleri toplam bilya tüketime etki ederler [24].

3.2.3. Bilyalı dövmenin parametreleri

Bilyalı dövme işleminde etkili olan parametreler bilya, ortam ve dövülen malzeme ile ilgilidir. Aşağıda bu işlemde etkili olan parametreler açıklanmıştır.

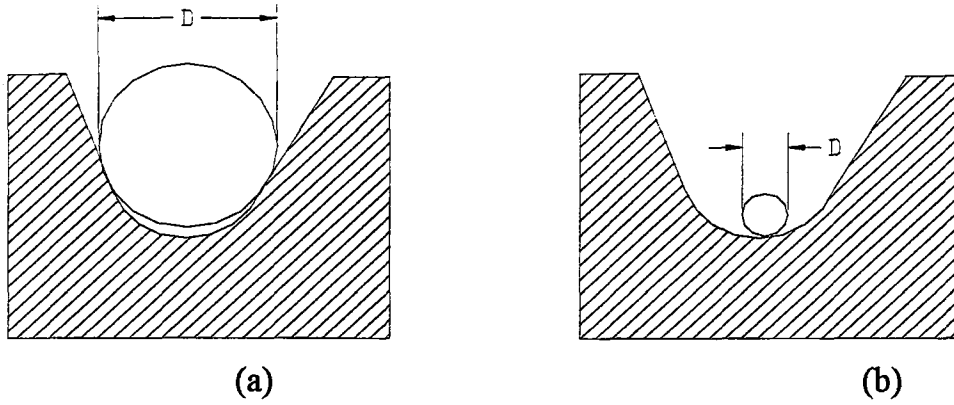
3.2.3.1. Bilyanın büyüklüğü

Bilya boyutunun seçiminde iki kıstas mevcuttur.

- i) Genel bir kural olarak, dövülen parçada yüzey hasarı meydana getirmeyecek en büyük bilya çapı seçilmelidir. Alüminyum dövülmesinde gerekli olan şiddetten daha büyük bilya büyüklüğü, nüfuz derinliğini artırmakta kullanılır. Yüzey görünüşü önemli olduğu zaman alüminyum parçalar için en küçük tane büyüklüğünü belirtmek adettir. Aynı şiddette, alüminyum üzerindeki dövme etkisi bilya büyüklüğünün artmasıyla artar. Yüksek dövme şiddeti gerektiğinde diğer parametreler sabit tutulursa büyük bilya çapı seçimi tavsiye edilir.
- ii) Bilya boyutlarının seçiminde işlem görecektir parça boyutları ve şeklinin önemi büyüktür. Dövülecek parça üzerindeki mevcut delik, yuva ve iç bükey kısımların yarı çapları bilya boyutu seçimini etkilemektedir [28].

Bilya büyüklüğünün artması dövme şiddetini artırır ve yüzey sarma oranını azaltır. Bundan dolayı daha küçük taneler ile elde edilen daha hızlı oranda sarma oranı avantajını elde etmek için gerekli olan şiddeti meydana getirmeye muktedir olan en küçük tane büyüklüğünü seçmek yaygın bir uygulamadır. Belli bir tane büyüklüğünün seçimi bilyalı dövme yapılacak iş parçasının özelliği ile tayin edilebilir.

Bilyalı dövülen çok ince filetolarda bilya çapı, filetonun yarıçapının yarısından büyük değildir (Şekil 3.23). Filetolar küçük ise bilyalarda çok küçük olmalıdır. Mesela, Bilyalı dövme olayında kullanılacak bilya yarıçapı dişli çark dişinin kök yarıçapını geçmemelidir [29].

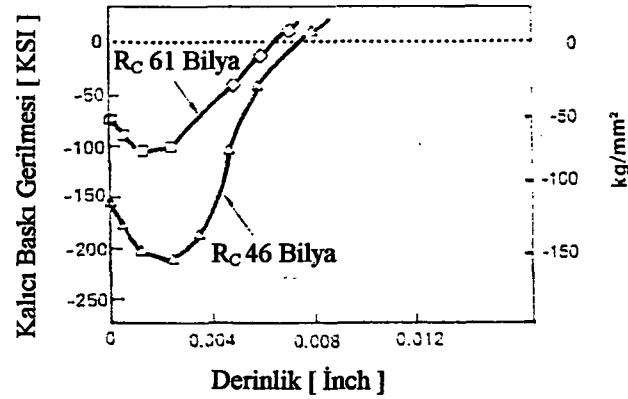


Şekil 3.23. Bilya çapı ile dövülen parça geometrisi ilişkisi [29]

- a) Bilya çapı çok büyük, $D = 2,2 \times R$
- b) En büyük bilya çapı $D = 0,5 \times R$

3.2.3.2. Bilyanın sertliği

Genel olarak uygulamalarda, bilyanın iş parçasında daha sert olması istenir. Bilyalı dövmede kullanılan bilyanın sertliği elde edilecek kalıcı baskı gerilmesinin büyüklüğünü ve derinliğini etkiler. Bu bakımdan yüzey kalitesi kiritik bir faktör olmadıkça bilyaların enaz dövülecek parça kadar veya ondan daha sert olması istenir. Eğer bilya iş parçasından yumuşak olursa, dövme şiddeti azalır, kırılan veya şekil değiştiren bilya sayısı artar bu ise maliyeti artırır [30].



Şekil 3.24.Çelikte Bilyasertliği ile Gerilme Değişimi [17]

3.2.3.3. Bilyanın hızı

Bilya hızı çark hızından veya hava basıncından etkilenir. Yay yüksekliği ile ölçülen bilyalı dövme şiddeti, bilyanın hızı arttıkça artar. Hız arttığında bilya kırılma oranı artışı, elde edilen dövme şiddeti artışı telafi eder. Ancak kırılmış veya şekli bozulmuş bilyaların sirkülasyondan ayrılması maliyeti yükseltir. Bilya boyutu, bilya sertliği ve kütlesi gibi faktörler bilya hızının seçilmesinde etkili olmaktadır [29].

3.2.3.4. Çarpma açısı

Çarpma açısı, işparçası yüzeyi ile püskürtme nozulu arasındaki açıdır. Bu açı 90° veya daha azdır. Ancak 90° 'den az olan açı dövme şiddetini düşürür. Dövmenin şiddeti çarpma açısının sinüsü ile direk olarak değişir, zira bu açının küçülmesi dövülen parçaya aktarılan enerjinin azalması demektir. Çarpma açısının düşük olması kaçınılmaz olduğu zaman istenilen şiddete ulaşmak için bilya büyüklüğü ve hızının arttırılması gerekir [23].

3.2.3.5. Bilya kırılması

Uygun bilyalı dövme sonuçlarını ve gerekli şiddetin devamlılığını sağlamak, kırılmış veya normalden küçük bilyaları sistemden uzaklaştıran bir ayırıcı ile teçhizatlandırılmış dövme ünitesiyle mümkündür. Sistemdeki tam uygun bilya yüzdesi %85'in altına asla düşmemelidir ve daima yüksek yüzdeler tercih edilmelidir [23]. Kırık bilyalar bilyalı dövme işleminden beklenen bütün faydaları götürdüğü gibi parçaya ciddi hasarlarda verir. Parçanın yorulma direnci artması gerekirken aksine düşer. İşlem sırasında bilyalar sık sık kontrol edilmeli ve işlem parametreleri bilya kırılma oranını en aza indirecek şekilde seçilmelidir.

3.2.3.6. Bilya kalitesi

Bilyalı dövme işleminde kullanılan bilyaların şekil ve boyut açısından kontrolü işlem öncesi ve işlem esnasında yapılmalıdır. İstenilen dövme şiddetinin elde edilmesini sağlamakta, kırılmış ve küçük boyutlu bilyaların sistemden sürekli olarak ayrılması önemli rol oynar. Kırılmış veya şekli bozulmuş bilyaların kullanılmasıyla bilyalı dövmeğe tabi tutulan parçaların yorulma ömründe iyileşme yerine kötüleşme olur, çünkü keskin köşeli ve kırık bilyalar, dövülen parçayı yırtabilir, çizebilir ve böylece gerilme merkezlerinin ortaya çıkmasına sebep olurlar [28].

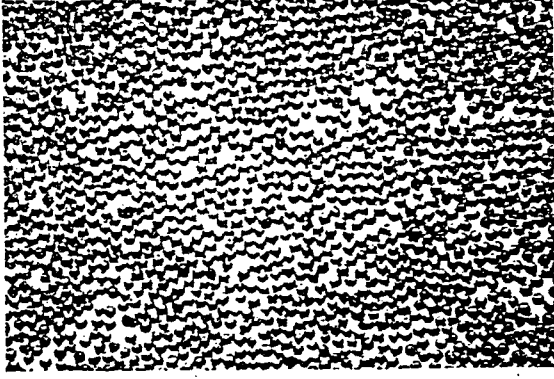
Deforme olmuş veya kırılmış bilyaların kontrolü için tipik bir test geliştirilmiştir. Bu test şöyle yapılır; Bir kenarının uzunluğu 0,25 in. (6,35mm) olan kare şekilli selobant üzerine bilyalar yapıştırılır. Sonra 10 veya 20 kat büyütme ile bu selobant üzerindeki deforme olmuş (keskin köşeli, yırtılmış, uydu yapmış, kraterleşmiş, yassılaşmış) bilyalar sayılır. Bu sayımda mesela S110 tipi bilya için

deforme olmuş bilyaların sayısı 32'den fazla olmamalıdır. Bu sayı diğer tip bilyalar içinde çizelge 3.4'deki gibidir.

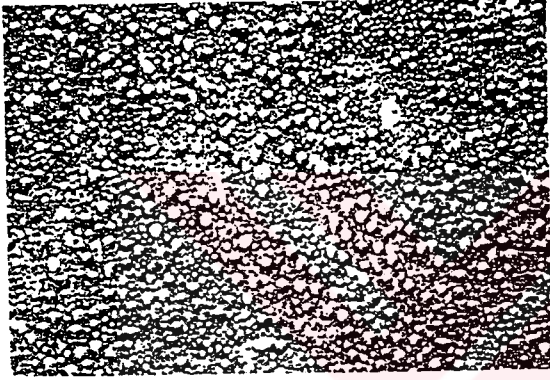
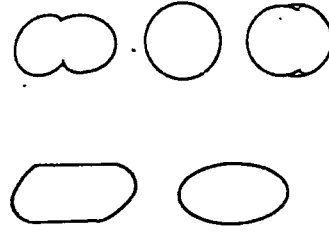
Çizelge 3.4. Deforme olmuş kabul edilebilir bilya sayıları [28].

Dökme Bilya	Elek No	Bilya Çapları İnç (mm)		Deforme olmuş kabul edilebilir bilya sayısı	Alan inç (mm)	
S 330	20	0,0331	0,841	16	0,5 × 0,5	13×13
S 230	30	0,0232	0,589	32	0,5 × 0,5	13×13
S 170	40	0,0165	0,419	16	0,5 × 0,5	13×13
S 130	45	0,0138	0,350	23	0,25×0,25	6,4×6,4
S 110	50	0,0117	0,297	32	0,25×0,25	6,4×6,4
S 70	80	0,0070	0,178	45	0,25×0,25	6,4×6,4

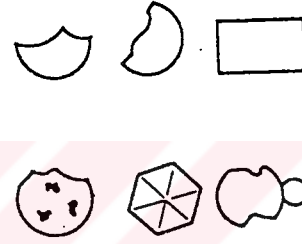
Bilyalı dövme işleminde kullanılmasına izin verilen ve verilemeyen bilya şekilleri Şekil 3.25'te gösterilmektedir göstermektedir.



A



B



Şekil 3.25. Kabul edilebilir ve Kabul edilemez bilya şekilleri [17].

A) Kabul Edilebilir Bilyalar.

B) Kabul Edilemez Bilyalar.

3.2.3.7. Bilyalı dövme şiddeti

Bilyalı dövme şiddeti tam sarmada Almen test çubuğunun yay yüksekliği olarak ifade edilir. Yay yüksekliği bir tarafı bilyalı dövülmüş test çubuğunun eğrilik yarıçapının ölçülmesiyle elde edilir. Almen test çubuklarının tam sarmada olduğunu kabul edersek yay yüksekliği belli bir kısım üzerindeki dövme çalışması etkinliğinin göstergesidir. Bilyalı dövme şiddetinin belirlenmesi için

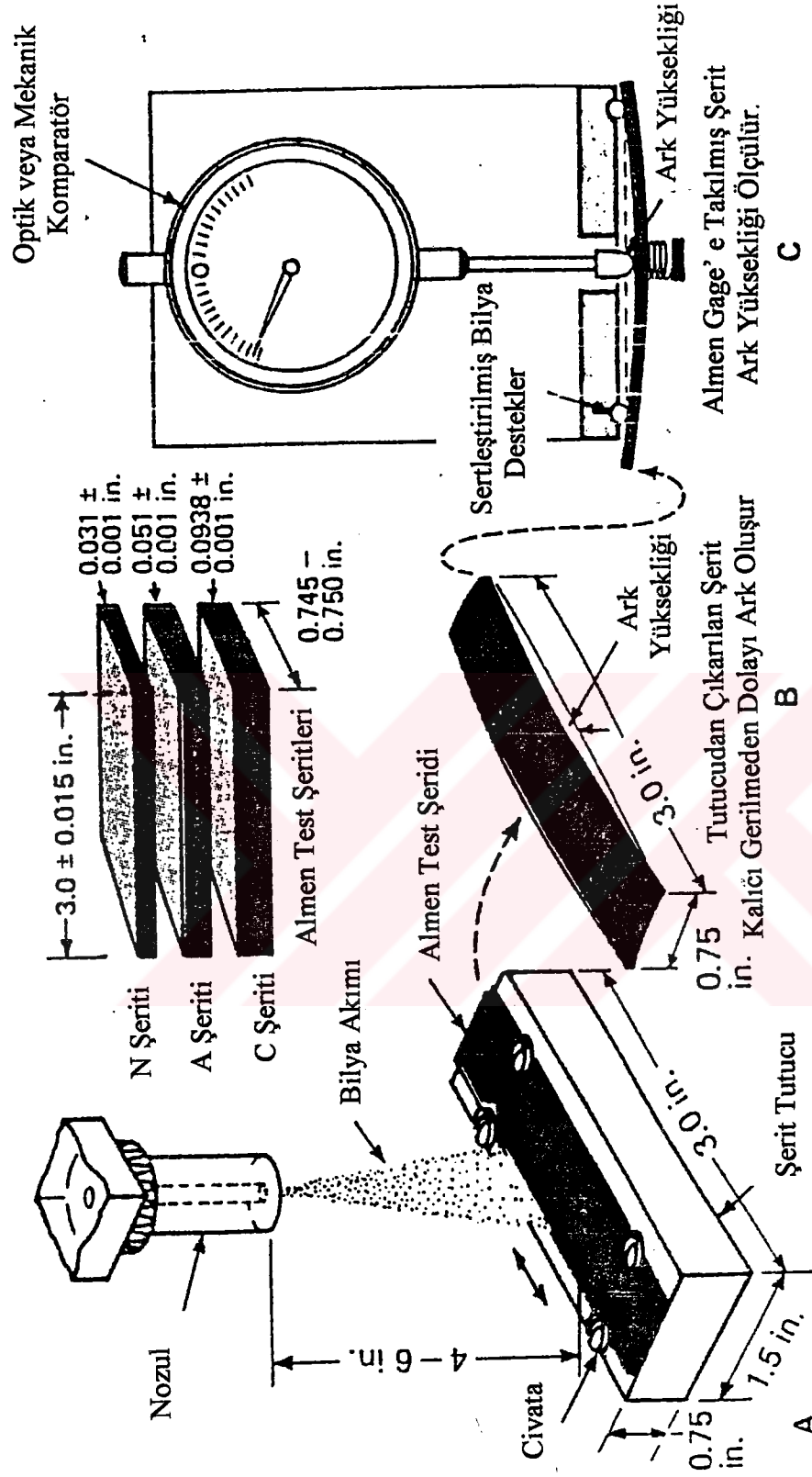
Almen test şeridi olarak bilinen metal şeritler kullanılır. Her dövme şiddetinin belirlenmesi için en az 5 adet şerit kullanılır, daha fazla şerit kullanmak dövme şiddetinin belirlenmesini de hassaslaştırır. Aynı bilya ve sabit hava basıncı ile dövülen Almen şeritlerinden eğrilik yüksekliği - zaman eğrisi çizilerek doyma noktası tespit edilir. Doyma noktası Almen test şeridinin yay yüksekliğindeki artışın %10'u geçmediği noktadır (Şekil 3.26).



Şekil 3.26. Bilyalı Dövme Şiddetinin Belirlenmesi [17].

Şekil 3.27'de Almen test şeridinin dövülmesi ve Almen gage'de eğrilik yüksekliği ölçümünün işlem basamakları gösterilmektedir. Burada bir bilyalı dövme işleminin şiddetinin ölçüm basamakları topluca verilmiştir.

Önce kullanılan Almen şeridi şerit tutucuya yerleştirilmektedir. Daha sonra bu şerit tutucu ile beraber olarak öngörülen süre kadar bilya akımına maruz bırakılmaktadır. Şerit, şerit tutucudan çıkarılıp şekildeki düzenekte görüldüğü gibi ark yüksekliği ölçülür..



Şekil 3.27. Bilyalı dövme şiddeti ölçüm basamakları [31].

Almen test çubuğu kalite kontrolünün temel standardıdır ve bu çubuklar düzenli aralıklarla makinanın aynı yerinde kullanılmalıdır. Doğru kullanılırsa, çark hızındaki veya hava basıncındaki düşmeden dolayı veya tanelerin aşırı kırılmasında dolayı yada çok küçük taneciklerin ayrılmamasından dolayı şiddet azalması yani düşük yay yüksekliği çabuk olarak görülecektir.

Çok küçük dövme şiddeti seri üretimde daha etkili ve daha ucuzdur. Çünkü, minimum etki zamanında minimum bilya büyüklüğü ile elde edilebilir. Bunun tersi olarak dövülen parçanın ince kısımları aşırı dövme şiddetine tabi tutulursa çekirdek malzemenin çekme gerilmesi yüzeyde oluşturulan faydalı basma gerilmesinden daha ağır basar, bu ise bilyalı dövmeden beklenen etkinin tersi bir etki yapabilir [30].

