

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAGNEZYUM AZ80 ALAŞIMINDA YÜKSEK BASINÇ
BURULMA İŞLEMİNİN MİKROYAPI ve MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

Metalürji ve Malzeme Mühendisi Doğan ARPAÇAY

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU

İSTANBUL, 2009

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAGNEZYUM AZ80 ALAŞIMINDA YÜKSEK BASINÇ
BURULMA İŞLEMİNİN MİKROYAPI ve MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

Metalürji ve Malzeme Mühendisi Doğan ARPAÇAY

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU

İSTANBUL, 2009

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. NANO MALZEMELER	2
2.1 Nano Malzemelerin Genel Özellikleri	4
2.2 Nano Malzemelerin Mekanik Özellikleri.....	4
2.3 Nano Malzemelerin Günümüzdeki ve Gelecekteki Endüstriyel Uygulamaları	6
2.4 Nano Malzemelerin ve Nanoteknolojinin Avantajları	13
2.5 Nano Malzemelerin Üretim Yöntemleri	14
2.5.1 Bottom-up Yöntemi	14
2.5.2 Top-down Yöntemi	14
3. ŞİDDETLİ PLASTİK DEFORMASYON PROSESLERİNİN TEKNİKLERİ.....	16
3.1 Eşit Kanal Açısal Basma	17
3.2 Toplayıcı Haddelemeyeyle Bağlama.....	18
3.3 Çok Yönlü Dövme	19
3.4 Periyodik Ekstrüzyon ve Presleme	20
3.5 Tekrarlayan Kıvrırma ve Doğrultma	21
3.6 Bükme Ekstrüzyon	22
3.7 Yüksek Basınç - Burulma.....	23
4. YENİ AŞIRI PLASTİK DEFORMASYON METOTLARI	25
4.1 Dönen Kalıp ile Eşit Kanal Açısal Basma.....	25
4.2 Ters Çevirip Kıvrırarak İnceltme	26
4.3 Tel veya Çubuk Malzemenin Çapraz Haddelenmesi	27
4.4 Silindir ve Halka Numuneler için Tekrarlanan Periyodik Deformasyon.....	28

5. YENİ AŞIRI PLASTİK DEFORMASYON METOTLARININ AVANTAJLARI.....	29
6. NANO YAPILI MALZEMELERİN AŞIRI PLASTİK DEFORMASYON YÖNTEMİYLE ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN TEMELLERİ	30
6.1 Dayanım & Süneklik ve Temelleri	31
6.2 Süper Plastiklik	35
6.3 Isıl Kararlılık.....	36
6.4 Korozyon Dayanımı	37
6.5 Diğer Mekanik Özellikler.....	37
7. AŞIRI PLASTİK DEFORMASYON İŞLEMİNİN UYGULANMASI	39
8. MAGNEZYUM ve ALAŞIMLARI.....	40
8.1 Dövme Magnezyum Alaşımları.....	43
8.1.1 Dövme Mg-Mn Alaşımları	43
8.1.2 Dövme Mg-Zn-Al Alaşımları	43
8.1.3 Mg-Zn-Zr-Toryum Alaşımları	43
8.2 Dövme Magnezyum Alaşımlarının Kimyasal Kompozisyonları.....	43
8.3 Dövme Magnezyum Alaşımlarının Mekanik Özellikleri.....	45
8.4 Magnezyum AZ80 Dövme Alaşımının Teknik Özellikleri.....	46
9. DENEYSEL ÇALIŞMA	47
10. SONUÇLAR.....	77
KAYNAKLAR.....	78
EKLER	81
ÖZGEÇMİŞ.....	82

SİMGE LİSTESİ

F	Fahrenheit
GPa	Gigapascal
HB	Brinell sertliği
HRC	Rockwell C sertliği
HV	Vickers sertliği
kJ	Kilo joule
kJ/mm ²	Kilojoule / milimetrekare
km/sn	Kilometre / saniye
kN	Kilo Newton
ksi	1000 pound / inch ²
kV	Kilovolt
Mpa	Mega pascal
mm	Milimetre
N	Newton
nm	Nanometre
psi	Pound / inch ²
Tm	Ergime sıcaklığı
μ	Mikron

KISALTMA LİSTESİ

AFM	Atomic Force Microscope
ARB	Accumulative Roll-Bonding
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEC	Cyclic Extrusion and Compression
ECAP	Equal-Channel Angular Pressing
HPT	High Pressure-Torsion
LCD	Liquid Crystal Display
MDF	Multi-Directional Forging
NATO	North Atlantic Treaty Organization
RCS	Repetitive Corrugation and Straightening
SPD	Severe Plastic Deformation
STM	Scanning Tunneling Microscope
TE	Twist Extrusion
TEM	Transmission Electron Microscopy