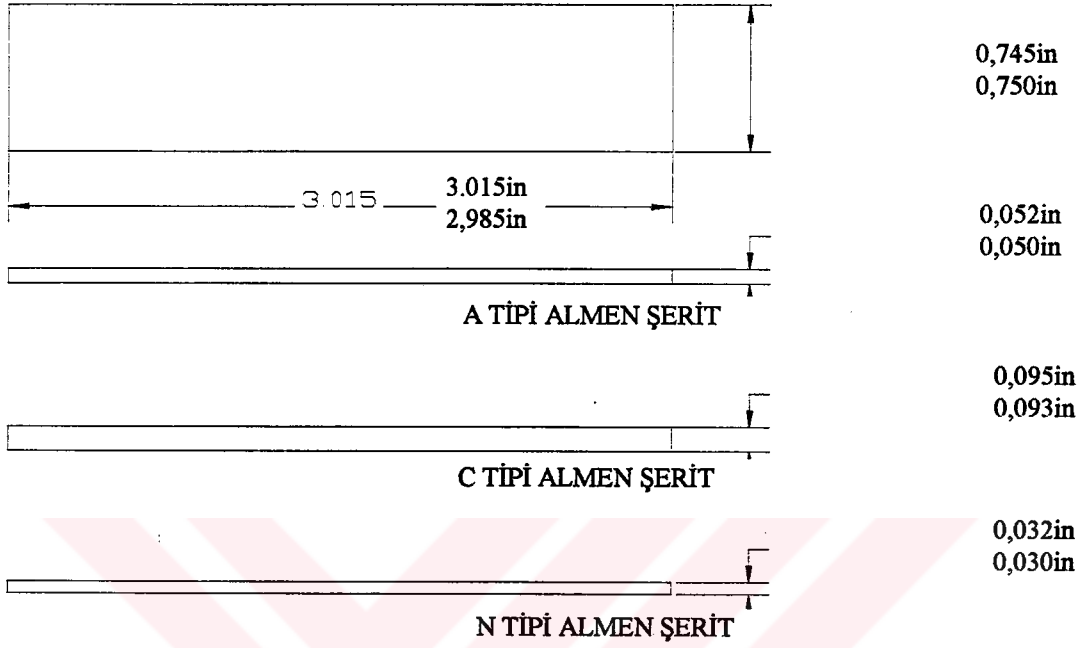
Bilyalı dövme ile oluşturulan basma gerilmeli tabakanın derinliği ise dövme şiddetinin seçiminde bir faktör olabilir.

Bilyalı dövme şiddetinin belirlenmesinde “A, C ve N” olmak üzere üç çeşit Almen test çubuğu kullanılır. Çelik bilya kullanıldığında “A ve C” tipi test çubukları, seramik veya cam bilyalar kullanıldığında “N” tipi test çubuğu kullanılarak bilyalı dövmenin şiddeti belirlenir (Şekil 3.27). Bu üç tip Almen test çubuğunun kalınlıkları ve kullanım alanları farklıdır.

Pratik olarak, ince parçalar için pratik dövme şiddeti, parça kalınlığının %10’undan büyük değildir.

Kalınlık toleransları $\pm 0,001$ ’dir. Bütün çubukların genişlikleri $3 \pm 0,015$ in. ve sertlikleri HRC 44’den 50’ye kadardır. A tipi test çubuğu için yay yüksekliği

0,0062'dan 0,024 in.'e kadardır. N tipi çubuk daha az şiddetli dövme için tavsiye edilir. C tipi çubuk ise daha büyük dövme şiddetleri için tavsiye edilir.



Şekil 3.28. Almen test şeritleri [22].

- N çubukları, . hafif şiddetli dövme için
- A çubukları, . orta şiddetli dövme için
- C çubukları . ağır şiddetli dövme için kullanılır.

Bilyalı dövme şiddeti, bir inç'in binde birinde standart test çubuğunun eğrilik yayı yüksekliğiyle isimlendirilir. Mesela, 10 A şiddeti, 0,010 inç'in Almen A tipi test çubuğunda yay yüksekliğinin ölçüldüğünü gösterir. Ancak son zamanlarda yapılan deneysel çalışmalarda almen yay yüksekliğinin değeri milimetrik olarak da kullanılmaktadır. Mesela, komparatörde okunan 0,28 mm değeri 0,28 mm A şiddetini belirtir.

Değişik ısı davranışları ve metallerin farklı olması, çalışma, ve yükleme farklılıkları sebebiyle dövme şiddetinin bulunmasıyla spesifikasyonların genelleştirilmesi mümkün değildir [15].

3.2.3.8. Sarma oranı

Sarma oranının değişik tarifleri vardır. Bir tanımında, bilyalı dövülen parça yüzeyinde birim alan başına bilya çarpma sayısı yüzeyi sarma olarak tarif edilirken diğer bir tanımda bilyalı dövme ile meydana getirilen tabakanın derinliği, gerilme büyüklüğü ve üniformluğu yüzeyi sarma olarak tarif edilmektedir.[34].

Sarma oranı, yüzeye çarpan bilyaların miktarına bağlıdır ve dövme zamanıyla orantılıdır. Sarma oranının belirlenmesi için Görsel metotlar ve Straub metodu direk metotlardır. Dolaylı metotlar arasında Valentine metodu, X - Ray kırınım metodu kalıcı gerilmenin büyüklüğünü saptamak içindir.

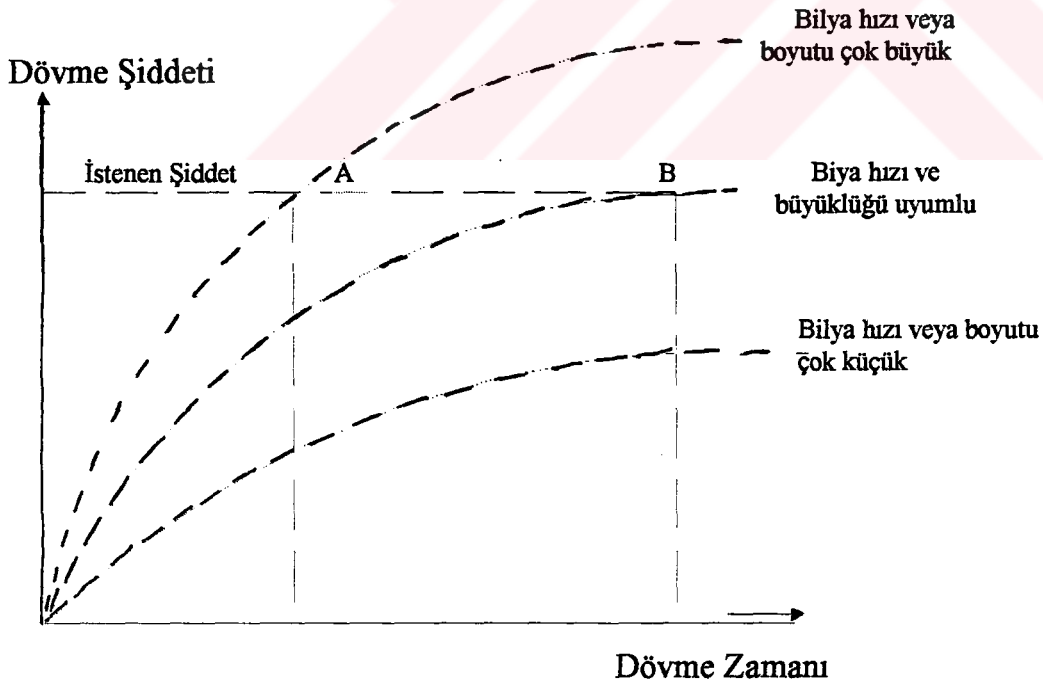
Görsel metotlar, nicel olmamasına rağmen genellikle kullanılır. Bunlar dövülmüş parçanın yüzeyinin, optik büyüteç yardımıyla veya yardımı olmaksızın incelenmesinden ibarettir. Bu metoda sarma'nın değişik yüzdelerinin gösterildiği fotoğraflar serisi eklenir. Diğer bir görsel metot, dövülmüş yüzeyin şeffaf plastik kopyasının hazırlanması ve sarmanın değişik yüzdelere sahip referans kopya ile fotoğrafik projeksiyon yardımıyla karşılaştırılmasından ibarettir.

Straub metodu, bilya akışına cilalanmış yüzeyin maruz bırakılmasından ibarettir, Yarı şeffaf kağıda çentiklendirilmiş alanların kopyası metalografik kameranın yardımı ile 50 kat büyütülerek kopyalanır ve bir planimetreye çentiklendirilmiş alanların ve toplam alanın ölçülmesiyle yapılır.

Valetine metodu, Düşük karbonlu çelikten işlenecek parçanın bir eşi yapılır ve bilyalı dövme tabi tutulur, sonra yeniden kristalleşmesi ve tane büyümesi için birkaç saat tavlandıktan sonra kesiti metalografik incelenirken sarma oranı ile tane büyümesinin sürekliliği arasında bağıntı kurar [23].

Sarma yüzdesi, çentiklendirilmiş alanın toplam alana oranının 100 ile çarpımıyla ifade edilir. Bilyalı dövülen parçalarda %100 sarma veya doyurma yapılmaksızın bilyalı dövme ile yorulma dayanımı karakteristiğinde bir gelişme elde edilemez [34].

Sarma değeri şekil 3.29'da gösterildiği gibi test çubuğu eğriliğinin uygun şiddet okumalarının bir fonksiyonu gibi çizilebilir.



Şekil 3.29. Dövme süresi ve dövme şiddeti ilişkisi [15].

En üstteki eğri bir A zamanında istenen şiddette bilyalanmış numune için gösterilmiştir fakat bilyalama zamanının artmasıyla yükselmeye devam eden eğri uniform olmayan bilyalanmış gerilmeye sebep olur, Yani Sarma yetersizdir. İkinci eğri , bilya büyüklüğü ve hızının doğru orantılı olduğunu gösterirki bu eğride yeterli zamanda etkiye maruz kalmış doygun yüzeyde istenilen dövme şiddetine B'de varılmıştır. En alttaki eğride ise istenilen dövme şiddetine erişilememiştir. Çünkü gerilme oluşumunun derinliği yetersiz kalmıştır [15].

Bilyalı dövülecek parçanın toplam alanı A, plastik girintiler S olmak üzere tam veya dolu sarmanın anlamı $S = A$ ve C, %100'dür. Çok kompleks geometrili ve çok sert metallerin bilyalı dövülmesinde istenen çizelge oranını elde etmek oldukça zordur. Parçada dövülmeyen alanların varlığı tasarımcıya problem oluşturur. Tam olmayan sarma metalik elemanların yorulma performansı üzerinde beklenen etkiyi göstermez [23].

Sarma zamanı; üniform model yüzeyin elde edilmesi için gerekli zamandır. Tam Sarma % 100 sarma için gerekli zaman olarak tanımlanır. Katlı sarmalar %100 Sarma gerektiren zamanın katları şeklindedir, yani % 125 Sarma, tam sarma için gerekli zamanın 1,25 katıdır. % 200 sarma ise tam sarma için gerekli zamanın iki katıdır [23].

3.2.3.9. Bilyalı dövmede sınırlamalar

Bilyalı dövme işleminin uygulaması sınırsız değildir, bilyalı dövülecek malzemenin büyüklüğü, şekli, yüzey şartları, yüzey sertliği gibi bazı sınırlamalara sahiptir. Genellikle önemli sınırlamalar mekanik durumlarla ilgili değildir fakat bilyalı dövmenin faydalı sonuçları elde edilmeyebilir.

İş parçasının şekli ve büyüklüğündeki sınırlamalar: Bilyalama kabinin büyüklüğü dövülecek iş parçasının büyüklüğünde limitasyondur. Bu limitasyon bazı durumlarda taşınabilir bilyalı dövme tezgahı ile giderilebilir. Üzerinde çalışılan işin şekli nadiren bir limitasyondur, küçük yarıçaplı parçalardaki bilyalama ve dış diplerine en küçük uygun bilya büyüklüğü ile sınırlıdır.

Yüzey şartlarındaki sınırlamalar: İş parçası yüzeyinin kirliliği bilyalı dövme için nadiren bir limitasyondur. Su, yağ ve gres bilyayı ciddi şekilde kirletebilir ve dövme kalitesi ve efektifliğini düşürür. Dövülmüş yüzey genellikle parlatılmış yüzeyde bilyalamanın sonuçları gibi yorulma mukavemeti de çok büyük iyileşme sağlar. Dökme yüzeyler aynı zamanda bilyalamayla klasik dövme yüzeyler gibi kullanılabilir.

Sıcaklık sınırlamaları: Karbürize edilmiş parçalar için normal olarak düşük temper sıcaklıkları kullanımı, bilyalı dövme gerilmelerinde ters olmayan etkilere sahiptir. Düşük alaşımlı çelikler, bilyalı dövmeyle oluşturulan basma gerilmelerinde önemli azalmaya rastlamadan önce oldukça kısa zamanda 550-600⁰F'a kadar ısıtılabilirler [23].

3.3. Bilyalı Dövmenin Uygulama Alanları ve Etkileri

3.3.1. Uygulama alanları

Bilyalı dövme işlemi makina parçalarının yorulma ömürlerini artırma amacının dışında faydalı etkilerinden dolayı birçok uygulama alanına sahiptir.

A) Gerilmeli korozyon hasarlanmasını Geciktirme

Malzemede statik gerilmelerin ve korozyonun beraber meydana getirdiği gerilmeli korozyon çatlakaları uygulanan bilyalı dövme işlemi ile etkili bir

şekilde önlenir. Bu uygulama östenitik paslanmaz çeliklerde, yüksek mukavemetli çeliklerde, bakır silikon alaşımlarında, titanyum alaşımlarında, yumuşak çeliklerde belirli ortamlarda çok etkili bir koruma sağlamaktadır. Uygulama yorulma direncini artırmak için yapılan bilyalı dövme işlemine oldukça benzerdir.

Uzay endüstrisinde kullanılan yüksek mukavemetli alaşımlardan yapılmış ince plakaların gerilmeli korozyon ve yorulma direncini artırmada yaygın olarak kullanılır [35].

En önemli hasarlanmanın tane sınırlarına geldiği ısı etkileşmiş bölgelerde ve kaynağa duyarlı östenitik paslanmaz çeliklerdeki taneler arası korozyon özel bir teknik uygulanarak bilyalı dövme işlemi ile engellenir.

Hidrojen sülfid ortamda, özellikle delme operasyonları sırasında yüksek mukavemetli takım çeliğine korozyonun vereceği hasar bilyalı dövme ile engellenir.

Hidrojen kırılabilirliği bilyalı dövme işlemi ile engellenebilir. Daha sonra krom ve nikel kaplama işine geçilir.

Anot olarak kullanılan malzemelerin de ömürleri bilyalı dövme ile artırılır. Böylece daha sert anodik işlemlere gereksinim kalmaz.

B) Bilyalı dövme ile Test

Piston pimlerindeki gümüş kaplama bilyalı dövme ile test edilir. Kaplamanın zayıf olduğu bölgelerde dövme sonucu kabarcıklar oluşur. Dövme işleminden sonra 0.127 mm lik bir tabaka gümüş alınır ve düzgün bir yüzey elde edilir. Bu tür bir işlemde örneğin 0.25 mm kalınlıkta bir kaplamanın testi için gerekli dövme şiddeti 0.025 mm A veya 50 mm kalınlıkta bir kaplama için 0.38 mm A dır. Buradaki kalınlıklar dövme işlemi yapılmadan önceki kalınlıklardır.

Dekarburize edilmiş yüzeyler şartlandırıldıktan sonra kolayca ve ucuzca bilyalı dövme ile tesbit edilebilir. Herhangi bir dekarbürize olmuş yüzey daha derin çukurlar gösterecektir. Böylece yüzeyin kaba görünüşünden bu bölgeler kolaylıkla anlaşılacaktır. Benzer şekilde alevle yapılan bölgesel sertleştirme işlemleride bilyalı dövme işlemi kullanılarak test edildiğinde daha güven verici bir şekilde uygulanabilmektedir.

C) Bilyalı dövme ile şekillendirme

Artık ürün bırakmayan ve malzemeye oda sıcaklığında uygulanabilen bir soğuk yüzey işlemidir. İşlem sırasında yüzeye çarpan herbir bilya tanesi minik birer çekiç görevi yapar, üst yüzeyde elastik bir yayılma ve çarptığı yerde kendisini kalıcı gerilme olarak gösteren plastik bir deformasyon oluşturur. Gerilmenin yüzeyde oluşturduğu kuvvetler ve oluşan yayılma malzemenin dövülen tarafa doğru kabarmasına neden olurlar. Malzeme istenilen konveks eğri elde edilene kadar bilyalı dövme işlemine tabi tutulur. [31].

Bilyalı dövme ile şekillendirme çok kullanılan eğme ve kabartma ile şekillendirme yöntemidir. Bu yöntem havacılık ve uzay sanayiinde geniş bir

kullanım alanına sahiptir.Özellikle uçak kaportalarının istenilen formlara getirilmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntemin avantajları şöyle sıralanabilir.

1. Artık ürün bırakmaz
2. Kalıcı gerilme hem konveks hemde konkav yüzeyde basma gerilmesidir
3. Şekillendirilen malzeme kalınlığındaki küçük farklar dövme şiddeti ayarlanarak ortadan kaldırılabilir.

Form verme işlemi için gerekli dövme şiddeti şekillendirilecek levhanın kalınlığına ve arzulan eğriye bağlıdır. Bu işlemde genelde % 100 sarma oranı istenmez .Ancak bilyalı dövme işlemi ile şekillendirme işlemi yanısıra yorulma ömrüde artırılmak isteniyorsa ilave bir doyurucu dövme işlemi yapılmalıdır.

D) Yüzey işlemleri

Boya yapılmadan önce bilyalı dövme yapılarak boyanın yüzeye daha iyi yapışması sağlanabilir. Alet ve takımlarda bilyalı dövme işlemi ile hem ömür artırılabilir hemde görünüş güzelleştirilebilir. Haddelemede kullanılan silindirlere bilyalı dövme ile istenilen yüzey şekli verilebilir buda üretilen malzemede elde edilebilir.İşık yansıtıcılardaki yansıtma kayıpları bilyalı dövme ile azaltılabilir.Ancak bu tür uygulamalarda bilya yuvarlaklığı önemlidir.Kaplamanın yoğunlaştırılmasında yüzeyin kalitesinin artırılmasında bilyalı dövme işlemi kullanılabilir[24].

E) Diğer uygulama alanları

1. Dökümden sonra parça yüzeyinde kalan küçük gözenekler bilyalı dövülerek kapatılabilir.
2. Döküm porozitleri bilyalı dövme ile temizlenebilir
3. Kaynak bölgelerindeki çekme gerilmesi azaltılır ve kaynağın ömrü artırılabilir. Bu işlem yüzeyde çekme gerilmesi bırakan her türlü mekanik işlemten sonra uygulanabilir ve yüzeyin ömrü artırılabilir.
4. Isıl işlemlerden dolayı çarpılmış olan şaftlar ve diğer parçalar bilyalı dövme ile doğrultulabilir.

3.3.2. Bilyalı dövmenin etkileri

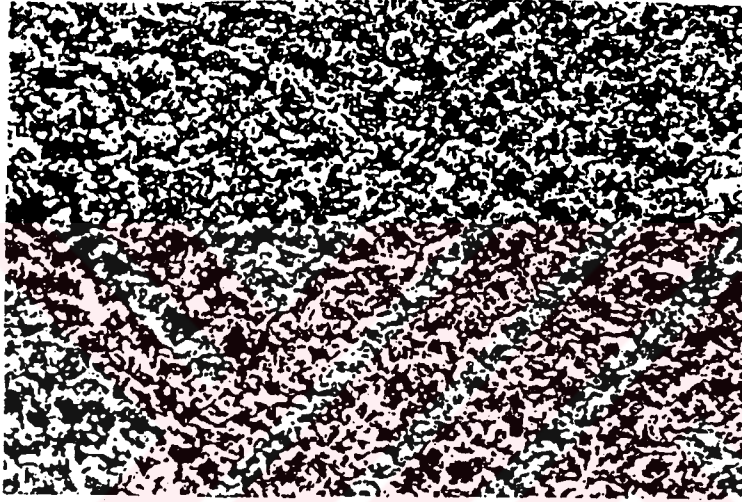
3.3.2.1. Bilyalı dövmenin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Bilyalı dövülen sert malzemelerin yüzey pürüzlülükleri çok az değişiklik gösterirken yumuşak malzemelerin yüzey pürüzlülüğünde artma olur. Bu artış malzemenin ömründe % 10 kadar düşüşe neden olabilir[32]. Yüzey pürüzlülüğü, makina ile işlenen parçayla direk olarak karşılaştırılmamalıdır. Bilyalı dövme bir çok uygulamalarda yararlı olan yönsüz bir yüzey meydana getirir.