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Nano malzemenin içyapısı.....	2
Şekil 2.2 Nanometrenin diğer büyüklükler ile karşılaştırılması	3
Şekil 2.3 Nano malzemelerin genel kullanım alanları.	7
Şekil 3.1 Eşit kanal açısıl basma.	17
Şekil 3.2 Toplayıcı haddelemeyle bağlama.....	18
Şekil 3.3 Çok yönlü dövme.	19
Şekil 3.4 Periyodik ekstrüzyon ve presleme.	20
Şekil 3.5 Tekrarlayan kıvrırma ve doğrultma.....	21
Şekil 3.6 Bükme ekstrüzyon.....	22
Şekil 3.7 Yüksek basınç-burulma.	23
Şekil 4.1 Dönen kalıpla eşit kanal açısıl basma.....	25
Şekil 4.2 Ters çevirip kıvrırarak inceltme.	26
Şekil 4.3 Tel veya çubuk malzemenin çapraz haddelenmesi.	27
Şekil 4.4 Silindir ve halka numuneler için tekrarlanan periyodik deformasyon.	28
Şekil 6.1 Uzama-dayanım grafiği.	31
Şekil 6.2 Dayanım-eşdeğer gerilim grafiği.	32
Şekil 6.3 İkizlenme örneği.	34
Şekil 6.4 ECAP sonrası malzemeye ait uzama değerleri.	35
Şekil 8.1 Mg metalinin diğer malzemelere göre yıllara bağlı kullanımı	41
Şekil 9.1 HPT makinesi.....	47
Şekil 9.2 HPT işleminin şematik gösterimi.....	48
Şekil 9.3 HPT işleminin uygulaması.	49
Şekil 9.4 HPT işleminde kullanılan numuneler.....	50
Şekil 9.5 HPT işleminde kullanılan kalıplar.	50
Şekil 9.6 HPT işleminde kullanılan kalıpların yerleşim şekli.	51
Şekil 9.7 HPT işlemi sırasındaki verilerin takip edildiği makine ekranı.	52
Şekil 9.8 Kullanılan ışık metal mikroskopları.	53
Şekil 9.9 Kullanılan mikro vikere sertlik ölçüm cihazı.....	53
Şekil 9.10 0GPa–0 tur burulan numunenin mikroyapısı X500	54
Şekil 9.11 3GPa basınç – 1 tur burulan numunenin a) yandan kesitinin montesi b) merkez kısmı X100 c) merkez kısmı X1500.	54
Şekil 9.12 4GPa basınç – 1 tur burulan numunenin a) yandan kesitinin montesi b) merkez	

kısmı X100 c) merkez kısmı X1500.	55
Şekil 9.13 5GPa basınç – 1 tur burulan numunenin a) yandan kesitinin montesi b) merkez kısmı X100 c) merkez kısmı X1500.	55
Şekil 9.14 5GPa basınç – 2 tur burulan numunenin a) yandan kesitinin montesi b) merkez kısmı X100 c) merkez kısmı X1500.	56
Şekil 9.15 5GPa basınç – 3 tur burulan numunenin a) yandan kesitinin montesi b) merkez kısmı X100 c) merkez kısmı X1500.	56
Şekil 9.16 5GPa basınç – 4 tur burulan numunenin a) yandan kesitinin montesi b) merkez kısmı X100 c) merkez kısmı X1500.	57
Şekil 9.17 5GPa basınç – 5 tur burulan numunenin a) yandan kesitinin montesi b) merkez kısmı X100 c) merkez kısmı X1500.	57
Şekil 9.18 0GPa–0 tur burulan numunenin sertlik taraması.....	58
Şekil 9.19 3GPa basınç – 1 tur burulan numunenin çap ve kalınlık boyunca sertlik taraması.	58
Şekil 9.20 4GPa basınç – tur burulan numunenin çap ve kalınlık boyunca sertlik taraması. ..	59
Şekil 9.21 5GPa basınç – 1 tur burulan numunenin çap ve kalınlık boyunca sertlik taraması.	59
Şekil 9.22 5GPa basınç – 2 tur burulan numunenin çap ve kalınlık boyunca sertlik taraması.	59
Şekil 9.23 5GPa basınç – 3 tur burulan numunenin çap ve kalınlık boyunca sertlik taraması.	60
Şekil 9.24 5GPa basınç – 4 tur burulan numunenin çap ve kalınlık boyunca sertlik taraması.	60
Şekil 9.25 5GPa basınç – 4 tur burulan numunenin çap ve kalınlık boyunca sertlik taraması.	60
Şekil 9.26 Isıl işlemsiz numunelerin ortalama sertlik değerleri.	61
Şekil 9.27 Isıl işlemsiz numunelerin çapları boyunca sertlik taraması.	62
Şekil 9.28 1GPa basınç – 1 tur – 2° burulan numunenin merkez kısımları X500.	62
Şekil 9.29 3GPa basınç – 1 tur – 2° burulan numunenin merkez kısımları X500.	63
Şekil 9.30 3GPa basınç – 10 tur – 2° burulan numunenin a) merkez kısmı X500 b) kenar kısmı X500.	63
Şekil 9.31 3GPa basınç – 15 tur – 2° burulan numunenin a) merkez kısmı X500 b) kenar kısmı X500.	63
Şekil 9.32 Normalizasyon ısıl işleminden sonra elde edilen mikro yapı X500.	64
Şekil 9.33 3GPa basınç – 0 tur – 2° – ısıl işlemli numunenin a) yandan kesitinin montesi b) kenar kısmı X200 c) merkez kısmı X500.	65
Şekil 9.34 3GPa basınç – 1 tur–2° – ısıl işlemli numunenin a) yandan kesitinin montesi b) kenar kısmı X200 c) merkez kısmı X500.	65
Şekil 9.35 3GPa basınç – 3 tur – 2° – ısıl işlemli numunenin a) yandan kesitinin montesi b) kenar kısmı X200 c) merkez kısmı X500.	66