Bilyalı dövmeye maruz bırakılan elemanın yüzeyindeki pürüzlülük değeri, bilyalı dövme süresiyle artar ve bir noktada doyuma ulaşır. Bu değer bilyanın büyüklüğüne ve çarpma hızına bağlıdır. Bir örnek verilerek açıklanmak istenirse, bilyalı dövülen parçanın yüzey kalitesindeki değişim şöyle özetlenebilir;

Dövülmeden önce 125 mikrondan daha pürüzlü olan çelik parçaların yüzey kalitesini iyileştirir. Bilyalı dövme 63 mikrondan başlayarak daha iyi kalitede olan çelik parçaların yüzey kalitesini kötüleştirir.

Şekil 3.30'da çelik bilya ile dövülmüş, yüzey sertliği 45 HRC olan çelik malzemenin yüzey karakteristiği görülmektedir [21].



Şekil 3.30. Bilyalı dövülmüş çelik malzeme yüzey karakteristiği [21].

Verilen bir şiddet için, büyük çaplı bir bilya, küçük çaplı bilyadan daha iyi bir sonuç verir ancak daha uzun süre alır ve maliyeti de yüksektir. Örnek olarak, A4340 (50 HRC, 30 mikron) çelik parçası bilyalı dövme sonrası 90 mikron yüzey pürüzlülüğüne çıkar. Ters olarak 125 mikrona makinede işlenmiş çelik parça bilyalı dövme sonrası 90 mikron olabilir [15].

3.3.2.2. Aşınmaya etkisi

Mayuram ve diğerleri [36], En 24 düz dişlisinin yüzey düzgünlüğü ile ilgili olarak yaptığı deneysel aşınma çalışmalarında dört grup deney numunesi hazırlamışlar ve bunlardan 1. gruba bilyalı dövme uygulanmamış, 2. gruba max. 0,22 mm A şiddetinde bilyalı dövme uygulanmış, 3. ve 4. gruba ise alışılmış yollarla ısıtılma işlemi uygulanmış ve sonra 4. gruba max. 0,38 mm A şiddetinde bilyalı dövme uygulanmıştır. Dövme işlemi hava püskürtmeli kabinde SAE 230 bilyası kullanılarak yapılmıştır. Dişlilerin 10^6 devir 850 MPa gerilme seviyesinde aşınma kayıpları mukayese edildiğinde aşağıdaki tablo elde edilmiştir.

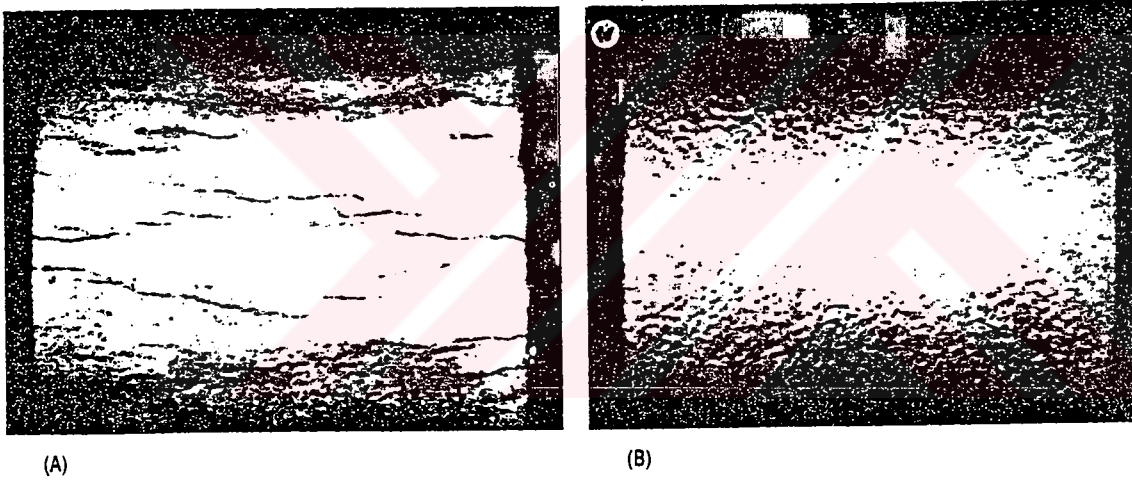
Çizelge 3.5 Bilyalı Dövmenin Aşınmaya Etkisi[36].

	Isıl işlem görmüş		Isıl işlem görmemiş	
	B.Dövülmemiş	B.Dövülmüş	B.Dövülmemiş	B.Dövülmüş
Kümülatif Aşınma	174,6	128,2	91,8	28,8
Relatif Aşınma	1	0,73	0,52	0,16

3.3.2.3. Bilyalı dövmenin gerilmeli korozyona etkisi

Gerilmeli korozyon çatlaması hala bir çok endüstride karşılaşılan bölgesel hasarın bir şeklidir. Gerilme korozyon çatlaması yüzeydeki tekrarlı çekme gerilmeleriyle, kritik bir kesitten içeriye doğru yayılan çatlakların kompleks bir etkileşimi ve sünek bir malzemenin kırılma kopmasıyla neticelenebilen korozyon hücumudur. Gerilme korozyonundan dolayı olan çatlamalar pirinç, paslanmaz çelik, alüminyum, çinko, magnezyum gibi bir çok malzemede olabilir. Gerilme korozyonunu arttıran yüzey çekme gerilmeleri bilyalı dövme yapılmak suretiyle, meydana getirilen kalıcı basma gerilmeleriyle efektif olarak bertaraf edilir [37].

Bir çok korozyon türü vardır ama bunların en önemlisi gerilmeli korozyondur. Gerilmeli korozyon çatlaklarının kalıcı baskı gerilmeli tabakalarda oluşmadığı tespit edilmiştir. U profilli 304 paslanmaz çeligi üzerinde yapılan bir deneyde şu sonuca varılmıştır: Bilyalı dövülmüş ve dövülmemiş iki numune %42 lik $MgCl_2$ çözeltisinde kaynatılmışlardır .Bilyalı dövülmemiş numunede iki saatsonra korozyon çatlakları oluşurken bilyalı dövülmüş numunede 1000 saat sonra bile bu çatlakların oluşmadığı görülmüştür. Bu durum aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir [17].



Şekil 3.31. Bilyalı Dövmenin Gerilmeli Korozyona Etkisi [17]

- A) Bilyalı Dövülmemiş (2 Saat sonra)
- B) Bilyalı Dövülmüş (1000 Saat sonra)

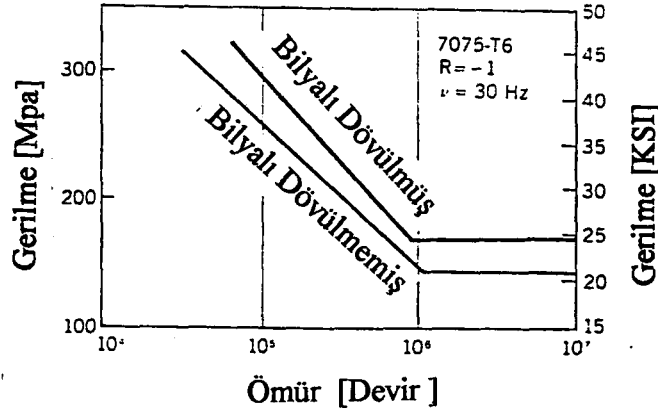
Al Obaid [37], 2205 Dupleks paslanmaz çeliğinin gerilmeli korozyon direncinde bilyalı dövmenin etkisini S130 ve S280 bilyalarını kullanarak incelediğinde, bilyalı dövme tabi tutulmayan numunelerde akma gerilmesinin %55'i seviyesindeki test uygulamalarında hasarın 7,6 saat sonra meydana geldiğini,

bilyalı dövülen numunelerde ise aynı gerilme seviyesinde 335 saat sonra bile hasarın meydana gelmediğini ve kopma mukavemetinde 15 kat artış sağlandığını tespit etmiştir.

3.3.2.4. Alüminyum alaşımlarına etkileri

Alüminyum alaşımlarında yorulma direnci genellikle havacılık ve uzay sanayiinde istenir ve bu bilyalı dövme ile sağlanır. Son yıllarda alalüminyum-lityum alaşımlarının bu sektörde kullanımı yaygınlaştı. Al-Li alaşımları çok az miktarda lityum içerirler . Bu %2-3 civarındadır ve alüminyumun dayanıklılığını artırır ve yoğunluğunu düşürür. Bu avantaj aynı malzemenin özelliklerinden kaybetmeden önemli ölçüde ağırlığını azaltır bu da havacılık ve uzay sanayii için ço önemli bir tercih nedenidir.

Çoğunlukla otomotiv parçalarının silindir başlıkları için kullanılan, düşük yoğunluklu, iyi korozyon dirençli düşük ısı genleşmeli ve iyi dökülebilir bir alaşım olan “Al-12 Si” ötektik alüminyum silikon alaşımlarında silikon fazının alüminyum içerisinde dağılımı alaşım için önemlidir. Dökme Al-12 Si yüzeysel Laser ergitme ile ergitilerek işlenmesi alüminyum içerisinde silikonun çok iyi dağılmasını sağlar. Ancak laser ile ergitme esnasında yüzeyde oluşan çekme gerilmeleri alaşımın servis sırasındaki ömrünü azaltır. Laser ergitme ile oluşan zararlı çekme gerilmeleri bilyalı dövme ile tamamen giderilebilir. Ek olarak, laserle işlenen malzemenin bilyalı dövülmesi küçük silikon çökelmelerinin oluşumuna da imkan sağlar, aynı zamanda sertlik artışı da elde edilir [38].



Şekil 3.32. Bilyalı Dövmenin Alüminyum 7075-T6 Alaşımının Yorulma Ömrüne Etkisi [17].

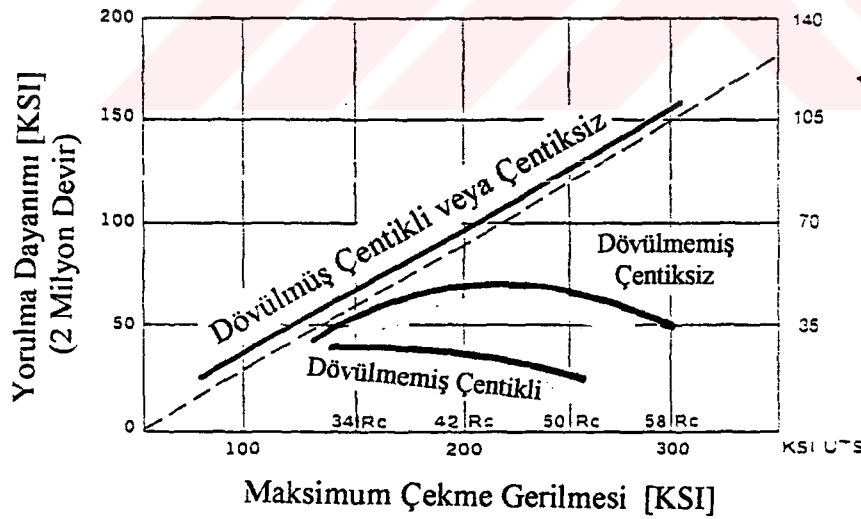
Reynier ve diğerleri [39], uçak endüstrisine yeni giren çok yüksek yorulma, korozyon ve kırılma tokluğuna sahip 2024-T3'ün yerine geçmeye başlayan alüminyum lityum alaşımı 2091'in yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Numuneler önce serviste kullanılmadan önce yapıldığı gibi 520°C'de 20 dakika / su verme / 135°C'de 12 saat yaşlandırma ısıtılmasına tabi tutulmuş ve bunların bir kısmı bilyalı dövülmüştür. 150 - 160 μm derinlikte yapılan kıyaslama sonucu bilyalı dövülen numunelerdeki sertlik ve yorulma mukavemeti artışının %20 kadar olduğu belirtmektedirler. Ayrıca deneyler sırasında X ışınlarının kırınımı yöntemi ile yaptıkları kalıcı gerilme analizlerinde, yorulmaya tabi tutulan numunelerin ilk maruz kaldıkları yükleme sırasında kalıcı gerilmelerde hafif bir gevşeme olduğu ve sonra hızla denge haline ulaştığını gözlemlediler.

3.3.2.5. Çelikler üzerine etkisi

Bilyalı dövme ile yorulma dayanımı düşük sert çeliklerin dayanımları artırılmakta ve bu çelikler yüksek yorulma dayanımı gerektiren yerlerde

kullanılmaktadır. Bilyalı dövme yapılmaksızın en iyi yorulma mukavemeti 40 HRC civarındaki çeliklerde elde edilebilmektedir. Daha yüksek sertliklerde malzeme çentik hassasiyetinin artmasından dolayı yorulma dayanımını kaybeder. Ancak bilyalı dövme işleminin uygulanması ile malzemenin yorulma dayanımı sertliği ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Örneğin 52 HRC sertlikteki bir çelikte bilyalı dövüldükten sonra 101 kg/mm^2 yorulma dayanımı elde edilmiştir. Bununla aynı çeliğin bilyalı dövülmemiş haldeki yorulma dayanımının iki katıdır:

Larsson ve diğerleri [16], Standart bir yay çeliği olan SS 2090'ın yorulma mukavemetinde bilyalı dövmenin etkisini araştırdı. Önce bu çeliği 52-54 HRC'ye sertleştirip temperlediler, sonra bilyalı dövme yaptı. Dövme sonrası yüzeyden 0,3 mm derinlikte yapılan ölçümlerde yaklaşık 100 MPa değerinde basma gerilmesi tespit etti. Bu işlemin yorulma limitini %40 artışla 635 MPa'dan 890 MPa yükselttiği görüldü.



Şekil 3.33. Bilyalı Dövmenin Çentikli ve Çentiksiz Çelik Malzemenin Yorulma Ömrüne Etkisi [22]

Hangbin ve diğerleri [40], karbürize edilmiş 20MnCrTi çelikte bilyalı dövme ile, düşük temas gerilmelerinde temas yorulma ömrünün yaklaşık %30 iyileştiğini ve temas yorulma limitinin ($N = 10^6$ çevrimde) % 6 arttığını, Karbürizasyon ve bilyalı dövme sonrası, numune mikro sertliğinin arttığını, iç kusurların azaldığını, var olan östenit fazının şekil değişimi oluşumuyla martenzite dönüştüğünü ve dislokasyon yoğunluğunun arttığını yaptıkları deneysel çalışmada tespit etmişlerdir. Ayrıca, çekirdek yorulma ömür artışlarının ve çatlak yayılım oranının azalmasının diğer bilyalı dövülmeyen numunelere göre çok daha dikkat çekici olduğunu belirtmektedirler.

Li ve diğerlerinin [41], tavllanmış orta karbonlu alaşımlı çeliğin yüzeysel akma mukavemeti üzerine bilyalı dövmenin etkisi üzerine yaptıkları deneysel çalışmalarda, bilyalı dövme ile oluşturulan iş sertleşmesi ile çeliğin yüzey akma mukavemetinin 400 MPa arttırılabildiğini ve hatta bilyalı dövülmüş yüzeyin yüzey akma mukavemetinin malzemenin maksimum çekme mukavemeti değerini aştığını belirtmektedirler

Çizelge 3.6. Bilyalı Dövmenin Çeşitli Makina Elemanlarına Etkileri [34]

Makina Parçaları	Dövme şiddeti Ve bilya büyüklüğü	Deney tatbiki	Dövülmemiş iş (MPa)	Dövülmüş (MPa)	Artış (%)
Helisel baskı yayları 3-6 mm çaplı tel, alaşımlı çelik	10 A S 160	10^7 Çevrim sayısını verecek gerilmeler	480 Mpa	795	60
Traktör şaftları 76 mm çaplı 50 HRC değerinde	23 A 230	0 -780 Mpa burulma gerilmesi	1700 çevrim	80 000 çevrim	4700
825 MPa çekme dayanımlı 6 mm çaplı çentikli çelik numune	50 Psi hava basıncı 310	7.10^6 çevrim limitinde dönel eğmeli	258 Mpa	428	65
%26 Cr, %4 Ni, %0,2 Mo ihtiva eden 4.5 mm çaplı çekme numunesi	8 A 230	PH= 2 olan 280 Mpa NaCl solüsyonunda Eksenel çekme, 10^7 tekrardaki yorulma dayanımı	280	450	60

3.3.2.6. Bilyalı dövmenin nikel esaslı süper alaşımların yorulmasına etkisi

Nikel esaslı süper alaşımların uçak motor parçalarının imalatında kullanımı yaygındır. Kumar ve diğerlerinin [42] bu alaşım üzerinde yaptıkları çalışmada, bilyalı dövme zamanı arttıkça yüzeyde kalıcı basma gerilmesi artmış, optimum dövme süresi 20 dakika bulunmuş ve bu sürenin üzerinde yapılan dövmenin,

kalıcı basma gerilmesindeki gelişimi dengeleme eğiliminde olarak daha çok yüzey pürüzlülüğü meydana getirdiği, bu sebeble dayanma limitinde küçük düşmeler olduğunu tespit etmişlerdir.

Cao ve diğerlerinin [43], bilyalı dövülmüş nikel esaslı süper alaşımda yaptıkları araştırmalarda ise 550° C ve 650° C'deki termal şartlarda, yüzeye yakın tabakada ilk bir saatte kalıcı gerilmelerin hızlıca düştüğünü ve sonra dengeleştiğini, bunun bilyalı dövme ile oluşturulan kristal kusurların düzenlenmesi ve giderilmesiyle yaklaşık 200 MN/m² değerinde dengeli bir gerilme elde edilmesiyle beraber olduğunu, 650° C'de termomekanik şartlarda ise, ilk bir saatte kalıcı gerilme profilinde yüzeyin altındaki tabakada yaklaşık 500 MN/m²'lik bir azalma olduğunu, bunun tekrarlı yüklemeye oluşan plastik deformasyondan dolayı olduğunu ve gerilme giderilmesi davranışının, ilk yüklemeler sırasında meydana gelen elastik “gerilme - şekil değiştirme” davranışı tarafından karakterize edilebileceğini belirtmektedirler.