Şekil 9.36 3GPa basınç – 5 tur – 2° – ısıtılmış numunenin a) yandan kesitinin montesi b) kenar kısmı X200 c) merkez kısmı X500.	66
Şekil 9.37 3GPa basınç – 10 tur – 2° – ısıtılmış numunenin a) yandan kesitinin montesi b) kenar kısmı X200 c) merkez kısmı X500.	67
Şekil 9.38 3GPa basınç – 15 tur – 2° – ısıtılmış numunenin a) yandan kesitinin montesi b) kenar kısmı X200 c) merkez kısmı X500.....	67
Şekil 9.39 3GPa basınç – 15 tur – 2° – ısıtılmış numunenin a) yandan kesitinin montesi b) kenar kısmı X200 c) merkez kısmı X500	68
Şekil 9.40 a) 5GPa–0 tur burulan b) 5GPa–1 tur burulan c) 5GPa–3 tur burulan d) 5GPa–5 tur burulan numunelerin merkez kısımları.	71
Şekil 9.41 a) 4GPa–1 tur- 3° kenar kısmı X200 b) 4GPa–1 tur- 3° merkez kısmı X200 c)4GPa–1 tur- 5° kenar kısmı X200 d) 4GPa–1 tur- 5° merkez kısmı X200 e)4GPa–1 tur- 10° kenar kısmı X200 f) 4GPa–1 tur- 10° merkez kısmı X200.	73
Şekil 9.42 a) 4GPa–3 tur- 3° kenar kısmı X200 b) 4GPa–3 tur- 3° merkez kısmı X200 c)4GPa–3 tur- 5° kenar kısmı X200 d) 4GPa–3 tur- 5° merkez kısmı X200 e)4GPa–3 tur- 10° kenar kısmı X200 f) 4GPa–3 tur- 10° merkez kısmı X200.	74
Şekil 9.43 a) 4GPa–5 tur- 3° kenar kısmı X200 b) 4GPa–5 tur- 3° merkez kısmı X200 c)4GPa–5 tur- 5° kenar kısmı X200 d) 4GPa–5 tur- 5° merkez kısmı X200 e)4GPa–5 tur- 10° kenar kısmı X200 f) 4GPa–5 tur- 10° merkez kısmı X200.	75

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Nikelin tane boyutuna göre bazı mekanik özellikleri.....	5
Çizelge 8.1 Mg alaşımlarının tanımlanmasında kullanılan kodlar.....	42
Çizelge 8.2 Dövme Mg alaşımlarının kimyasal kompozisyonları.....	44
Çizelge 8.3 Dövme Mg alaşımlarının mekanik özellikleri.....	45
Çizelge 8.4 Dövme Mg AZ80 alaşımının teknik özellikleri.....	46
Çizelge 9.1 Dövme Mg AZ80 alaşımının kimyasal kompozisyonu.....	49
Çizelge 9.2 Isıl işlem görmüş 3GPa yük altında 2° / dakika burulmuş numunelerin çapları boyunca sertlik analizi.....	70
Çizelge 9.3 Isıl işlem görmüş 5GPa yük altında 2° / dakika burulan numunelerin çapları boyunca sertlik analizi.....	72
Çizelge 9.4 Isıl işlem görmüş 4GPa yük altında burulan numunelerin çapları boyunca sertlik analizi.....	76

ÖNSÖZ

Günümüzde, otomotiv, sağlık ve uzay sanayisinde kullanılan malzemelerden istenilen en önemli özellikler, başta hafiflik sonra ise dayanımdır. Hafifliği ile ön plana çıkan bir malzemenin aynı zamanda da yüksek mekanik özelliklere sahip olması, fazlasıyla istenen bir durumdur. Bu nedenle bu tip malzemelere çeşitli işlemler uygulanarak, istenilen özelliklerin optimum seviyede olması sağlanır. Malzemelerin mukavemetlerini arttırmak amacıyla uygulanan en etkili yol ise tane boyutunun küçültülmesidir. Tane boyutunu küçültmek amacıyla son zamanlarda kullanılan birçok SPD (aşırı plastik deformasyon) metodu bulunmaktadır. SPD metotlarından en önemlileri ise ECAP (eşit açısız kanal basma), HPT (yüksek basınç-burulma), TE (bükme ekstrüzyonu)' dir.

Teknolojide her geçen gün bu tip üstün özellikteki malzemelere olan ihtiyaç artmaktadır. Magnezyum, $1,74 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahip, bilinen en hafif metallerden birisidir. Hafifliği ile ön plan çıkan bu malzemenin, aşırı plastik deformasyon yöntemleri ile mukavemetinin artırılmasıyla üstün özellikli bir yapı haline getirilebilmektedir. Yapılan araştırmalar göstermiş ki, nano ölçüdeki magnezyumda hidrojen depolamak, çevre için olumlu yönde etkili olmaktadır. Otomotiv endüstrisinde, SPD ile şekillendirilmiş malzemeler hakkında, hafif ve dayanıklı yapılar sayesinde daha fazla yolcu konforu ve güvenliğinin elde edileceği düşünülmektedir. Bu çalışmanın HPT üzerine olmasının başlıca nedenleri olarak, yukarıdaki etkenleri sıralayabiliriz. Tüm bunların yanı sıra, erasmus öğrenci değişim programı ile gitmiş olduğum "TU Clausthal" da (Almanya) yapmış olduğum tüm çalışma imkânlarının var olması göz ardı edilemez.