Li ve diğerlerinin [44] yaptığı araştırmada, Fırçalı elektroliz yöntemi ile yapılan nikel kaplamadaki iç gerilmelerin, X-Ray metoduyla yapılan incelemesi sonucu çekme gerilmesi olduğu görüldü. İç çekme gerilmelerin varlığında kaplamada çatlak oluşabilir ve bu çatlak alt tabakalarda gerilme yığılması oluşumuna sebep olur. Eğer bu gerilme şiddeti çeliğin yorulma başlangıç değerine ulaşırsa çelikte çatlak başlar. Fırçalı elektroliz yöntemi ile kaplanmış çeliğin yorulma mukavemetinde azalma, kaplama iç kusurları ve iç gerilmelerin bileşimi ile oluşur. Kaplanmış çeliğin şekil almasında bazı azalmalar olmasına rağmen fırça elektrolizle nikel kaplamayla orta karbonlu çeliğin çekme özellikleri fazla etkilenmez. Li [45] yaptığı çalışmada, esas azalmanın yorulma mukavemetinde olduğunu ve bu azalmanın, 0,015'den 0,020'ye kadar olan gerilme düzleminde % 12,3 ve % 28,6 arasında olduğunu tespit etmiş ve bilyalı dövmenin fırçalı

elektroliz yöntemi öncesi veya sonrası yapılmasıyla oluşturulan basma gerilmesiyle, nikel tabakasında çatlağın ilk yayınıma karşı direnç sağlandığını ve yorulma mukavemetinde belirgin bir şekilde arttığını gözlemledi.

Takasugi ve diğerleri [46], çevresinden hidrojenin serbest bırakılmasından dolayı $Ni_3(Si,Ti)$ alaşımlarının kırılganlığında yüzey tabakasının etkisini bilyalı dövülmüş numuneler kullanarak oda sıcaklığında çekme testleriyle araştırdılar. Bilyalı dövülmemiş $Ni_3(Si,Ti)$ alaşımları vakum ortamında yüksek çekme uzaması gösterirken hava ve damıtılmış suda kırılganlıkları belirginleşti. Bu alaşımlar bilyalı dövüldüğünde, çekme uzamasının azalmadı, yüzeydeki deformasyon tabakası çevresindeki hidrojen dekompozisyonundan dolayı kırılganlık azalmasını etkiledi. Yüzey bölgesindeki kırılma modu taneler arasından taneler içi kırılmaya doğru değişti. Takasugi ve arkadaşları, yüzey bölgesindeki iç gerilmelerle ve dislokasyonlarla (veya boşluklarla) hidrojen atomlarının birbirini etkilemesinden dolayı bilyalı dövmenin $Ni_3(Si,Ti)$ alaşımlarında faydalı olduğunu bildirmekte ve tavsiye etmektedirler.

3.3.2.7. Titanyum alaşımları üzerine etkileri

Sridhar ve diğerleri [47], ticari titanyum alaşımı olan IMI-685 ve IMI-318 üzerinde yaptıkları deneysel çalışmada, yüzey tabakasındaki gerilme dağılım profili, bilyalı dövme sonrası basma oldu, enine kalıcı gerilme σ_T , uzunlamasına kalıcı gerilme σ_L 'den daha büyük bulundu. IMI-685'te kalıcı gerilme profilinin zirve noktası yüzeyde bulunurken, IMI-318'te yüzey altındaki tabakada bulundu. Farklı olarak, IMI-685'in IMI-318'le karşılaştırıldığında daha düşük şekil değişim oranına sahip olduğu izlendi.

3.3.2.8. Uçak ve helikopter kanat malzemelerinin yüzey hasarlarına Etkisi

Uçak ve helikopter pervane kanatları diğer uçak parçalarında olduğu gibi değişken yüklere maruz kalırlar. Bundan dolayı diğer mekanik özelliklerden daha ziyade yorulma davranışı ön plana çıkmaktadır. Çalışma esnasında yabancı partiküllerin yüksek hızla pervane kanatlarına çarpması yüzeyde gerilme yığılmalı mikro bölgeler meydana getirir. Bu bölgeler yorulma ömründe azalmaya neden olacaktır. Bu zararlı etkiyi ortadan kaldırmak için kanatlarda faydalı kalıcı gerilmeler meydana getirilmelidir [48].

3.3.2.9. Yayların yorulma ömrü üzerine etkisi

Yaylarda kalıcı gerilme meydana getirme metotları, ısıtma işlemleri, bilyalı dövme ile soğuk ön şekillendirme olarak sayılabilir. Kural olarak yaylarda meydana getirilen kalıcı gerilmeler, eğer uygun işarette ise, yüksek gerilme değerlerinde kullanılabilme imkanı doğurur. Bu durumda yaylarda önemli ölçüde avantaj ortaya çıkmaktadır. Zira yaylarda enerji absorbe etme kapasitesi çalışma gerilmesinin karesi ile artmaktadır.

Diğer makina elemanlarında olduğu gibi bilyalı dövme işlemi uygulanabilecek yayların boyutlarında da bir sınırlama mevcuttur. Dövme işleminden en büyük faydayı sağlayabilmek için işlem parametrelerinin iyi bilinmesi gerekir. Helis yaylarda tel çapının 0,75 mm değerini geçmesi halinde bilyalı dövme işlemi başarı ile uygulanabilmektedir. Ancak her bir yay çeşidi ve malzeme cinsi için optimum dövme şartları belirlenmeli ve uygulama bu şartlarda olmalıdır.

Değişken yüklemenin görüldüğü tekrarlı bir çevrimde yer alan yayların görevlerini yerine getirirken uzun yorulma ömrüne sahip olmaları istenir. İçten yanmalı motorlarda supap yayları ve diesel motorlarda enjektör yayları bu sınıfta incelenir. Bu tür yayların tasarım esasları belirlenirken çalışma esnasında ortaya çıkan gerilmeler, gerilme aralığı, değişken gerilmenin değişme şekli, çevre çalışma şartları ile bilyalı dövme gibi özel yüzey işlemleri esas alınır [49].

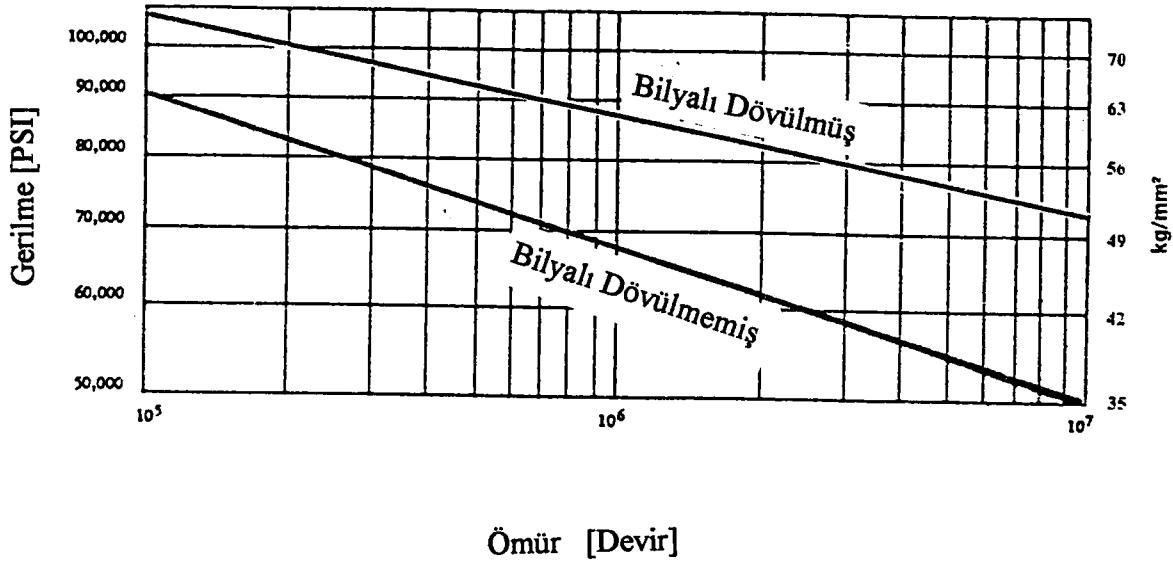
3.3.2.10. Dişli ömürlerine etkisi

Güç iletim dişlilerinin yüzeyleri karbürizasyonla veya diğer yüzey sertleştirme metotlarıyla sertleştirilir. Bunun sebebi sertleştirilen yüzeyde kalıcı basma gerilmeleri üretmektir. Sert tabakanın ve kalıcı gerilmelerin varlığı dişli mukavemetinin yükselmesinde etkilidir [50].

Inoue ve diğerleri [40], karbürizasyonla sertleştirilmiş SCM 415 ve SCM 420 dişlilerinde bilyalı dövmenin etkilerini araştırdıklarında, bu dişlilerin yüzey sertliğinin yaklaşık 80 HV, kalıcı gerilmelerinde yaklaşık 130 MPa daha arttığını ve yorulma mukavemetinde 300 MPa geliştiğini deneysel çalışmalarla göstermişler ve bunu Şekil 3.33'deki yorulma grafiğinde göstermişlerdir.

Tobe ve diğerleri [51], karbürizasyonla sertleştirilmiş SCM 420 düz dişlisi için yaptıkları yorulma deneylerinde yüzeyde kalıcı gerilmelerin ve sertliğin artmasıyla daha yüksek yorulma mukavemeti değerleri elde etmişlerdir.

Lawerenz [52], karbürizasyonla sertleştirilmiş 4118 dişlisinin yorulma mukavemetinin bilyalı dövme ile %29 geliştiğini, Hisamatsu ve Kinazawa[53] ise %10 kopma ihtimali için yorulma mukavemetinin bilyaların üniform olmayan vuruşlarından dolayı ömürlerinde %48 gelişme olduğunu belirtmektedirler.



Şekil 3.34. Karbürize Edilmiş Dişlilerin Yorulma Ömrüne Bilyalı Dövmenin Etkisi [17].

3.3.2.11. Yağ pompa kollarının mekanik özelliklerine etkisi

CYG 20/8000 tipi yağ pompa kollarına orta frekanslı hızlı nüfuziyetli indüksiyon ısıtmayla su verme ve temperleme ısı işlemi sonrası yapılan bilyalı dövme işlemi ile, yüzeyde ve yüzeyin hemen altında kalıcı basma gerilmesi oluşturularak akma mukavemeti (σ_s) artışı sağlanır. Akma mukavemetinin artması dövülen tabakada kristal kayma deformasyonunu zorlaştırır, bu yorulma çatlak başlangıcı için uygun olmayan bir durumdur. Yüzeyde ve yüzey altında kalıcı basma gerilmesinin artışı, dış çekme gerilmelerinin etkilerini yok ettiğinden, yorulma çatlağı başlangıcı ertelenmiş olur. Mekanik özelliklerin, bilhassa çekme yorulma ömrünün, indüksiyonla hızlı ısıtma (su verme ve temperleme) sonrası bilyalı dövmeyle iki kat daha arttığı tespit edilmiştir. Orta frekanslı indüksiyon ısıtma teknolojisi ile klasik elektrikli ısı işlem fırınlarına göre sadece ideal mikroyapı

eldesi değil hemde daha az yüzey dekarbürizasyonu ve daha az elektrik sarfiyatı elde edilir [54].

3.3.2.12. Toz metalürjisi parçalarına etkisi

Sinterlenmiş parçaların dinamik özellikleri bilyalı dövme ile iyileştirilebilir. Bu iyileşmenin nedeni parça yüzeyinin sertleşmesi ve yüzeyde oluşturulan kalıcı baskı gerilmeli tabakadır. Optimum şartlarda yapılan bir bilyalama işleminin sinterlenmiş toz metal alaşımların nihayi dayanımlarını %22 oranında artırdığı ıspatlanmıştır[17].

Toz metalürjisi ile üretilen parçalar aynı şekilli diğer parçalardan daha hafif ve daha ucuzdurlar ve otomotiv endüstrisinde önemli kullanım alanları vardır. Düşük maliyetli T/M parçalar sinterleme sonrası sık sık bazı kalıcı gözenekler gösterirler. Bu gözenekler çekme mukavemetini azaltırken bazı durumlarda çatlak yayılımını durdurduğundan yorulmada faydalı olabilirler [55].

Yüksek tekrarlı gerilmelere maruz olan T/M parçaların kullanımını artırmak için yoğunlaştırma sonrası bir işleme gerek vardır. Dövme ve soğuk pres uygundur fakat pahalı bir tercihtir. Daha az külfetli olan mevcut yaklaşım, en kritik bölgelerle yoğunlaştırmayı sınırlı tutmaktır. Potansiyel işlemler, Laser ergitme, Laserle şok işleme, bilyalı dövme ve karbonitrürlemedir.

T/M parçalarda gözenek miktarı düştükçe yorulma dayanımının yanı sıra diğer bütün mekanik özellikler de iyileşmektedir. Bilyalı dövülen T/M parçalarda yüzey tabakasındaki kalıcı gözenek miktarının azalması neticesinde mekanik özellikleri bilhassa yorulma mukavemeti önemli derecede artmaktadır [19].

Chardin ve diğerleri [27], Distaloy AE'den yapılmış T/M parçası üzerinde bilyalı dövmenin etkisini araştırdılar. Bu çalışmada, T/M parçada dövme sonrası yüzeysel yoğunlaşma elde edilmiş ve bilya çapından bağımsız olarak yüzeysel porozitenin 2 v/o dan daha aza indirildiğini, ortalama yüzey pürüzlülüğünün 2 μm 'nin altına indiğini gözlemlediler. Ayrıca yüzeyde kalıcı basma gerilmesinin yükseltilmesi ve yüzey pürüzlülüğünün kontrolü ile yorulma davranışının geliştiğini belirtmektedirler.

Chernenkoff ve diğerleri [56], toz demirden üretilmiş bağlantı rotlarının yorulma mukavemetinde bilyalı dövmenin etkisi üzerine yaptıkları deneysel çalışmalarda, bilyalı dövülmemiş numunelerde 262 MPa olan yorulma mukavemetinin maksimum 407 MPa'a yükselerek yaklaşık %55'lik bir gelişme sağlandığını, optimum dövme şiddeti olarak bulunan 15-20 A şiddeti kullanıldığında normalleştirilmiş toz demir bağlantı rotlarının dövülmesinde %90 güvenilirlik seviyesi için yorulma mukavemetinde %27 gelişme sağlandığını ancak 15-20 A şiddetinden daha yüksek dövme şiddetlerinin yorulma mukavemetinde düşüşler meydana getirdiğini belirtmektedirler.

Sarıtaş ve diğerleri bilyalı dövmenin toz metal çelikler üzerine etkisini araştırdıkları çalışmada demir tozundan üretilmiş bir çelik malzeme için %57 lik bir ömür artışı, Fe+2%Cu malzeme için de %31 lik bir ömür artışı elde etmişlerdir[33].

3.3.3. Yüzey katın kalitesine etki eden faktörler

Bilyalı dövme işleminde yüzey kat elastik ve plastik deformasyona maruz kalır. İşlem sırasında bilyaların çarpma noktalarında bir miktar ısı oluşur. Bu olaya

bir kaç faktör etki yapar. Bunun sonucunda fiziksel kimyasal gerilme deformasyon durumuna bağlı olarak parçanın yüzeyinde temel malzemedan farklı özelliklere sahip bir tabaka oluşur. Bununla ilgili olarak yüzey katın kalitesi 3 gurup faktörle değerlendirilir[57].

1. Yüzey katın pürüzlülüğü
2. Yüzey katın fiziksel durumu
3. Yüzey katın gerilme deformasyon durumu

Genellikle yüzey katın kalitesi 20 den fazla faktörle degerlendirilir.

Yüzey katın kalitesine etki yapan bütün faktörleri göz önüne almak problemin çözümünü karmaşık ettiğinden çok zaman bu faktorlerin etkisiyle oluşan sonuç faktorler kullanilir. Bilyalı dövmede bütün bu faktörleri etkileyen parametre bilyalı dövme nin şiddetidir.Bilyalı dövmenin şiddeti değıştikçe yüzey katın gerilme deformasyon durumu ve pürüzlülüğü değışir[57].

Deneyler göstermiştir ki işlem sırasında oluşan ısı yüksek olmadığından malzemenin bileşimindeki faz yapısına etki etmiyor.ve yüzey katın plastik deformasyon durumu bilyalama şiddetinden oluşan kuvvetlerden oluşur.

Kaynaklardan bellidirki kuvvet faktöründen oluşan gerilmeler basma gerilmeleridir ve bu da işlenen malzemenin yorulma ömrünün yükselmesine tesir eder.

Deformasyon derecesi yükseldikçe malzemenin plastiklik özellikleri düşer deformasyona karşı mukavemeti yükselir aynı zamanda dislokasyonların sıklığı,

gözeneklerin konsantrasyonu yükselir ve bunun sonucunda toz malzemenin tanelerinin dokuları birbirlerine göre durumları ve boyutve biçimleri değişir.

Gerilmeleri ve deformasyonu tayin etmek için kullanılan metotlar :

Bilindiği gibi makina elemanlarındaki gerilmeler deformasyona uğramış alanın sınırları ile ilgili olarak aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir[57].

1. Birinci sınıf gerilmeler :Parçanın boyutları ile karşılaştırılabilen gerilmelerdir. Bunların yönelimi parçanın biçimi ile ilgilendirilebilir. Bu gerilmelere makrogerilmeler veya sadece gerilmeler denilir.
2. İkinci sınıf gerilmeler : Metal malzeme bünyesinin tane yapısında veya birleşik bir kaç tane yapısında oluşan gerilmelerdir. Bunlara mikrogerilmeler denilir.
3. Üçüncü sınıf gerilmeler : Metal malzemesinin atom kafesindeki çarpıtmalar sonucunda oluşan ve atom kafesinin bünyesi ile karşılaştırabilen gerilmelerdir. Bunlara submikroskopik gerilmeler denilir

Birinci sınıf gerilmelere makro gerilmeler ve ya sadece gerilmeler denilir. Bu gerilmeleri tayin etmenin çeşitli mekanik, optik, galografik v.s. yöntemleri mevcuttur.

Kalıcı gerilmelerin mekanik yollarla tayin edilmesi parçanın gerilmeler oluşmuş bir kısmından çıkarılan bir numunenin kalan parçanın gerginlikli durumuna eşit ve zıt yönlü gerilmeler oluşturur ve parçayı deformasyona uğratmış olur.

Çıkarılan bu numune üzerindeki gerilme parçaya çıkarılan gerilmeye eşit ve zıt yönde etki yaapar ve onu deformasyona uğratar. Bu yöntemle istenilen derinlikteki gerilmeleri tayin etmek mümkündür. Bu yöntemin dezavantajı ise gerilmesi tayin olunan parçadan kesilen numuneler sonucun da parçanın bozulmasıdır[57].

İkinci ve üçüncü sınıf gerilmeler Röntgen metotları ile ölçülürler. Bumetodun temeli deformasyon sonucunda malzeme atomları arasındaki mesafelerin değişmesine dayanır. İç gerilmeler sonucunda malzemenin atomları arasındaki mesafe değişir. Bu değişme röntgen metotları kullanılarak tespit edilir. Röntgen metotlarının avantajı parçadan numuneler kesmeden gerilmelerin tayin edilmesidir. Dezavantajı ise bu yöntemle tayin edilmiş makro (birinci sınıf gerilmeler) ve mikro (ikinci üçüncü sınıf gerilmeler) gerilmelerin birbirinden çok zor ayırd edilebilmeleridir. Bundan Başka bu yöntemle gerilmeler yalnız yüzey düzleminde ve 5-10 mikron derinlikte tayin edilebilmesidir. Daha derinlerde gerilme ölçmek için yüzeyin yeniden parlatılması gerekir, bu da ölçülecek gerilmelerin büyük hatalarla tayin edilmesine neden olur[57].