Tüm bu verilerin ışığı altında yapmış olduğum bu çalışmada, bana her türlü desteği veren danışman hocam Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU' na, Clausthal Teknoloji Üniversitesi' nde yine bana çalışmalarımda danışmanlık yapan, hocam Prof. Dr. Lothar WAGNER' e, Almanya'daki bütün çalışmalarımda yanımda bulunan ve her türlü teknik desteği sağlayan Dr. Sang Bong YI' ye, maddi manevi hiçbir zaman desteğini benden esirgemeyen aileme ve son olarak varlığıyla bana hep güç veren değerli yol arkadaşım, eşim Zeynep ARPAÇAY' a sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

MAYIS 2009

Doğan ARPAÇAY

MAGNEZYUM AZ80 ALAŞIMINDA YÜKSEK BASINÇ-BURULMA İŞLEMİNİN MİKROYAPI ve MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Doğan ARPAÇAY

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi

Bu çalışmada, High Pressure -Torsion (HPT) işleminin Mg Az80 (7,9 Al-0,5 Zn – 0,2 Mn %) alaşımının mikro yapısındaki değişimi, mekanik özelliklerine ve tane küçülmesine olan etkisi incelenmiştir. DeneySEL verilerin ışığı altında, öncelikle çalışmamıza normal şartlar altında elde edilmiş, ortalama tane boyutu 10 mikron olan Mg Az80 numunesi ile başlanmıştır. Ardından, normalizasyon işlemi uygulanarak, ortalama tane boyutu 30 mikron olan Mg Az80 numunesi ile devam edildi. Oda sıcaklığında uygulanan çeşitli varyasyonlardaki HPT işlemleri sonrasında tane yapısındaki küçülme ve mekanik özelliklerin değişimi incelemeye alındı. Bu çalışmada uyguladığımız presleme yükleri 0–5 Gigapascal ve burulma değerleri ise 0–15 kez tam burulmadan ibarettir. Deneyler sonrasında elde edilen numuneler, çeşitli numune hazırlama işlemlerinden sonra, mikro yapılarının incelenmesi amacıyla TEM ve optik metal mikroskoplarda, mikro sertliklerinin incelenmesi amacıyla da mikrovickers sertlik ölçüm cihazı vasıtasıyla, değerlendirmeye alınmıştır. Tane boyutunun, 15 tur burulan numunelerde 100 nm’ nin de altında olduğu, sertliğinde ortalama 81 HV’ den 125 HV’ ye kadar arttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nano malzemeler, Aşırı Plastik Deformasyon \ Severe Plastic Deformation (SPD), Yüksek Basınç-Burulma \ High Pressure-Torsion (HPT), Magnezyum Mikro yapı

JÜRİ:

1. Prof. Dr. Adem Bakkaloğlu
2. Prof. Dr. Ahmet Ünal
3. Prof. Dr. Ayşegül Akdoğan Eker

Kabul tarihi: 05.06.2009
Sayfa Sayısı: 82

THE EFFECT OF HIGH PRESSURE-TORSION APPLICATION on MICROSTRUCTURE and MECHANICAL PROPERTIES of AZ80 MAGNESIUM ALLOY

Doğan ARPAÇAY

Matelurgy and Material Engineering, M.S. Thesis

In this study, the microstructure evolution, mechanical properties and grain refinement during high pressure torsion on the mechanical properties of AZ80 magnesium alloy is examined. Due to the experimental datas, we started with Mg AZ80 that was produced under superior conditions and had ~10 mikrons grain size firstly. After that we applied the other Mg AZ80 sample that was normalized by heat treatment and had 30 mikron grain size. We examined grain refinement and mechanical properties evolution with using different HPT variations at room temperature. In this work our pressure values were 0–5 Gigapascal and were torsions values are also 0–15 times turns. The specimens that were obtained after the HPT was prepared for investigation of microstructure with TEM and optical metal microscopy and also for investigation of microhardness with microhardness test equipment and finally all results were considered. The grain size of specimens that was turned 15 times, was determined by under 100 nm. At the same time the average hardness of sample was turned 15 times increased from 81 HV to 125 HV.

Keywords: Nanomaterials, Severe Plastic Deformation (SPD), High Pressure-Torsion (HPT) Magnesium, Microstructure

JÜRİ:

1. Prof. Dr. Adem Bakkaloğlu
2. Prof. Dr. Ahmet Ünal
3. Prof. Dr. Ayşegül Akdoğan Eker

Kabul tarihi: 05.06.2009
Sayfa Sayısı: 82

1. GİRİŞ

Şuana kadar yapılan çalışmalar göstermiştir ki; aşırı plastik deformasyon metoduyla elde edilen yapılar, polikristal özellikte ve tane boyutları ise mikron seviyesinde daha da düşük, nano boyutlardadır. Burada elde edilen tane boyutlarının, geleneksel termo-mekanik yöntemlerle elde edilmesi güçtür.

Günümüzde birçok aşırı plastik deformasyon metotları bulunmaktadır. Fakat bunların içerisinde geleceği en parlak iki metot dikkat çekmektedir. Bu metotlar sırasıyla ECAP ve HPT' dir. Genelde bu yöntemler arasından, ECAP işlemi, üretiminin kolay olması ve daha fazla malzemeye cevap vermesinden ötürü tercih edilmiştir. Fakat HPT işleminin, ECAP işlemine karşın iki önemli üstünlüğü göze çarpmaktadır. Bunlardan ilki, daha küçük boyutlarda tanelerin elde edilmesi, ikincisi ise yapı içerisinde yüksek açılı tane sınırları teşkil etmesidir.