Kaynaklardan görüldüğü gibi bilimsel araştırmalarda en fazla kullanılan metotlar mekanik ve röntgen metotlarıdır.

Gerilmeleri hesap yolu ile tayin etmek için bu gerilmeleri oluşturan olayların belli olması gerekir.ve buda geleneksel bir yöntem olmakla beraber çok sayıda deneylerin yapılmasını gerektirir

Yüzey katın pekleşmesi pekleşme derinliğiyle, pekleşme derecesi ve pekleşme gradyanı ile belirlenir. Bu faktörler deformasyona uğratılmış bölgenin

mikrosertliğinin ölçülmesi Röntgen ışını ile mikroyapı analizi, sertlik ölçen cihazın indentörünün birkaç değişik kuvvetle pekleşmenin ölçüldüğü alana batırılması, pekleşmiş alandan ince katlar çıkarıp daha derindeki sertliğin ölçülmesi ile, metalografik yöntemle yani karbür fazının belirlenmesi v.s yöntemlerle belirlenir.

Kaynakçalardan belli olurki deformasyona uğramış bölgenin deformasyon niteliklerini tayin etmek için en önemli yöntem parçadan küçük açı ile numuneler kesip kesit alanının mikro sertliğini tayin etmektir[57].



4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Giriş

Bu çalışmada önce T/M yöntemi ile Fe+ %2 Cu + %0.5 C toz metal çelik malzeme üretildi. Daha sonra biriket haldeki malzemeden tornada işlenerek yorulma deney numuneleri elde edildi. Bu numunelerden bir guruba hiçbir işlem yapılmadan direkt olarak yorulma deneyi uygulanıp malzemenin yorulma ömrü tespit edildi. Diğer numuneler ise Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Laboratuvarında bulunan ve isteğe bağlı olarak sifon indüksiyon veya yerçekimi metoduna göre çalışan bilyalı dövme makinasında sifon indüksiyon metodunda 20A, 25A, 25A %200ve 35A dövme şiddetlerinde bilyalı dövme işlemine tabi tutuldular ve yorulma ömürleri tespit edilerek işlemin malzemenin yorulma ömrüne etkisi incelendi, malzemede maksimum yorulma ömrünü verecek optimum bilyalı dövme işlem parametreleri belirlenmeye çalışıldı. Ayrıca Bilyalı dövülmüş ve dövülmemiş bir grup malzeme de plastiğe gömülüp mikroyapı ve gözenek dağılımı incelemeleri için hazırlandı ve fotoğrafları alındı.

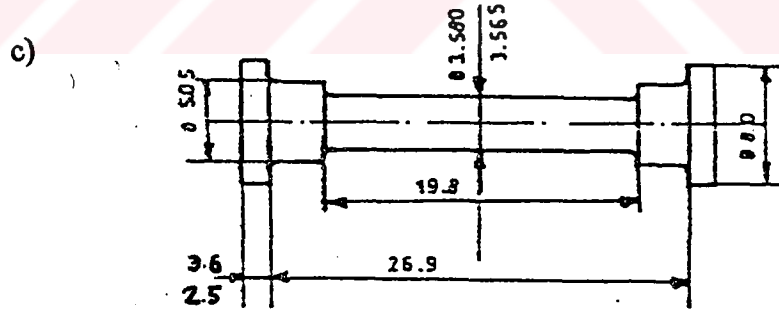
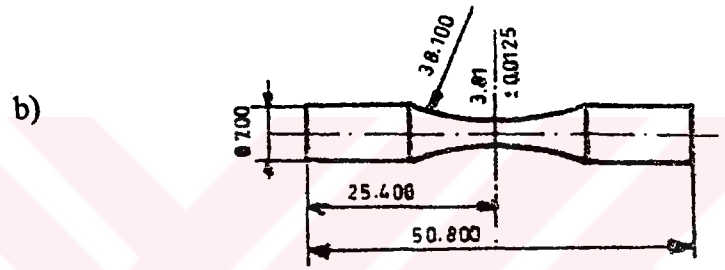
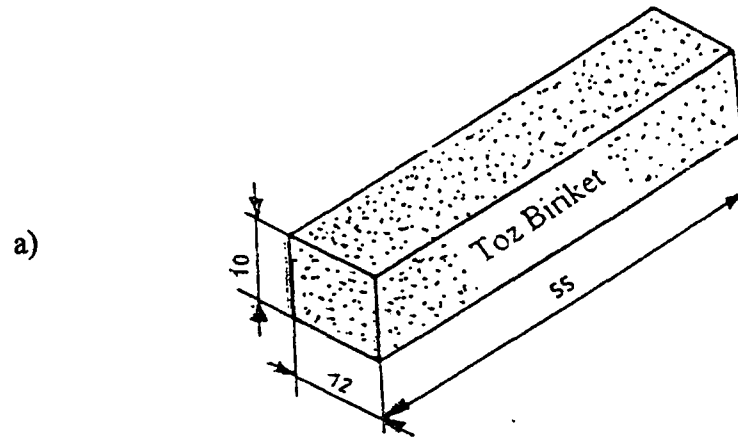
4.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

4.2.1. Deneylerde kullanılan malzemeler

Bu çalışmada kullanılan malzemenin temel bileşeni olan demir tozu Höganäs ASC 100.29 dır. Yağlayıcı olarak ağırlıkça % 0.8 Zn Stearat toz karışımına ilave edilmiştir. %2 Cu ve %0,5 grafit ilave edilmiş toz karışımı çift taraflı konik karıştırıcıda 30 dakika süre ile karıştırılmıştır.

4.2.2. Deney numunelerinin hazırlanması

Homojen olarak karıştırılan toz karışımı tek parçalı kalıba bir numune için gerekli miktar kadar doldurularak bir preste tek etkili olarak sıkıştırılmak sureti ile biriketler oluşturulmuştur. Oluşturulan biriketlerin şekli ve boyutları şekil 4.1’de gösterilmektedir. Biriketlerin yoğunluğu $\rho = 6.9 \pm 0.1 \text{ Mg / m}^3$ elde edilecek tarzda 40 tonluk bir pres basıncı denemek sureti ile ayarlanmış ve biriketlerin boyutları 0.01 mm ve ağırlığı 1 mg hassasiyette ölçülerek yoğunluk değeri sabit tutulmaya çalışılmıştır. Biriketler daha sonra 1120 °C sıcaklıkta kırılmış amonyak gazı atmosferinde 30 dakika süre ile sinterlenmişlerdir. Sinterlenmiş biriketlerden yorulma deney numuneleri torna tezgahında işlenerek hazırlanmışlardır. Yorulma numunelerinin hazırlanması esnasında talaş derinliği küçük tutularak aşırı zorlamadan kaçınılmıştır ve böylece tornalama işleminin numune yüzeyinde bırakabileceği artık gerilmeler minimuma indirilmiştir. Bütün yorulma deney numunelerinin test bölgeleri aksel doğrultuda sırasıyla 180, 240, 400, 600, 1200 numara zımparalarla zımparalanarak parlatılmışlardır. Sinterlenmiş halde malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek için biriketlerden çekme numuneleri hazırlanmış ve çekme deneyi yapılmıştır. Üretilen toz biriketlerin, çekme numunelerinin ve yorulma numunelerinin şekilleri aşağıda şekil 4.1’de verilmiştir. Yorulma numunelerinin 80 adedine bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır.



Şekil 4.1. a) Sinterlenmiş Toz Biriket

b) Yorulma Numunesi

c) Çekme Numunesi şekilleri

4.3. Deneysel Çalışmalar

4.3.1. Mekanik deneyler

Sinterlenmiş T/M biriketlerin sertliğini belirlemek üzere Rockwell sertlik ölçme cihazında B sıkalası kullanılarak sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sinterlenmiş biriket malzemenin uzun kenarlarının çevrelediği dört yüzeyinden ve her yüzeyden en az üç adet olmak üzere sertlik ölçümü yapılmış ve aritmetik ortalamaları alınmıştır. Numunelerin sertlik dağılımları istatistiki olarak tasnif edilerek sertlik değeri bulunmuştur. Sertlik değerinin Birinell karşılığı tablolardan bulunmuştur.

Çekme deneyleri masa tipi 2 ton kapasiteli çekme cihazında yapılmış ve çekme, kopma dayanımları ile % kopma uzaması değerleri tespit edilmiştir. Üç ayrı çekme numunesi kullanılmış, sonuçların ortalamaları alınarak mekanik özellikler belirlenmiştir. Deney esnasında çekme hızı sabit tutulmuştur.

- Mekanik deney sonuçları

Deneylerden elde edilen malzemenin sinterleme sonrası sertlik değeri, çekme dayanımı, % kopma uzaması, gibi mekanik deneylerin sonuçları aşağıda çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Toz Metal Çeliğin Mekanik Özellikleri

Ortalama sertliği	75 BSD
Çekme dayanımı	324 Mpa
% kopma uzaması	11.6

4.3.2. Bilyalı dövme işlemleri

Torna tezgahında şekillendirilmiş ve zımparalanmış yorulma numuneleri, basınçlı hava kullanarak sifon indüksiyon metodunda dövme yapan bir bilyalı dövme makinasında dövülmüşlerdir. İstenilen dövme şiddetlerinin yakalanabilmesi için Almen A şeritleri kullanılmıştır. S 230 bilya kullanılarak, Almen A tipi şeritler dövülmüş ve % 100 doyurma oranı için istenilen dövme şiddetlerinin yakalanabileceği dövme süreleri tespit edilmiştir. Yorulma numuneleri guruplarına ayrı ayrı sırasıyla 20 A, 25 A, 25 A % 200 doyurma ve 35 A dövme şiddetleri uygulanarak dövülmüşlerdir. Dövme esnasında numuneler tek yönlü döner bir tutucuda 20 d/d hızla döndürülmüşlerdir. Bilyaların fırlatma açısı 90° ve nozul numune arası açıklık 100 mm olarak sabit tutulmuştur. Dövülmüş numunelere ilave herhangi bir işlem uygulanmamıştır. Malzemeye uygulanan bilyalı dövme işleminin parametreleri çizelge 4.2’de verilmiştir.

4.3.2.1. Tezgah özellikleri

Bilyalı dövme işleminde kullanılan bilyalı dövme tezgahı Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde imal edilmiştir. Tezgah aşağıdaki özelliklere sahiptir:

1. Tezgah özel olarak dış yüzeylerin dövülmesi için tasarlanmıştır.
2. Nozulun eksenler üzerindeki hareketi mekanik tutucular yardımı ile yapılır.
3. Tezgah boyutları 1000×1000×1000 mm., iş parçası kapasitesi standart yorulma deney numunesi boyutlarında ve daha büyük iş parçası modifikasyonuna müsaittir.
4. Nozul hava basınç değerleri, 0 - 10 bar.
5. İşparçası tutucusu tek yönlü döner tutucudur ve devir sayısı 0-100 d/d arasında ayarlanabilmektedir.
6. Elektrik bağlantısı 220 volt şehir cereyanı ve aydınlatma sistemi için 2×20 Watt'lık floresan ampul kullanılmıştır.
7. Kabinin içerisinde toz sızdırmazlığı ve gürültü absorpsiyonu sağlanmıştır
8. Makina hem yerçekimi indüksiyon hemde sifon indüksiyon modunda çalıştırılabilecek şekilde imal edilmiştir.
- 9 Tezgahta bilya ayırıcı ünite, Bilya yükseltici ünite bulunmamaktadır. Yerçekimi indüksiyon metoduna göre dövme yaparken belirli periyotlarla haznede toplanan bilyaların tezgah üzerinde bulunan siloya aktarılması gerekmektedir. Ancak sifon indüksiyon metoduna göre dövme yapılırken böyle bir gereksinim yoktur

Bilyalı dövme işleminin yapıldığı makina basit olarak üç kısımdan oluşmaktadır.

- i) Dövmekabini
- ii) Bilya toplama haznesi
- iii) Kontrol aparatları

4.3.2.2. Bilyalı dövmek öncesi yapılacak işlemler

- Bilyalı dövülecek parça operasyon öncesi gerekiyorsa, onarılmış, ısıt işlemler görmüş, talaşlı imlattan geçmiş, taşlanmış, parlatılmış, çapakları temizlenmiş ve keskin köşeleri giderilmiş olmalıdır.
- Magnetik toz ve fleorasan - penetrasyon'la denetleme gerektiğinde bilyalı dövmek öncesi tamamlanmalıdır. Kabin içinde işparçası rahatlıkla görülebilmelidir.
- Parça, kir, pas ve yağ'dan temizlenmelidir. Dövmek esnasında parçadan kopacak ve bilyaların kirlenmesine neden olabilecek her türlü maddeden iş parçası arındırılmış olarak tutucuya bağlanmalıdır.
- Bilyalı dövülecek kısımda parça nosu, seri numarası markalanmış ise bunlar, işlem sırasında kaybolma ihtimaline karşı kaydedilmelidir.
- Gerekiyorsa maskeleme yapılmalıdır. Varsa maskeleme teçhizatları veya kumaş şerit ile maskeleniyorsa şerit kenarlarının parçaya iyi tespit edilmesi gerekir.

- i) Dövmek kabini
- ii) Bilya toplama haznesi
- iii) Kontrol aparatları

4.3.2.2. Bilyalı dövmek öncesi yapılacak işlemler

- Bilyalı dövülecek parça operasyon öncesi gerekiyorsa, onarılmış, ısıtma işlem görmüş, talaşlı imlattan geçmiş, taşlanmış, parlatılmış, çapakları temizlenmiş ve keskin köşeleri giderilmiş olmalıdır.
- Magnetik toz ve florasan - penetrasyon'la denetleme gerektiğinde bilyalı dövmek öncesi tamamlanmalıdır. Kabin içinde işparçası rahatlıkla görülebilmelidir.
- Parça, kir, pas ve yağ'dan temizlenmelidir. Dövmek esnasında parçadan kopacak ve bilyaların kirlenmesine neden olabilecek her türlü maddeden iş parçası arındırılmış olarak tutucuya bağlanmalıdır.
- Bilyalı dövülecek kısımda parça nosu, seri numarası markalanmış ise bunlar, işlem sırasında kaybolma ihtimaline karşı kaydedilmelidir.
- Gerekiyorsa maskeleme yapılmalıdır. Varsa maskeleme teçhizatları veya kumaş şerit ile maskeleniyorsa şerit kenarlarının parçaya iyi tespit edilmesi gerekir.

- Operasyon için yeterli hava desteğinden emin olunmalıdır. İşlem sırasında basınçta oluşabilecek bir dalgalanma bütün işlem parametrelerini değiştireceğinden basınç sık sık kontrol edilmelidir.

4.3.2.3. Cihazın çalıştırılması

Cihaz çalıştırılmadan önce bilya kalitesi kontrol edilmeli ve eğer gerekiyorsa bilya şarjı değiştirilmeli veya eleklerden geçirilerek kırılmış bilya ve tozlar ayrılmalıdır. Bilya kalitesi bilyalı dövmeğe uygun ise aşağıda sıralı işlem basamakları yapılarak cihaz çalıştırılır.

- a) Dövülecek iş parçası Kabin içerisinde bulunan iş parçası tutucusuna bağlanır. Tutucunun devir sayısı istenilen devre göre ayarlanır.
- b) Tutucuya bağlanan iş parçası dövmenin yapılacağı nozul altına koyulur.
- c) Nozullar püskürtme pozisyonuna göre ayarlanır. Nozulla iş parçası arası açıklık ayarlanır
- d) Cihazın kapısı kapatılır.
- e) Bilya şarjı yapılır. 15 - 20 kg bilya şarjı yeterlidir. Eğer sifon indüksiyon metoduna göre dövme yapılacaksa bir kaç deneme ile dövme esnasında bilyaların sürekli olarak sirküle ettiğinden emin olunmalıdır.
- f) Nozul hava basıncı istenilen basınca getirilir.
- g) Döndürme motoru çalıştırılır.
- h) Dövme işlemini yapacak nozulun küresel vanası açılır.
- i) Dövmeğe başlamak için selonoit valf açık hale getirilir.

4.3.2.4. Cihazın kullanılması sırasında dikkat edilecek hususlar

- a) Cihaz çalışır haldeyken kapısı kapalı olmalıdır.

- b) Nozul, cihaz duvarlarına, hava ve bilya hortumlarına, gözlem penceresine ve aydınlatma sistemine karşı tutulmamalıdır.
- c) Çalışır haldeki nozul kesinlikle çıplak el ile kontrol edilmeye kalkışılmamalı, yüze veya bir başkasına doğru tutulmamalıdır.
- d) Bilyalı dövme süresi sonunda hava akımına selonoit valf ile son verildikten sonra küresel vanalar kapalı hale getirilmelidir.
- e) Bir nozul diğer nozulun menzili içerisinde tutulmamalıdır.
- f) İş parçalarını değiştirirken döndürme motor tablasının ve nozulun yerinin değişmemesine ve her iş parçasının aynı konumda bilya akışına maruz kalmasına azami dikkat edilmelidir.
- g) Yüksek basınçlarda yüksek dövme şiddetlerinde dövme yaparken yüksek basınçtan dolayı kompresördeki havanın içindeki su buharı yoğunlaşmaktadır. Bu durumda ıslanan bilyalar topaklar oluşturmakta ve bilya sirkülasyonu kararsız bir rejime girmektedir .Bu durumdan kaçınmak için bir su filitresi veya kurutucu kullanılarak bilya jetini oluşturan havanın kuru olması sağlanmalıdır.

4.3.2.5. Bilyalı dövmenin şiddetinin belirlenmesi

Bilyalı dövme işleminde S230 bilya kullanılmıştır. Bu bilya için gerekli parametreler aşağıda açıklandığı gibi elde edilmiştir.

Bilyalı dövme makinasında S 230 bilya için hangi basınçta hangi dövme şiddetinin ne kadar işlem süresi ile elde edildiği Almen A şeritleri kullanarak deneme yolu ile tespit edilmiştir. Yaklaşık 5 – 6 şerit kullanarak bir dövme şiddeti yakalanabilmektedir. İstenilen dövme şiddetleri 20 A, 25 A, ve 35 A için gerekli dövme süreleri ve basınçları bu şekilde tespit edilmiştir. 25 A % 200 doyurma için gerekli süre 25 A % 100 doyurma için gerekli sürenin iki katı alınarak elde edilmiştir.

Aşağıda çizelge 4.2’de S230 bilya için, istenilen dövme şiddetlerini verecek dövme süreleri ve dövme basınçları verilmiştir.

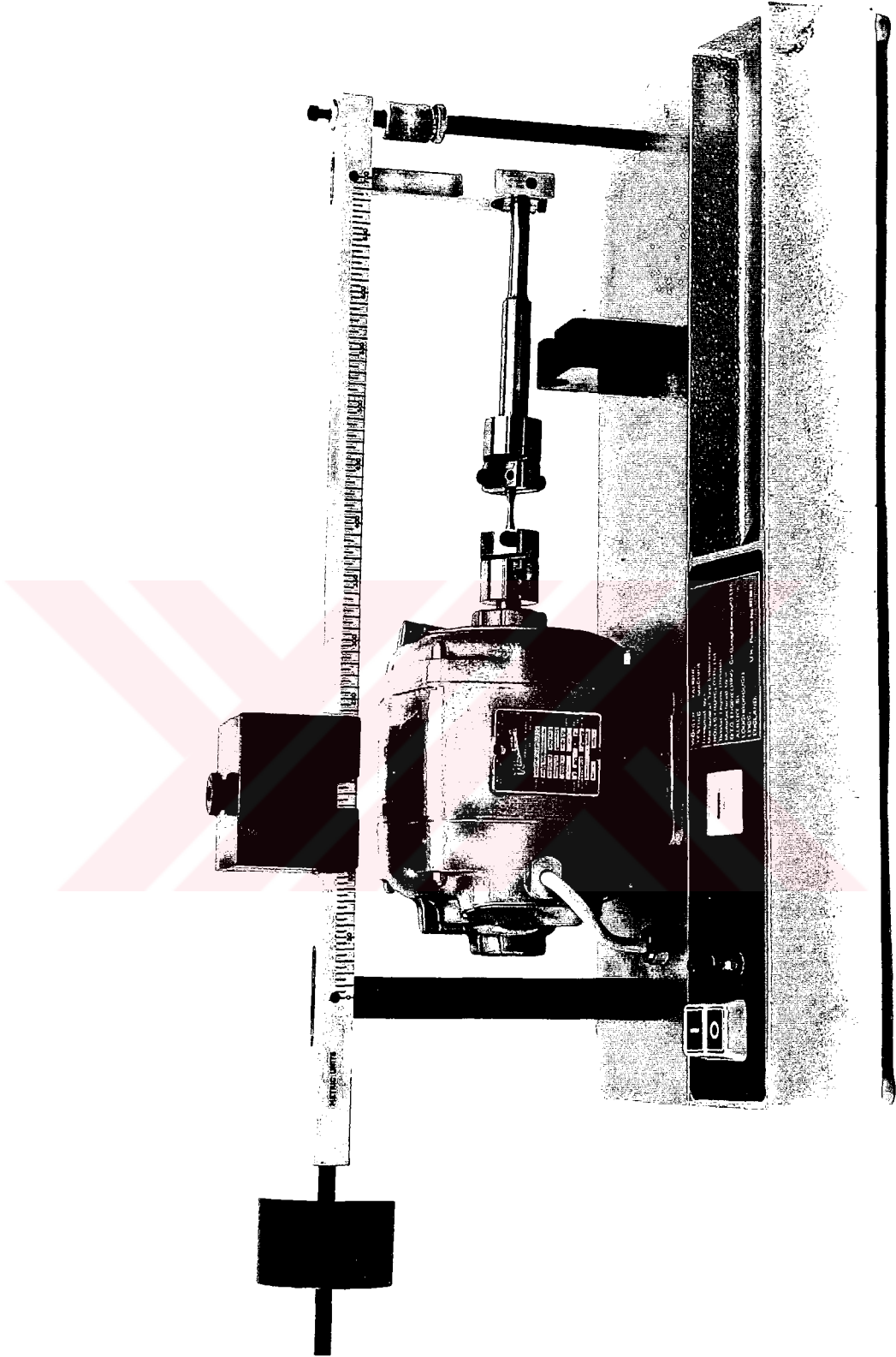
Çizelge 4.2. Bilyalı dövme İşlem Parametreleri

Numune Gurubu	Bilya Boyutu [mm]	Hava Basıncı (psi)[Mpa]	Dövme Süresi (s)	Dövme Şiddeti Almen A
A	S 230 [0.58 mm]	50 [0.35 Mpa]	45	20 A
B	S 230 [0.58 mm]	50 [0.35 Mpa]	60	25 A
C	S 230 [0.58 mm]	50 [0.35 Mpa]	120	25 A %200
D	S 230 [0.58 mm]	75 [0.53 Mpa]	60	35 A

4.4. Yorulma Deneyleri

Yorulma deneylerinde bir malzemenin S-N eğrisini oluşturabilmek için aynı numune gurubundan 8 ila 12 adet numune kullanılır [1,2]. Bu çalışmada her deney gurubu için ortalama 12 adet numune kullanıldı

Yorulma deneyleri Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarlarında bulunan ve shaft hızı 2820 d/d olan “ Masa üstü dönen eğmeli (Wöhler) yorulma makinası” kullanılarak yapılmıştır. Numuneler makina makinanın kendi tutucu aparatı yardımı ile



Şekil 4.3. Yorulma Deneylerinin Yapıldığı Yorulma Test Cihazı

bağlanmıştır. Numuneye yük makina üzerindeki ölçekli moment kolu yardımı ile uygulanmıştır.

Uygulanan gerilme sonrasında numunenin kaç devir sonra koptuğu yine makina üzerinde bulunan bir kontur sayaç yardımı ile tespit edilmiştir.

Yorulma deneyleri sırasında bir gerilme seviyesinde kopmayan numuneler diğer bir gerilme seviyesinde kullanılmamışlardır. Deneyler esnasında yorulma makinasında bir numune bağlı iken elektrik kesintisi v.s. sebeple makina durduğunda deneye tekrar baştan ve yeni bir numune ile başlanmış ve o numune deneyde kullanılmamıştır.

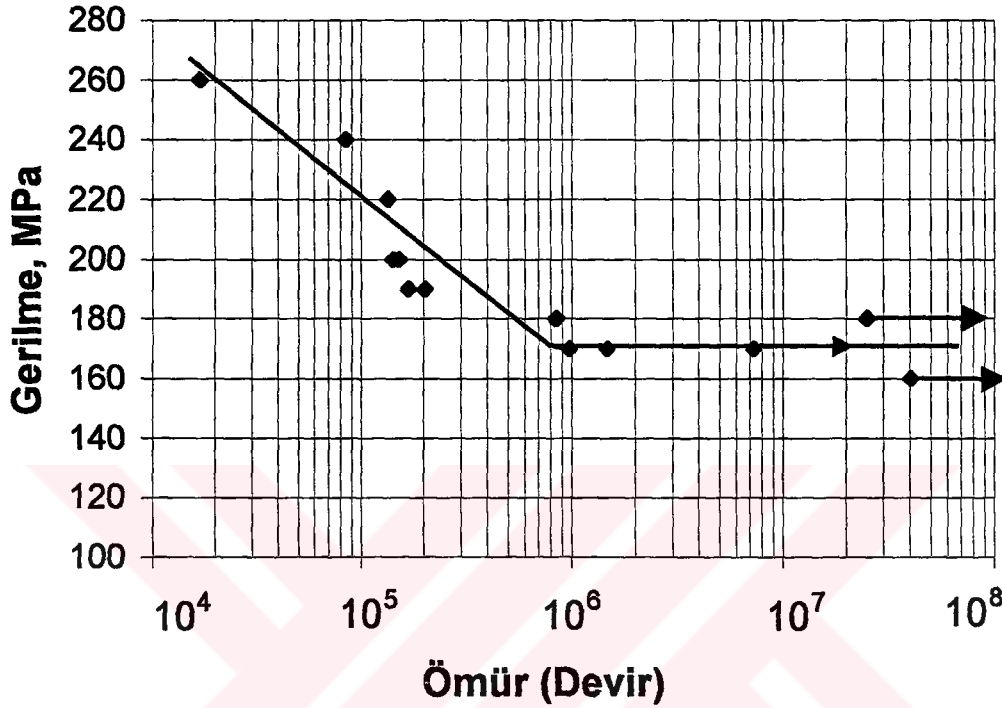
Uygulanan gerilme değerinde gerilme kırılmamış ise deney 10^7 çevrim sayısını geçinceye kadar beklenilmiş ve numune ancak bu devir sayısına ulaşınca yorulma test cihazından çıkarılarak cihaza yeni bir numune bağlanmıştır. Deneylerde $R = -1$ dir.

Bütün yorulma gurubu deneyleri laboratuvar şartlarında yapılmış oda sıcaklığı ve nem miktarı kontrolü yapılmamıştır

- Yorulma deney sonuçları

Sinterleme sonrası hiç bir işlem yapılmadan direkt olarak yorulma deneyine maruz tutulan numunelerin S-N grafiği aşağıdaki şekil 4. 4 'de verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi malzemenin bilyalı dövme işlemi uygulanmadan önceki yorulma dayanımı 170 MPa olarak tespit edilmiştir. Yorulma test cihazından çıkarılan kopmuş numunelerin mikroskopik olarak incelenmesinden numunenin kopmasına neden olan yorulma çatlaklarının yorulma deney numunesinin boyun kısmındaki yüzeyinde başladığı ve

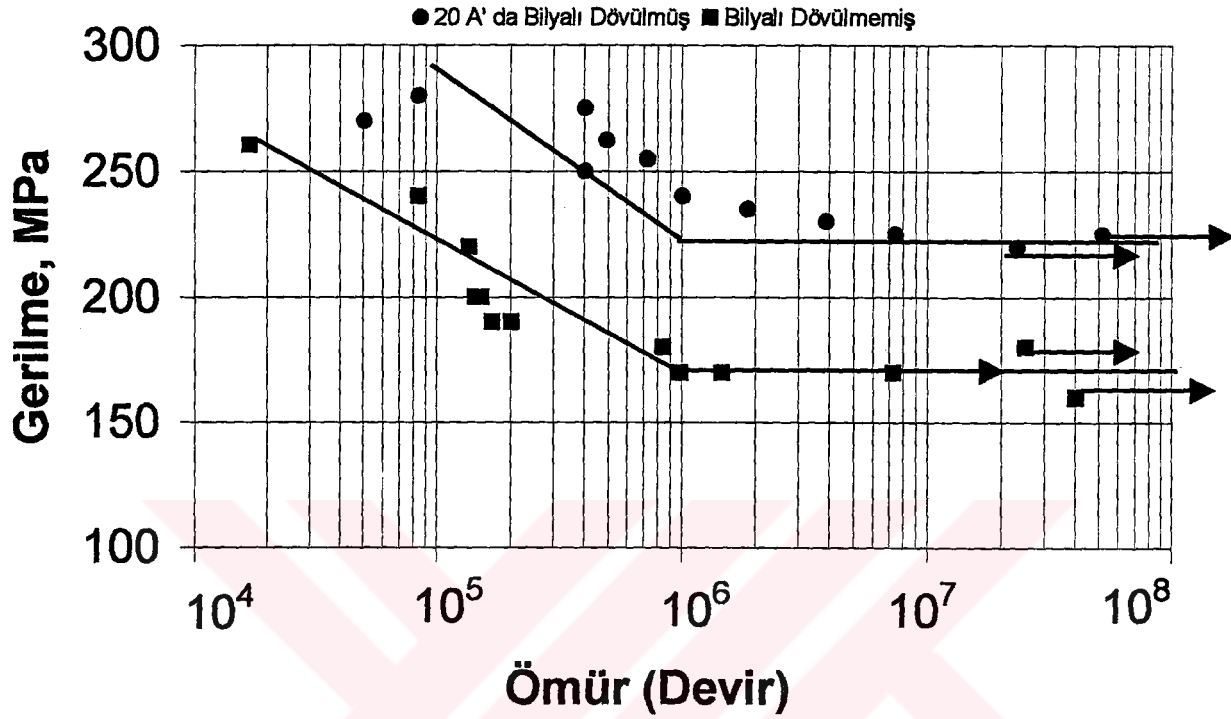
numunenin içine doğru ilerleyerek numunenin kopmasına neden olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4.4. Sinterlenmiş Bilyalı Dövülmemiş Numune Gurubu S-N Grafiği

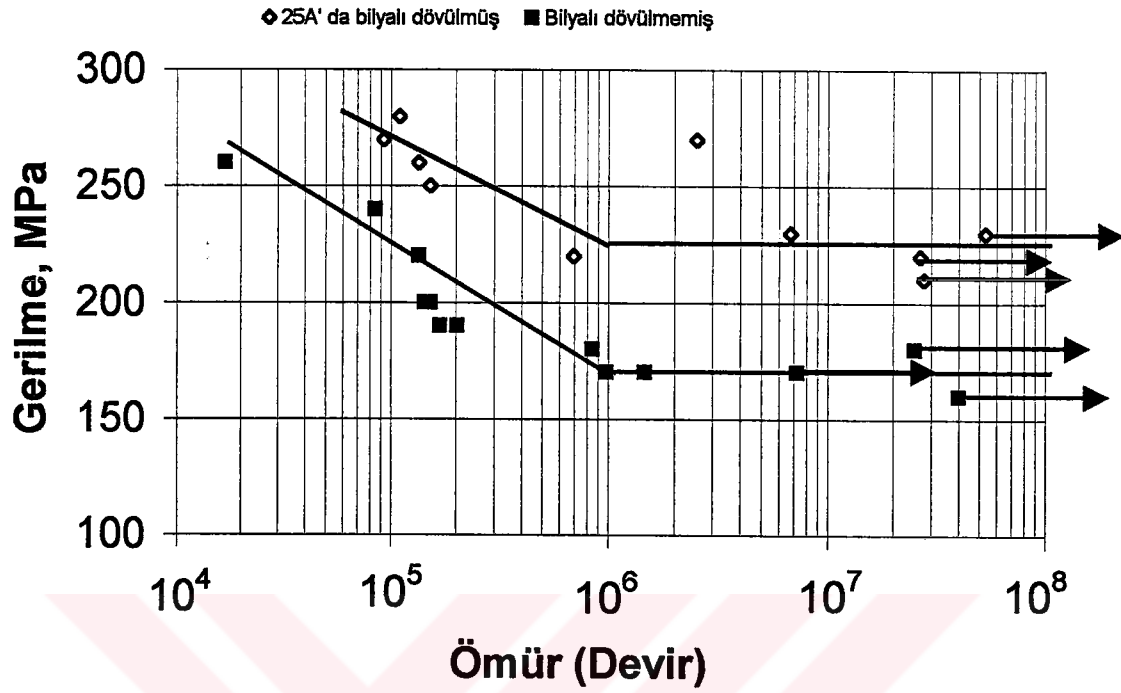
Aşağıdaki şekil 4.5’de sinterlendikten sonra ilave hiçbir işlem yapılmadan S 230 Bilya ile 20 A şiddetinde dövülmüş numune gurubunun S-N grafiği görülmektedir. Grafiktende anlaşılaçağı üzere daha önce şekil 4.4’de verilen grafikte tespit edilen 170 MPa yorulma mukavemeti S 230 bilya kullanılarak 20 A şiddetindeki bilyalı dövme işleminden sonra 220 MPa seviyesine çıkarılmıştır. 250 MPa gerilme seviyesinde numunelerin ömürleri 100000 devirden 900000 devir seviyelerine çıkarılmış ve bu seviyedeki gerilme için ömürde % 900 lük bir artış sağlanmıştır. Aynı orana yakın bir artış da 275

MPa gerilme seviyesinde elde edilmiştir. Dolayısıyla bütün gerilme seviyelerinde malzemenin yorulma ömündeki bu artış görülmektedir.



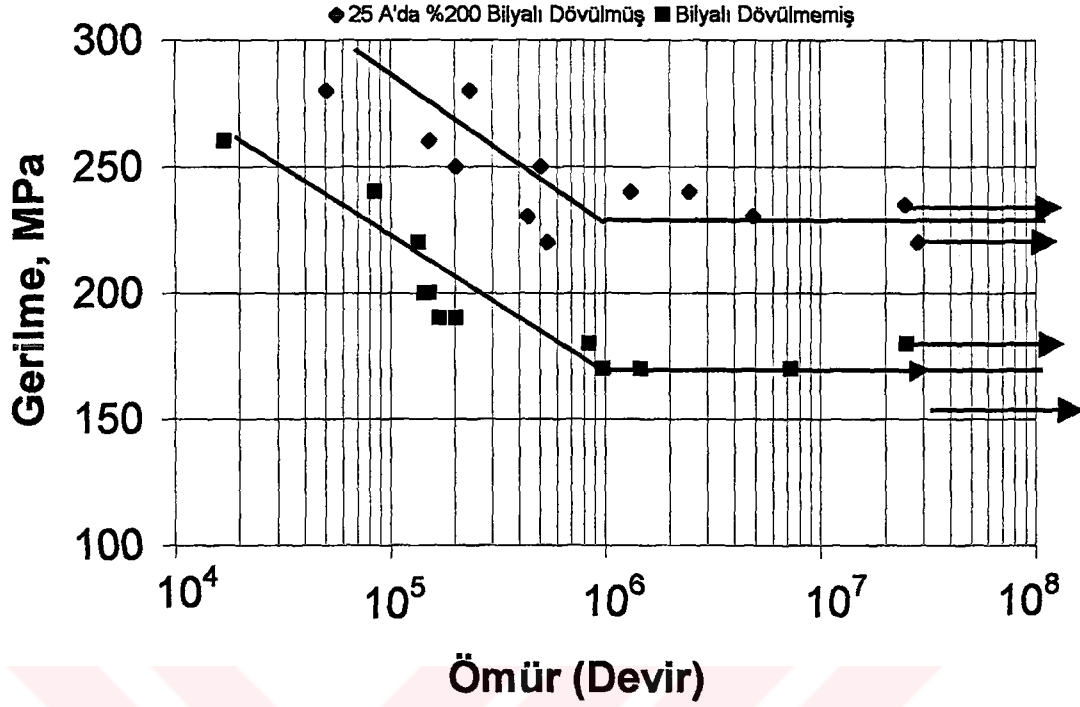
Şekil 4.5. 20 A Şiddetinde Bilyalı Dövülmüş Numune Gurubu S-N Grafiği

Aşağıda şekil 4.6'da 25 A şiddetinde Bilyalı dövme yapılmış numune gurubu S-N grafiği görülmektedir. Aynı şartlarda S230 bilya kullanılarak 25 A şiddetinde dövülmüş, bu numunelerin yorulma ömürleri bilyalı dövme işleminin etkisi ile 225 MPa seviyelerine çıkarılmıştır. 240 MPa gerilme seviyesinde numunelerin ömürleri 90000 devirden 180000 devir seviyelerine çıkarılmış ve bu seviyedeki gerilme için ömürde % 200 lük bir artış sağlanmıştır. Artış 260 MPa seviyesinde daha fazladır. Yorulma ömrü bu seviyede 20000 devir civarından 150000 devir civarına çıkarılarak % 700 lük bir artış sağlanmıştır.