Önemi her geçen gün daha iyi anlaşılan bu çalışmaların derlenmesi ve takibinin daha iyi yapılması amacıyla 2002 yılında Avusturya' da kurulan bir organizasyon olan; NanoSPD komitesi, belirli aralıklarla konferanslar düzenlemektedirler. Bu konferanslarda, sınırlı sayıda ortaya çıkan çalışmalar değerlendirilmektedir. Bu çalışmalarda elde edilen veriler, yapılacak olan bir sonraki çalışmalara kaynak teşkil ederek devam etmektedir.

Özellikle HPT ile ilgili geçmişe dönük yapılan araştırmalarda, fazla bir kaynağın olmadığı aşikârdır. Düzenlenen NanoSPD konferanslarında sunulan çalışmaların, yazılan birkaç makalenin dışında bulunabilecek kaynak sayısı çok kısıtlıdır.

2. NANOMALZEMELER

Eğer atomu ufak bir misket olarak düşünürsek, kompleks bir molekül bizim yumruğumuz kadar diyebiliriz. Bunu biraz daha açmak istersek; atomlar bakterilerin 1/10000 büyüklüğündedir. Bakteriler ise bir sivrisineğin 1/10.000 kadarıdır. Atom çekirdeği atomun kendisinin 1/100.000 kadarıdır. Atomla çekirdeği arasındaki fark ise bir ateşle nükleer reaksiyon arasındaki fark gibidir.

Yunancada “nanos” tan gelen nano sözcüğü “cüce” anlamına gelmektedir. Şimdi ise cüce bir kenara atılmış ve atomik boyutlarda metrenin milyarda birine tekabül eden ölçü birimi olan ve terminoloji kitaplarına yeni bir anlam ifade eden nanometre ortaya çıkmıştır.

Boyutları 1 ile 100 nm arasında değişen malzeme tozlarının bir araya getirilerek oluşturdukları ileri teknoloji malzemelerine nano malzemeler denilmektedir.

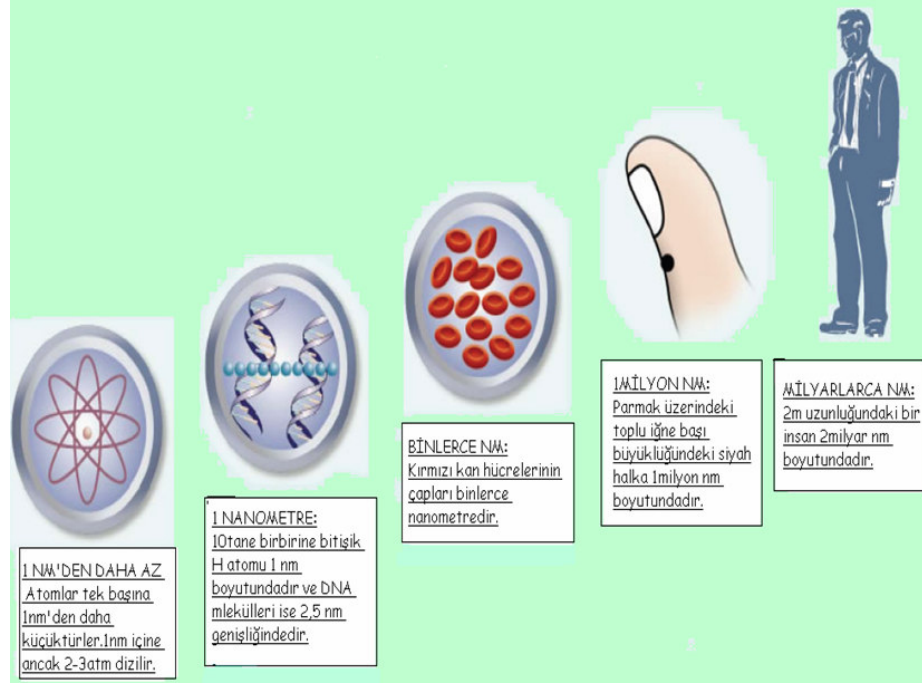


Şekil 2.1 Nano malzemenin içyapısı.

Nano malzemeler, tane boyutlarının metrenin milyarda biri ölçülerinde üretilmesiyle elde edilen malzemelerdir. Bunlar yapısal olan ve yapısal olmayan uygulamalarda çok kullanışlı ve etkileyici özellikler gösterirler.

Tüm malzemeler, atomların bir araya gelmesiyle oluşan tanelerden meydana gelirler. Bu taneler genellikle gözle görülemeyecek kadar ufak boyutlarda olmaktadır. Klasik malzemeler 100 μm (mikron)’ den milimetreye kadar tane boyutuna sahiptirler. 1 mikron, metrenin

milyonda birine denk gelmektedir (10^{-6}). Nano malzemeler ise metrenin milyarda biri büyüklüğündeki tanelerden oluşurlar (10^{-9}).



Şekil 2.2 Nanometrenin diğer büyüklükler ile karşılaştırılması (Bakkaloğlu, A., 2007).

Önümüzdeki 20 yıl içerisinde nano malzemeler ile ilgili bilimsel, teknik ve mühendislik çalışmalarından beklentiler, klasik malzemelerin özelliklerinin ve uygulamalarının gelişmesine, yeni teknoloji alanlarının ortaya çıkmasına neden olacak niteliktedir. Nano malzemeler metal, seramik, organik moleküler topluluk, polimerik ya da kompozit malzemeler olabilir.

Nano malzemelerin birçok özelliği diğer malzemelere göre çok üstündür. Örneğin çeliğin gerinme değeri yaklaşık 5 GPa iken karbon nano tüplerle destekli bir nano malzemenin gerinme değeri yaklaşık olarak 130 GPa' dır. Yine aynı malzemenin yoğunluğu çeliğin yoğunluğunun 1/ 4' ü kadardır. 3 mm çapındaki karbon nano tüp destekli bir çelik kablo 41 tona kadar yük taşıyabilmektedir. Şekil faktörü dediğimiz mukavemet/ağırlık oranı çelikte 1.7 civarındayken nano tüp destekli malzemedede yaklaşık 1.5' tir.

2.1 Nano Malzemelerin Genel Özellikleri

Nano malzemelerin başlıca özelliği çok küçük tane boyutlarına sahip olmasıdır. Gösterdiği tüm üstün özellikleri bu boyutlara borçludur.

Nano malzemelere ait özellikleri genel olarak şu şekilde sıralamak mümkündür:

- Çok küçük tane boyutuna sahip olmaları
- Yüksek aşınma dayanımı
- Düşük sıcaklıklarda ve daha kısa zamanlarda sinterlenebilme
- Kırılgan malzemelerin şekillendirilebilmesi
- Yüksek korozyon dayanımı
- Son boyuta şekil verme zamanının çok kısa sürelerle indirilebilmesi
- Yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılık, sağlamlık ve yumuşaklık
- Kimyasal olarak yüksek aktiflik
- Yüksek mukavemet
- Klasik malzemelere kıyasla yüksek şekillendirilebilme kabiliyeti
- Yüksek elektrik ve manyetik özellikler

Nano malzemelerin, mekanik, optik, manyetik, elektriksel ve kimyasal özellikleri; onların boyut ve yapılarının tümüyle değişmesiyle birlikte yeni özelliklere dönüşmektedir. Malzemelerin kazandıkları yeni yapı ve işlevlerle birlikte yeni üretim süreçleriyle şekillenen malzemeler üretilmektedir.

2.2 Nano Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Nano malzemelere ait mekanik özellikleri genel olarak şu şekilde sıralamak mümkündür:

- Yüksek aşınma dayanımı
- Yüksek korozyon dayanımı
- Yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılık, sağlamlık ve yumuşaklık
- Kimyasal olarak yüksek aktiflik

- Klasik malzemelere kıyasla yüksek şekillendirilebilme kabiliyeti

Nano kristalli metallerin mekanik özelliklerinin deneysel çalışmaları, tane boyutunun dayanımına(genellikle sertlik ölçümleri ile tayin edilir) ve daha küçük bir boyuta ve elastik davranışa yoğunlaşmıştır.

Metallerde tane boyutu küçüldükçe mukavemet artar. Nano malzemelerde çok küçük tane boyutlarından dolayı mekanik özelliklerde büyük iyileşme sağlanır. Aşağıda, nikelin tane boyutuna göre değişen, mekanik özellikleri gösteren bir tablo yer almaktadır.

Çizelge 2.1 Nikelin tane boyutuna göre bazı mekanik özellikleri.

Özellikler	20 μ m-Ni	100 nm-Ni	10 nm-Ni
Akma Muk. (Mpa)	103	690	>900
Son Çekme Muk. (Mpa)	406	1100	2000
Vickers Sertliği	140	300	650

Prof. Weertman'ın özellikle bakır ve palladium üzerinde yaptığı çalışmalar gösteriyor ki; eğer tane boyutu 50 nanometre civarında olursa, malzemenin dayanımı sıradan malzemeye göre 2 kat artabilmektedir. Bu şekilde sadece tane boyutunun kontrolü ile 5 kat daha dayanımlı malzemeler üretmek mümkündür. Bunun sebebi olarak; önceden artan toplam tane sınırları miktarının dislokasyonların hareketini daha etkin bir şekilde engellemesi akla gelse de, bu mekanizmanın nano malzemelerde oldukça farklı olduğu görülür. Özellikle transmisyon elektron mikroskop incelemeleri, taneciklerin dislokasyonların oluşturduğu gerilmeleri desteklemeyecek kadar küçük olmasından dolayı, dislokasyon yoğunluğunun çok düşük olmasına, bunun da yüksek dayanıma neden olduğunu ortaya koymaktadır.

Boşlukların, çatlakların ve diğer kusurların varlığı, dayanım ölçümlerini önemli derecede etkiler. Örneğin, sentez işlemi ilerledikten sonra, nano kristalli Cu'nun sertliği büyük bir yükselme gösterir.

Birçok nano kristalli yapıların küçük boyutlu olmalarından dolayı, sertlik ölçümleri, dayanım çalışmalarını sınırlar. Hata engelleri, dayanım değerleri için sıklıkla verilirken, dayanımı tayin eden tek bir tane boyutu olmamasına rağmen, tane boyutları nadiren, fakat tüm bir alanda bir hayli görünürler. Hatta tane boyutu dağılımları elde edildiğinde, frekansların miktarı olarak çoğunlukla diyagram çizilir. Daha gerçekçi ses frekanslarına dönüştürüldüğünde, diğerlerine göre daha az büyüklükte, etkili taneler göze çarpar.

Nano malzemelerin mekanik özellikleriyle ilgili birçok soru halen yanıtlanamamaktadır. Özellikle yüksek ve düşük sıcaklıklardaki deformasyon mekanizması bilinmemektedir. Bu alandaki en önemli araştırma problemleri sentez ve işleme alanlarında karşımıza çıkmaktadır. Yoğun, hatasız, yüksek saflıkta ve yeterli miktarda nano kristal malzemeler üretilip mekanik testler yapılana kadar ölçüm sonuçları dâhili özellikler yerine harici etkenler tarafından belirlenecektir. Yüksek sıcaklık uygulamalarında tane boyutlarını kontrol altında tutmak ve bu sayede süneklik, şekil alabilirlik ve dayanım özelliklerinin doğru dengesini yakalamak için çok miktarda çalışma yapılması gerekmektedir.