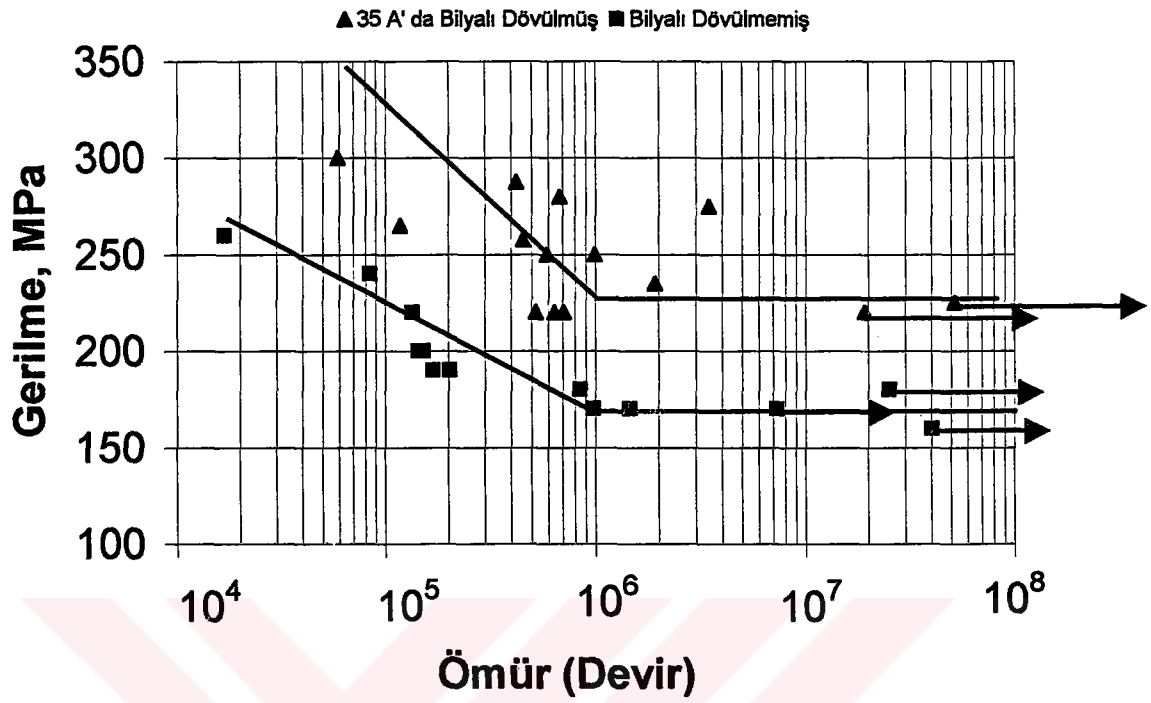
Şekil 4.6. 25 A 'da Bilyalı Övülmüş Numune Gurubu S-N Grafiği

Aşağıda şekil 4.7'de 25 A'da %200 doyurma için dövülen numune gurubu S-N grafiği görülmektedir. Burada % 200 doyurma oranını elde etmek için 25 A şiddetinde % 100 doyurma oranını veren sürenin iki katı, aynı basınç ve bilya için alınmıştır. Uygulanan işlem sonucunda malzemenin ömrü 230 MPa seviyesine çıkarılmıştır. 240 MPa seviyesinde ömürdeki 100000 devir civarından 1100000 devir civarına çıkmış yaklaşık % 1100 artmıştır.



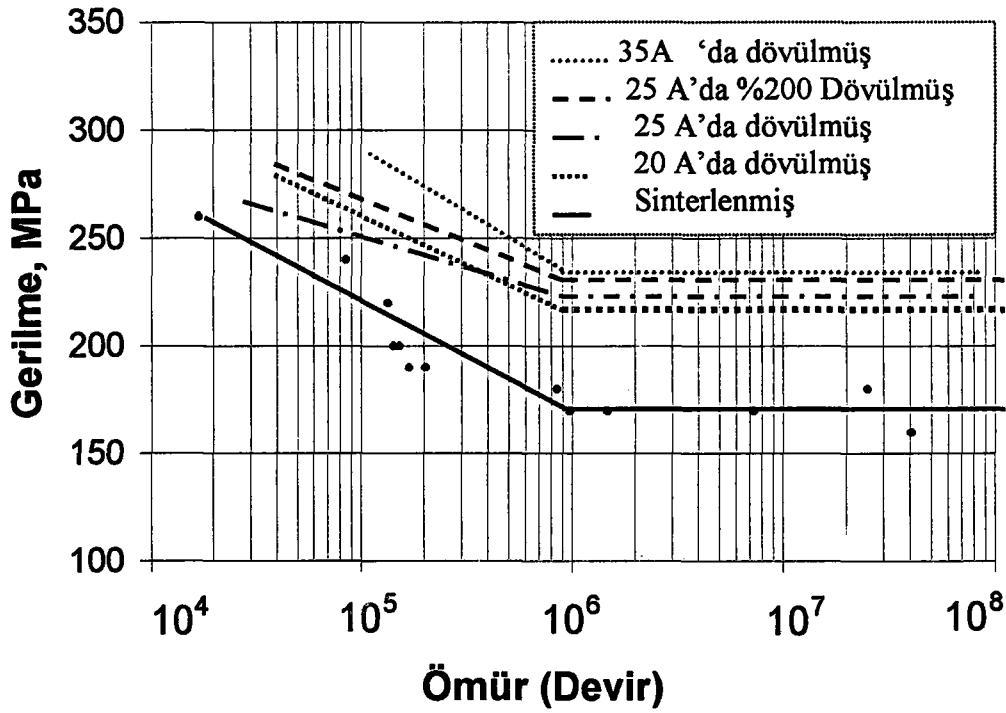
Şekil 4.7. 25 A'da % 200 Doyurma Zamanında Dövülen Numune Gurubu S-N grafiği

Aşağıda şekil 4.8'de 35 A şiddetinde dövülen numune gurubu S-N grafiği görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere düşük gerilme seviyelerindeki yorulma ömrü artışı 20 A, 25 A, ve 25 A % 200 için elde edilen değerlerden büyüktür fakat arada çok belirgin bir fark yoktur. 230 MPa ' ın üzerinde veya 230 MPa civarındadır. Ancak bu dövme şiddetinde 275 MPa seviyesinde malzemenin yorulma ömründe dikkat çekici artışlar görülmektedir. Bu seviyede malzemenin ömrü 50000 devir civarından 750000 devir civarına çıkarılmış ve % 1450 lik bir artış sağlanmıştır.



Şekil 4.8. 35 A 'da Bilyalı Dövülmüş Numune Gurubu S-N Grafiği

Aşağıda şekil 4.9'da aynı grafik üzerinde bilyalı dövülmemiş, 20 A şiddetinde bilyalı dövülmüş, 25 A şiddetinde bilyalı dövülmüş, 25 A şiddetinde %200 doyurma süresinde bilyalı dövülmüş ve 35 A şiddetinde bilyalı dövülmüş numune guruplarının S-N eğrileri verilmiştir.

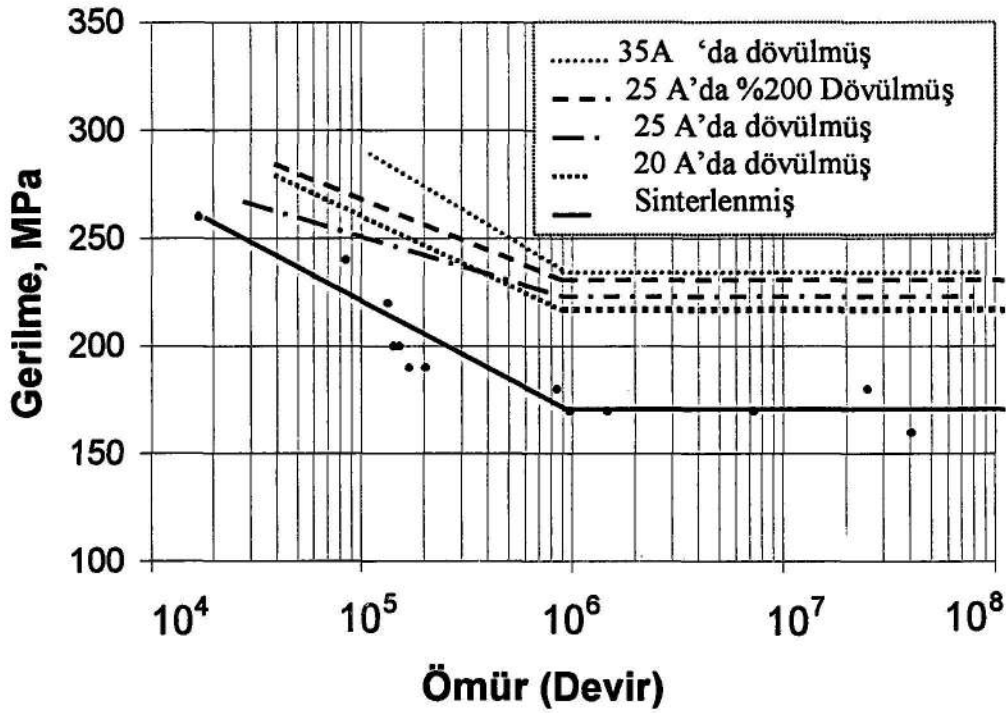


Şekil 4.9. Dövülmüş ve Dövülmemiş Numune Grupları S-N Egrileri

Şekilde Bütün numune grupları için yapılan yorulma deney sonuçları toplu olarak verilmiştir.

4.5. Mikro Yapı İncelemeleri

Toz metal çeliğin mikroyapısını ve gözenek dağılımını incelemek amacı ile sinterlenmiş prizmatik taslakların bir yüzü 20A, 25A, 25A %200 ve 35A şiddetlerinde dövülmüştür. Bu taslaklardan keserek metalografik numuneler hazırlanmış ve mikro yapıları ışık mikroskobu ile incelenmiştir. T/M çeliğin dağlanmamış halde görülen gözenek dağılımı şekil 4.10'da ve dağlanmış halde görülen mikro yapısı şekil 4.11'de verilmiştir. Bu mikroyapı fotoğrafları çeliğin genel yapısını göstermektedir. Bilyalı dövme yapılan kenerin incelenmesinde önemli bir mikroyapı farkı gözlenmemiştir. Yorulma deneyi esnasında yorulma test cihazında kırılan parçalardan metalografik numuneler

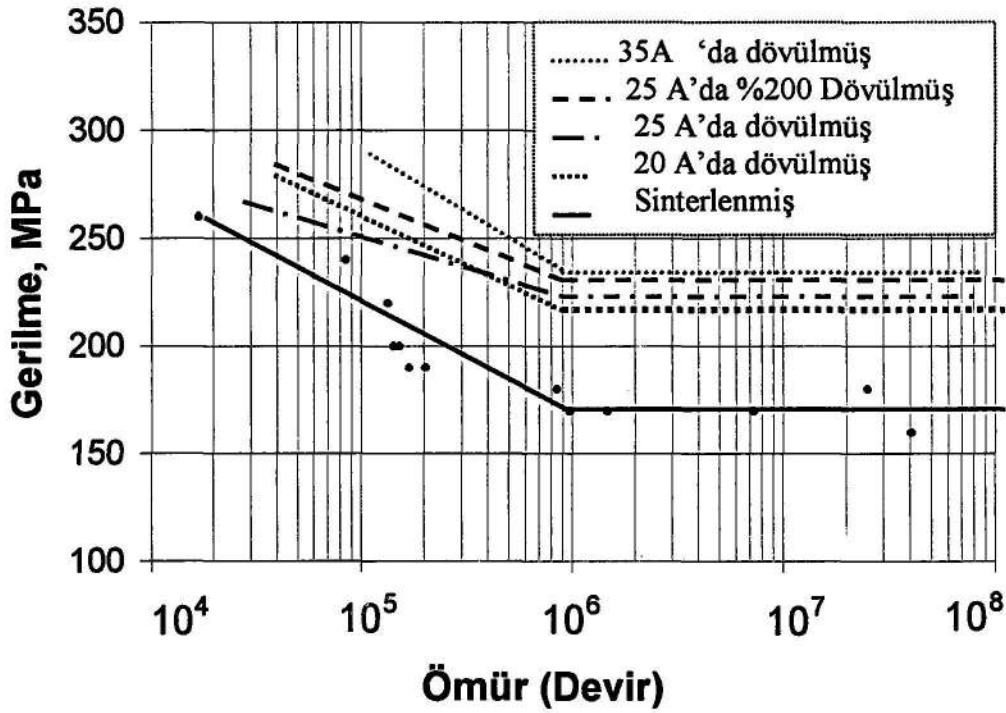


Şekil 4.9. Dövülmüş ve Dövülmemiş Numune Grupları S-N Egrileri

Şekilde Bütün numune grupları için yapılan yorulma deney sonuçları toplu olarak verilmiştir.

4.5. Mikro Yapı İncelemeleri

Toz metal çeliğin mikroyapısını ve gözenek dağılımını incelemek amacı ile sinterlenmiş prizmatik taslakların bir yüzü 20A, 25A, 25A %200 ve 35A şiddetlerinde dövülmüştür. Bu taslaklardan keserek metalografik numuneler hazırlanmış ve mikro yapıları ışık mikroskobu ile incelenmiştir. T/M çeliğin dağlanmamış halde görülen gözenek dağılımı şekil 4.10'da ve dağlanmış halde görülen mikro yapısı şekil 4.11'de verilmiştir. Bu mikroyapı fotoğrafları çeliğin genel yapısını göstermektedir. Bilyalı dövme yapılan kenerin incelenmesinde önemli bir mikroyapı farkı gözlenmemiştir. Yorulma deneyi esnasında yorulma test cihazında kırılan parçalardan metalografik numuneler

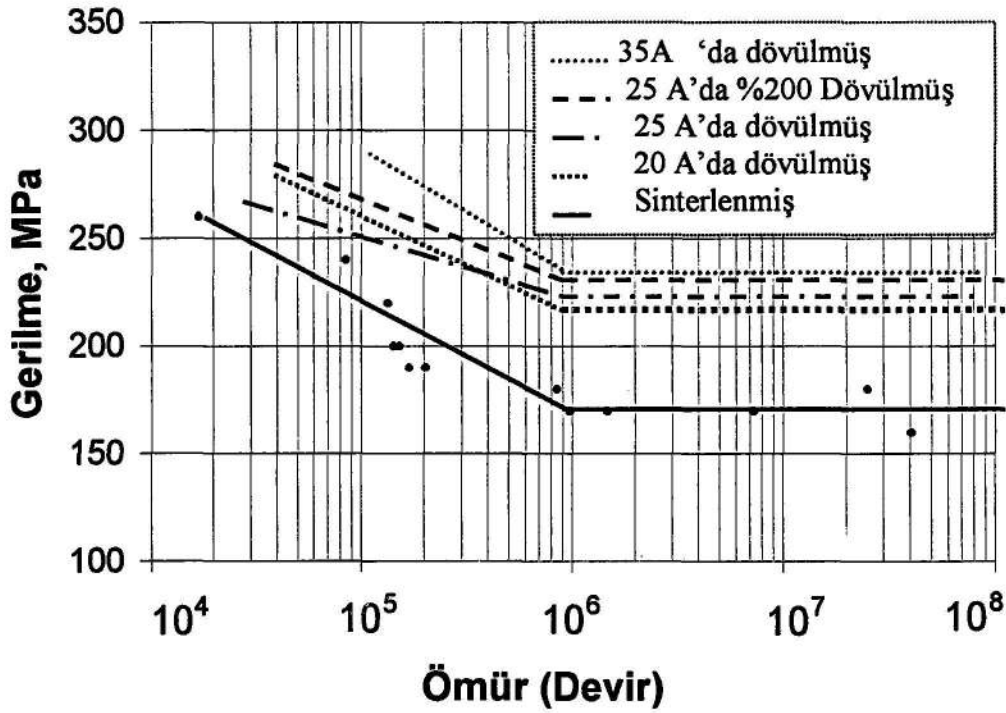


Şekil 4.9. Dövülmüş ve Dövülmemiş Numune Grupları S-N Egrileri

Şekilde Bütün numune grupları için yapılan yorulma deney sonuçları toplu olarak verilmiştir.

4.5. Mikro Yapı İncelemeleri

Toz metal çeliğin mikroyapısını ve gözenek dağılımını incelemek amacı ile sinterlenmiş prizmatik taslakların bir yüzü 20A, 25A, 25A %200 ve 35A şiddetlerinde dövülmüştür. Bu taslaklardan keserek metalografik numuneler hazırlanmış ve mikro yapıları ışık mikroskobu ile incelenmiştir. T/M çeliğin dağlanmamış halde görülen gözenek dağılımı şekil 4.10'da ve dağlanmış halde görülen mikro yapısı şekil 4.11'de verilmiştir. Bu mikroyapı fotoğrafları çeliğin genel yapısını göstermektedir. Bilyalı dövme yapılan kenerin incelenmesinde önemli bir mikroyapı farkı gözlenmemiştir. Yorulma deneyi esnasında yorulma test cihazında kırılan parçalardan metalografik numuneler

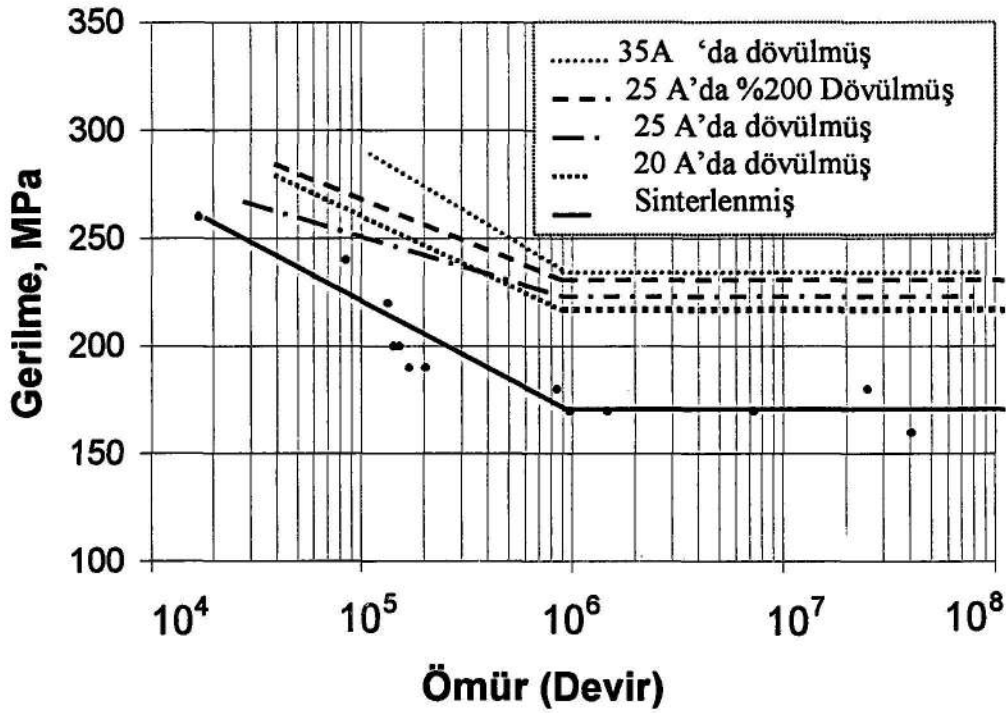


Şekil 4.9. Dövülmüş ve Dövülmemiş Numune Grupları S-N Eğrileri

Şekilde Bütün numune grupları için yapılan yorulma deney sonuçları toplu olarak verilmiştir.

4.5. Mikro Yapı İncelemeleri

Toz metal çeliğin mikroyapısını ve gözenek dağılımını incelemek amacı ile sinterlenmiş prizmatik taslakların bir yüzü 20A, 25A, 25A %200 ve 35A şiddetlerinde dövülmüştür. Bu taslaklardan keserek metalografik numuneler hazırlanmış ve mikro yapıları ışık mikroskobu ile incelenmiştir. T/M çeliğin dağlanmamış halde görülen gözenek dağılımı şekil 4.10'da ve dağlanmış halde görülen mikro yapısı şekil 4.11'de verilmiştir. Bu mikroyapı fotoğrafları çeliğin genel yapısını göstermektedir. Bilyalı dövme yapılan kenerin incelenmesinde önemli bir mikroyapı farkı gözlenmemiştir. Yorulma deneyi esnasında yorulma test cihazında kırılan parçalardan metalografik numuneler



Şekil 4.9. Dövülmüş ve Dövülmemiş Numune Grupları S-N Eğrileri

Şekilde Bütün numune grupları için yapılan yorulma deney sonuçları toplu olarak verilmiştir.