Bu zor problemlerin varlığına rağmen nano kristal malzemeler, dayanım ve süneklik özelliklerinin ince şekilde ayarlanabildiği mikro yapılara sahip yeni malzemelerin üretiminde kullanılabilir. Bunun yanında, malzemeleri nano ölçekte yapılandırmak, tane sınırları, dislokasyonlar ve deformasyonlarla ilgili temel fikirleri test edebilmemizi sağlar.

2.3 Nano Malzemelerin Günümüzdeki ve Gelecekteki Endüstriyel Uygulamaları

Nano malzemeler, nadir bulunan ve yararlı kimyasal, mekanik ve fiziksel özelliklere sahiptirler. Bu nedenle nano malzemeler birçok alandaki uygulamalarda kullanılmakta ve dikkat çekici sonuçlar elde edilmektedir.

Nano malzemelerin genel olarak kullanım alanları aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Nano malzemelerin genel kullanım alanları.

Nano malzemelerin kullanım alanlarını daha ayrıntılı bir şekilde incelemek istersek, karşımıza şu alanlar çıkmaktadır:

- Nano İnce Filmler
- Nano Karbon Tüpler (KNT)
- Anorganik Nano tüpler
- Nano Elyafılar
- Nano Tozlar
- Fullerenler
- Dendrimerler
- Kuantum Noktaları
- Biyomalzemeler

Nano malzemeler kullanılarak yapılan çeşitli endüstriyel uygulama örnekleri şunlardır:

- İleri Jenerasyon Bilgisayar Çipleri

Mikro elektronik endüstrisi; devreler, transistörler, kapasitörler ve resistörler gibi önemli parçaların boyutlarının minimize edilmesi çalışmaları üzerinde durmaktadır. Bu sayede; bu

parçalardan oluşan mikro işlemcilerin daha hızlı çalışmalarına olanak sağlanmaktadır. Ancak birçok teknolojik engel de söz konusudur. Yüksek hızlarda çalışırken oluşan sıcaklığın büyük bir kısmı dağıtılamamaktadır, yani kısacası güvenlik sorunu mevcuttur. Nano malzemeler yüksek saflığa, daha iyi ısı iletkenliğe, uzun ömürlü olmaları ve birbirlerine olan kuvvetli bağlarından dolayı bu sorunların üstesinden gelinmesinde endüstriye yardımcı olacaklardır.

- Öldürücülüğü Geliştirilmiş Kinetik Enerji Penetratörleri

Savunma sanayii; düşmanın zırhlı araçlarını ve güçlü hedefleri vurmak için uranyum (DU-depleted uranium) kullanıyor. Ancak uranyum radyoaktif, patlayıcı, toksik ve kullanan kişiler üzerinde öldürücü etkiye sahip bir maddedir. Ancak hedef üzerindeki darbe üstünlüğün yerini alabilecek patlayıcı ve tehlikeli olmayan bir ikamesinin bulunmamasından dolayı kullanılmaktadır. Nano kristalli ağır tungsten alaşımları, sahip oldukları deformasyon karakteristikleri ve tane sınırı kayma mekanizmalarından dolayı hedef üzerinde keskin bir yeteneğe sahiptir. Bu sebepten dolayı, bu malzemeler, uranyum yerine değerlendirilen önemli bir adaydır.

- Daha İyi Yalıtım Malzemeleri

Nano malzemeler, sol-gel yöntemiyle köpüğe benzeyen ve aerogel adı verilen yapılara sentezlenir. Bunlar gözenekli ve çok hafiftirler. Ağırlıklarının 100 katına kadar dayanıklıdırlar. Aerogel, içlerinde hava veya diğer gazları hapsedebilen 3 boyutlu ve devamlı parçacıklardan oluşur. İçerideki hava veya gazlarla birlikte bu malzemeler ev ve ofis başta olmak üzere birçok yapıda yalıtım malzemesi olarak kullanılabilir. Isıtma ve soğutma giderlerinde etkileyici bir düşüşe sebep olur, çevre kirliliğinde azalmaya yardımcı olur. Bunun yanında parlak güneş ışığına göre kararıp aydınlanan akıllı pencerelerde kullanılabilir.

- Yüksek Parlaklığa Sahip Televizyonlar

Televizyon veya bir monitörün çözünürlüğü piksel boyutlarına bağlıdır. Bu pikseller, katot ışın tüplerinde elektron dalgalarıyla vurulması sonucu ışık veren ve fosfor denilen

malzemelerden üretilmektedir. Pikselin ya da fosforların boyutlarının küçültülmesi çözünürlüğü artırır. Çinkoselenit, çinkisülfid gibi malzemeler çözünürlük arttırmak için kullanılacak önemli malzeme adaylarıdır. Nano fosforların kullanılması bu uygulamaların maliyetlerinde ve herkes tarafından sahip olunabilecek yüksek çözünürlüklü televizyonların üretilmesinde tasavvur eder.