4.5. Mikro Yapı İncelemeleri

Toz metal çeliğin mikroyapısını ve gözenek dağılımını incelemek amacı ile sinterlenmiş prizmatik taslakların bir yüzü 20A, 25A, 25A %200 ve 35A şiddetlerinde dövülmüştür. Bu taslaklardan keserek metalografik numuneler hazırlanmış ve mikro yapıları ışık mikroskobu ile incelenmiştir. T/M çeliğin dağlanmamış halde görülen gözenek dağılımı şekil 4.10'da ve dağlanmış halde görülen mikro yapısı şekil 4.11'de verilmiştir. Bu mikroyapı fotoğrafları çeliğin genel yapısını göstermektedir. Bilyalı dövme yapılan kenerin incelenmesinde önemli bir mikroyapı farkı gözlenmemiştir. Yorulma deneyi esnasında yorulma test cihazında kırılan parçalardan metalografik numuneler

2. Her bir bilya çarpması metal yüzeyinde bir şekil değişikliğine neden olur. Bu şekil değişmesi parça yüzeyinde değişikliğin olduğu tabakada iş sertleşmesinin meydana gelmesine neden olur. Geometrik şeklin değişmesi, tanelerin birbirlerine göre durumlarının ve büyüklüklerinin değişmesi, malzemenin yorulma ömrünü etkiler. Bu durum bazı özel haller dışında malzemenin yorulma ömründe artışa neden olabilir.

3. Malzeme yüzeyindeki ince tabakada genel olarak akmanın oluşması bu tabaka içine kalıcı baskı gerilmesini hapseder. Bu kalıcı baskı gerilmesi malzemenin yorulma mukavemetinin artmasında en önemli rolü oynayan faktördür. Bilyalı dövme işlemi sırasında oluşan akma özellikle toz metalurjisi metoduyla üretilmiş makina parçalarında yüzeyin hemen altında oluşmuş gözenekleri sıkıştırarak malzemenin bu tabakadaki yoğunluğunu artırır.

Malzeme bilyalı dövme işlemine tabi tutulacağı zaman bu üç etki beraber düşünülüp üçü için oluşabilecek optimum dövme parametreleri belirlenmelidir. İşlem parametreleri yüzey pürüzlülüğünü minimum değiştirecek, iş sertleşmesini ve kalıcı gerilme profilini istenilen miktarlarda oluşturacak biçimde seçilmelidir. Ancak bu şekilde bilyalama işleminden beklenen faydalı etki alınabilir.

Yapılan yorulma deneylerinde ortalama %30 luk bir yorulma ömrü artışı tespit edilmiştir. Dövme işleminin şiddeti ile yorulma dayanımı da değişmiştir. 20A dövme şiddetinde dövme işlemi uygulanması ile 170 MPa seviyesindeki

malzeme yorulma mukavemeti, yaklaşık % 30 luk bir artış göstererek 220 MPa seviyesine yükselmiştir. Bu sonuç 56 nolu referansta toz metal malzemeler için elde edilen sonuçla uyumludur. 25A şiddetinde uygulanan işlem neticesinde ömrün 225 MPa seviyesine çıktığı görülmüştür. Aynı dövme şiddeti için %200 lük doyumma uygulandığında ömür yaklaşık 5 MPa lık bir artışla 230 MPa civarına yükselmiştir. 35A şiddetinde bilyalı dövme uygulandığında ömürde kaydadeğer bir artma gözlenmemiş ve ömür 230 MPa civarı veya biraz üzerinde kalmıştır.

Bu veriler ışığında şu sonuca varılmıştır:

Fe+2%Cu+0,5%C tozmetal malzeme için bilyalı dövme işleminde malzemenin ömrünü yükseltmek için seçilecek bilyalı dövme şiddeti 20-25 A dövme şiddeti aralığında olmalıdır. Bu dövme şiddeti aralığı malzeme için dövme işleminden sonra optimum yüzey pürüzlülüğü, iş sertleşmesi ve kalıcı gerilme profilini verecektir. Bu şiddetler aşıldığında malzeme için aşırı doyumma yapılmış olunacak ve bilyalı dövme işleminden beklenen faydalı etkiler alınamayacaktır hatta malzemenin yorulma ömründe düşüşler görülecektir. Bunun nedeni aşırı dövmenin yüzey tabakasına zarar vermesidir. Aynı dövme şiddeti toz metal malzemeler için referans 56 da da tavsiye edilmektedir.

Aşırı dövme yada doyumma malzeme yüzeyinde oluşan plastik deforme olmuş, iş sertleşmesine uğramış, ve içerisinde kalıcı gerilme oluşturulmuş tabakaya zarar vermekte ve bu tabakayı kaldırmaktadır [33]. Bu nedenle de ömür düşmektedir. Nitekim 35A şiddetinde dövme malzemenin ömrünü artırmış fakat bu 25 A %200 dövme işleminden elde edilen ömür artışından fazla olmamıştır. Dövme işleminde bu aralıktaki şiddetlerde %200 doyumma yapılabilir. Bu da iyi sonuç verecektir. Bu malzeme için 25A şiddetinin

aşılması ile aşırı dövme yapılmış olunacağı veya bu olasılığa imkan sağlanacağı kanısına varılmıştır. Bu durum bahsi geçen referansla aynı görüşü taşımaktadır.

Bilyalı dövülmüş numunelerde oluşan çatlakların yayılması daha uzun zaman almıştır. Bu malzemenin yorulma ömrünün artışında etkili olmuştur. Özellikle bu çatlakların içe doğru ilerlemeleri kalıcı gerilme profilli tabakadan dolayı engellenmiştir.

Bilyalı dövme işlemi $Fe+2Cu+0,5C$ toz metal çelik malzemenin yorulma ömrünü uygulanan bütün dövme şiddetlerinde artırmıştır. 25A %200 şiddeti uygulandığı ana kadar yorulma ömründeki artış sürmüştür. 35A dövme şiddeti uygulandığında ise belirgin bir artış görülmemiş, dövme şiddetinin artması ile yorulma ömründeki artış artık durmuştur.

Deneylerden anlaşılmıştır ki bilyalı dövme işlemi çok hassas bir işlemdir . İşlem sırasında her türlü parametrenin sıkı kontrol altında tutulması gerekmektedir. Basınçta oluşabilecek bir dalgalanma veya bilya sirkülasyonunda meydana gelebilecek kısa süreli bir duraksama işlem parametrelerinin tümünü etkilemekte ve işlemde beklenen faydalı etkinin alınmasını engellemektedir.

İşlem parametreleri doğru seçildiğinde ve kontrol altında tutulduğunda ve işlemde sonra ikinci bir işlem olarak cam veya seramik bilyalarla yüzey pürüzlülüğünü düşürmek için bilyalama yapılırsa malzeme ömründe artış sağlanabilir.

Yüksek basınçlarda yüksek dövme şiddetlerinde kompresördeki havanın içindeki suyun yoğunluğu ve nozuldan ıslak havanın püskürmesi ile de

bilyaların ıslanarak birbirlerine yapıştıkları görülmüştür. Bu da bilyaların topaklanmasına neden olmakta ve sirkülasyonun duraksamasına neden olmaktadır. Bu durumdan kaçınmak için nozuldan çıkan havanın mutlaka kuru olması sağlanmalıdır.

Yüksek dövme şiddetleri gerektiren uygulamalarda bu şiddeti yakalayacak bilya boyutu-hava basıncı ilişkisini iyi seçmek gerekir . Küçük çaplı bilyalar kullanarak yüksek basınçlarda dövme yapmak yerine büyük çaplı bilyalar kullanarak düşük basınçlarda bilyalama yapılmalıdır. Bu yüzey pürüzlülüğünü daha az yükseltecektir. Ancak bilya çapı büyüdükçe sarma oranı düşmektedir. İşlemden tam verim sağlanması aynı zamanda tam sarma oranının elde edilmesine de bağlıdır. Bilya boyutu bütün bu faktörler göz önüne alınarak belirlenmelidir.

Bilya jetinin numune üzerine odaklanmasına çok dikkat edilmelidir. Odaklanma iyi yapılmassa daha önce tespit edilen parametrelerle tespit edilen dövme şiddetini elde etmek çok zor bazen de imkansız olmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Türk Standartları, Nisan 1978, Toz Metalurjisi Terimleri, **TS.3087**.
2. Roll, K.,H., 1984 “History of Powder Metalurgy”, **Metals Handbook**, 9. Baskı, Cilt 7, 14-20, Powder Metalurgy , ASM, A.B.D.,
3. Ersümer, A., 1970, Toz Metalurjisi Sert Metal Sinterleme, İTÜ Yayınları, İstanbul.
4. Hermann, S., 1978 “ Sintering :An Economical Process For The Manufacture of Metalic Precison Parts ”, **Mannesman Konferans Notları**, Almanya.
5. Uygur, E. , M. , 1979, “ Metal Tozlarının İmali ”, **ODTÜ. Uygulamalı Araştırmalar Dergisi**, Cilt 2, Sayı 5, Ankara, 1979.
6. Beddow, J.K. , 1978, The Production of Metal Powders by Atomization, **Heiden ltd.** ,London.
7. Uygur, E. M., 1986, **T/M Seminer Notları**, SEGEM, Ankara.
8. Sarıtaş, S. , ve Çınar, H. , 1988, “Metal Tozlarının Çift Hareketli Zımbalarla Biriketlenmesi ”, **3. Ulusal Mak.Tas. İmalat Kongresi**, 615-621.
9. German, M. R. , 1984, Powder Metalurgy Science, **MPIF**, A.B.D.
10. Alpugan, Z: , 1982, T/M’de Presleme Tekniği ve Nükleer Yakıt (U02) Üretimine Uygulaması, **TÜBİTAK**, Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü.
11. Exner, H. E. , 1979, “Principles of Single Phase Sintering ”, **Reviews Powder Metalurgy Phys. Ceram**, V.1, 7-251
12. Thummler, F. , and Thomma. W. , 1967,“ The Sintering Process ”, **Metall Reviews**, V 12., 69-108.
13. Sarıtaş,S., 1985, “Çelik Toz Dövmecilik”,**ODTÜ Uygulamalı Araştırmalar Dergisi**, Cilt 3, Sayı 11, s.1-26, Ankara.
14. Sarıtaş, S., 1992, “Toz Metalurjisi”, **Makina Mühendisliği El Kitabı**, Makina Mühendisliği Odası, Ankara.

15. Almen, J.O. and Black, P.B., 1963, Residual Stresses and Fatigue in Metals, **McGraw-Hill Book Co.**
16. Larsson, M., Melander, A., Blom, R. and Preston, S., 1991, "Effect of shot peening on bending fatigue strength of spring steel SS 2090", **Materials Science and Technology**, 7, 998-1004
17. Shot Peening Applications, Metal Improvement Company, Inc., **Subsidiary of CURTISS WRIGHT Corporation**, Sevent Edition, U.K.(Tarihsiz)
18. Demir, A., Sarıtaş, S., 1993, "Toz metal çeliklerin mekanik özellikleri", **A.Ü. Isparta Müh. Fak. Dergisi**, 7, 1-13
19. Varol, R., Sarıtaş, S., 1996, Bilyalı Dövme işleminin demir esaslı T/M parçaların yorulma özellikleri üzerine etkisinin araştırılması, **1. Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı**, G.Ü., Ankara, s 407-417
20. Al Obaid, Y.F., 1990, A rudimentary analysis of improving fatigue life of metals by shot peening, **Journal of Applied Mechanics**, Vol 57, 307-312
21. Amstead, B.H., Ostwald P.F., Begeman, M.L., 1978, Manufacturing Processes, **Jhon Niley and Sons**, New York
22. O'Hara, Peter, **SAE Technical Papers Series, 850708**, "Dyescan Tracers as a Quality Control Tool for Coverage Determination in Controlled Shot Peening", Metal Improvement Company, Inc., Newbury, U.K.
23. Black, J.T.,**Metals Handbook**, 10 th Edition, Shot Peening , Vol 16, 398-405.
24. SAE Manual on Shot Peening, 1991,**SAE HS-84**, Third Edition, U.S.A.
25. Khabou, M.T., Castex, L. and Inglebert, G., 1990, "The effect of material behavior law on the theoretical shot peening results", **European Journal of Mechanics**, A/Solids, 9 (6), 537-549
26. Plaster, H.I., 1981, "Technical aspects of shot peening machinery and media", **First International Conference on Shot Peening**, Paris, 83-94.
27. Chardin, H., Grillon, F., Jeandin, M., 1996, "Superficial densification of P/M parts using ultrasonic shot peening", **The International Journal of**

Powder Metallurgy, 32 (2), 245-254

28. Commercial Engine Standard Practices Manual (**GE Aircraft Engines**), October 1995
29. Varol, R., 1990, 2024 Aluminum Alaşımının Yorulma Ömrü Üzerine Farklı Bilyalı Dövme İşlem Parametrelerinin Etkisi, **Doktora Tezi**, Selçuk Üniversitesi, Konya
30. **IEPCO** Peening shot specifications, Sept. 1966, 66/342
31. Campaigne, Jack, 1986, "Controlled Shot Peening", **The Shot Peener**, 2nd Edition, Mishawaka, U.S.A., 1-11.
32. Horace, J, Grover, June 1998, **SAE Technical Paper**, 540138, "Factors by which shot peening influences the fatigue strength of parts", **The Shot Peener**, International Newsletter for Shot Peening, V 12, 5-9, U.S.A
33. Sarıtaş, S, Varol, R, Doğan, C, 1997, "The Effects Shot Peening on the Fatigue Properties of Steels", **Powder Metallurgy**, Finishing, 196-202
34. Varol, R., Taşer, Ö.F., 1990, "Bilyalı dövme işlemi ve işlem karakteristikleri", **Mühendis ve Makina**, Ocak, 21-24
35. Cina, B., Kaatz, T., Eldror, I., 1990, "The effect of heating shot peened sheets and thin plates of aluminum alloys", **Journal of Materials Science**, 25, 4101-4105
36. Mayuram, M.M., Girish, D.V., Krishnamurty, S., 1993, "Surfaces integrity studies on shot peened thermal-treated En 24 steel spur gears", **Wear**, 193, 242-247
37. Al Obaid, Y.F., 1995, "The Effect of shot peening on stress corrosion cracking behavior of 2205-Duplex stainless steel", **Engineering Fracture Mechanics**, 51 (1), 19-25
38. Noordhuis, J. and De Hosson, M., 1992, "Surface modification by means of laser melting combined with shot peening": **A novel aproach**, **Acta Metalurgia and Materialia**, 40(12), 3317-3324
39. Reynier, B., Chappuis, G. and Sprauel, J.M., 1995, "X - Ray diffraction study of the fatigue behavior of a shot peened aluminum-lithium alloy", **Experimental Mechanics**, June, 112-118

40. Hangbin, X., Dengzhen, W. and Qing, C., 1991, "The effect of shot peening on rolling contact fatigue behavior and its crack initiation and propagation in carburized steel", **Wear**, 151, 77-86
41. Li, J.B., Gai, X.Y., Kang, Z.Q. and Wang G., 1996, "Effect of shot peening on superficial yield strength of annealed medium carbon alloy steel" **Materials Science and Technology**, January, 12, 59-63
42. Kumar, D., Das, S. and Radhakrishnan, V., 1987, "Effect of shot peening on fatigue of Ni-based superalloy", **Scandinavian Journal of Metallurgy**, 16, 253-256
43. Cao, W., Khadhraoui, M., Brenier, B., Guedou, J.Y. and Castex, L., 1994, Thermomechanical relaxation of residual stress in shot peened nickel base superalloy, **Materials Science and Technology**, 10, 947-954
44. Li, J.B., Guang, Y. and Qiao, J.S., 1992, "Effects of brush electroplating and shot peening on the fatigue strength of a medium strength steel", **Fatigue & Fracture of Engineering, Materials & Structures**, 15 (5), 431-439
45. Askeland, D.R., 1992, *The Science and Engineering of Materials*, 332-391, Boston PWS, Kent Pub.
46. Takasugi, T., Ma, C.L. and Hanada, S., 1996, "Suppression of environmental embrittlement of Ni₃(Si,Ti) alloys by shot peening", **Scripta Materialia**, 34 (7), 1131-1138
47. Sridhar, B.R., Nafde, W.G., Padmanabhan, 1992, K.A., "Effect of shot peening on the residual stress distribution in two commercial titanium alloys", **Journal of Materials Science**, 27, 5783-5788
48. Lessels, J.M., B, Sc, M.I.Mech.E., and Brodrick, R.F., 1956, "Shot Peening as Protection of Surface Damaged Propeller Blade Materials", **Proceeding of The International Conference on Fatigue of Metals**, London
49. Varol, R. and Meriç, C., 1992, "Bilyalı Dövme: Teori ve Uygulama", **Mühendis ve Makina**, Mart 92, 15-22
50. Inoue, K., Maehara, T., Yamanaka, M., Kato, M., 1989, "The effect of shot peening on the bending strength of carburized gear teeth", **JSME**

International Journal, 32 (3), 448-454

- 51 Tobe, T., Kato, M., Takatsu, N. and Morita, I., 1986, "Bending Strength of Carburized SCM 420H Spur Gear Teeth Bull", **JSME**, 29, 247-273
- 52 Lawerenz, M.D., 1985, **SAE paper**, 841090
- 53 Hisamatsu, S. and Kanazawa, T., 1987, **JSAE**, 41 (7), 722-726
- 54 Jinliang, H., Yanxiang, L., Yaomine, Z., 1994, "The effect of combined induction heating and shot-peening on the properties of oil pump arms", **Journal of Materials Processing Technology**, 42, 311-318
- 55 Doib, N., 1995, "Fatigue of inhomogeneous low alloy PM steels", **P/M**, 32 (3), 209-214
- 56 Chernenkoff, R.A., Mocarski, S. and Yeager, D.A., 1995, "Increased fatigue strength of powder forged connectingrods by optimized shot peening", **Powder Metallurgy**, 38 (3), 196-200
- 57 Fethullayev, E. K., 1983, **Malzemelerde Teknolojik Gerilmeler, Doktora Tezi**, Leningrad.

ÖZGEÇMİŞ

Tez çalışmasını yapan Hamza Kemel AKYILDIZ 12 Nisan 1973'te Ankara da doğdu. İlkokulu Balgat Mustafa Kemal İlkokulunda orta okulu Balgat Orta okulunda ve liseyi de Balgat Ömer Seyfettin Lisesinde Bitirdi. 1991 Yılında Konya Selçu Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümüne girdi. 1995 Yılında bu bölümü bitirerek Dokuz eylül üniversitesinde yüksek lisans eğitime başladı. Hazırlık sınıfı esnasında Erciyes Üniversitesi Yozgat Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümüne Konstrüksiyon-İmalat A.B.D'da araştırma görevlisi olarak girdi. Daha sonra hazırlık sınıfını bitirip Dokuz Eylül Üniversitesinde yüksek lisans eğitimini bırakarak Gazi Üniversitesinde Yüksek lisans eğitime başladı. Halen Erciyes Üniversitesi Yozgat Mühendislik Mimarlık Fakültesindeki araştırma görevliliğini sürdürmektedir.