- Ucuz Flat-Panel Görüntü Cihazları

Flat-Paneller laptop endüstrisinde büyük bir markete hakimdir. Ancak bu konuda yaptıkları araştırma ve geliştirme çalışmaları ile Japonya, pazara hâkim durumdadır. Bu cihazların çözünürlüğünün artırılması ve maliyetlerinin azaltılması, nano kristalli fosforların sentezlenmesi ile mümkün olabilmektedir. Bunun yanında bu malzemelerle yapılan cihazlar, klasik malzemelerle yapılan geliştirilmiş modellerine karşın daha fazla parlaklık, netlik ve yüksek karşıtlık sağlamaktadır.

- Daha Dayanıklı Ve Sert Kesici Takımlar

Tungsten karbid, tantal karbid ve titanyum karbid gibi nano malzemelerden yapılan kesici takımlar rakiplerine karşın, daha sert, dayanıklı, yüksek korozyon dirençli ve uzun ömürlüdürler. Bununlar birlikte imalat hızında artışa, maliyetlerde düşmeye sebep olurlar. Elektronik endüstrisinde, devrelerin minimize edilmesinde dayanıklı ve çok ufak boyutlu matkaplara ihtiyaç vardır ve bu ihtiyaç nano kristalli karbid malzemelerden yapılan mikro matkaplarla karşılanabilir.

- Kirletici Maddelerin Eliminasyonu

Üstün kimyasal özelliklerinden ve tane boyutlarından dolayı nano malzemeler, otomobil katalitik konverterlerinde ve elektrik jeneratörlerinde çalışmaları sırasında, yakıt ve kömür yaktıklarından dolayı ortaya çıkan karbon monoksit ve nitrojen oksit gibi çevreye zararlı gazların tutulmasında etkili olabilirler.

- Yüksek Enerji Kapasiteli Piller

Klasik ve şarj edilebilir piller, elektrik enerjisi ihtiyacı olan tüm uygulamalarda kullanılır. Ancak bu pillerin enerji kapasiteleri çok kısıtlı olmakla beraber, sürekli şarj edilmeleri gerekir. Sol-Gel yöntemiyle yapılmış nano kristalli Nikel metal Hibrid (Ni-MH) den yapılmış piller çok daha yüksek kapasitede enerji saklayabilmekte ve sürekli şarj edilmesine gerek yoktur. Bunun sebebi köpüğe benzer aerogel yapıda olmaları ve tane sınırlarının yoğunluğundan dolayı yüksek enerji depolayabilmeleridir.

- Yüksek Enerjili Mıknatıslar

Artık mıknatıslama ve manyetik doyma değerleri mıknatısların kuvvetini belirlemektedir. Bu değerler tane boyutlarının azalması ve yüzey miktarının artması ile birlikte artış gösterir. Nano kristallerden yapılmış Yttrium-Samarium-Kobalt parçacıkları görülmemiş mıknatıslama özellikleri göstermektedirler. Bu mıknatıslar, otomobil, denizaltı, gemi motorları ve medikal uygulamalarda kullanılabilir.

- Daha Duyarlı Sensörler

Sensörlerin duyarlılıkları birçok parametreye bağlıdır. Bunlar; elektriksel direnç, kimyasal aktiflik, manyetik geçirgenlik, ısı iletkenlik ve kapasitans olarak sıralanabilir. Sensörlerin kimyasal yapılarındaki değişimin meydana gelmesiyle algılama durumu ortaya çıkmaktadır. Zirkonyum' dan yapılmış karbon monoksit sensörlerde, karbonmonoksitin zirkonyumdaki oksijen atomlarına olan ilgisi ile zirkonyumoksiti indirgemesi duyarlılık göstermektedir. Nano malzemelerden yapılmış sensörler sayesinde, sensörlerin duyarlılıkları büyük ölçüde arttırılabilmektedir.

- Daha Yüksek Yakıt Tasarruflu Otomobiller

Otomobiller bilindiği gibi büyük miktarlarda benzin yakarak çalışırlar, hem çevre kirliliğine sebep olurlar hem de benzinin tamamını da yakamazlar. Klasik bir buji, benzini tamamıyla ve

verimli olarak kullanmak üzere dizayn edilmemiştir. Nano malzemeler sahip oldukları üstün özelliklerin fark edilmesinden beri buji olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerden yapılan elektrotlar, benzinin daha verimli yakılmasını ve bujilerin uzun ömürlü olmalarını sağlamaktadır. Şu an 'Railplug' adı verilen bir buji üzerinde çalışmalar yapılmaktadır, henüz prototip aşamasındadır. Bu buji, 'Railgun' denilen bir teknolojiden türetilmiştir. Bunlar yaklaşık olarak 1 kJ/mm² enerjiye sahiptirler ve verimleri çok yüksektir. Bu sebepten dolayı yakın zamanda otomobillerde hiçbir parçada aşınmaya veya oksitlenmeye sebep olan parçalar bulunmayacaktır. Otomobiller, çalıştırılmaları sırasında büyük miktarda enerji harcarlar ve kayıp enerji miktarları da çok fazla olmaktadır. Bu durum çoğunlukla dizel araçlarda ortaya çıkar. Otomobillerdeki silindirlerin zirkonya ve alimüna nano kristalli seramiklerle kaplanması ile bu sorun ortadan kaldırılabilir; böylelikle yakıttan büyük miktarda tasarruf sağlanabilir.

- Geliştirilmiş Uçak Ve Uzay Araçları Parçaları

Havacılıktaki ciddi risklerden dolayı üretilen parçaların uzun ömürlü, dayanıklı ve sağlam olması gereklidir. Önemli anahtar özelliklerden bir tanesi parçanın yaşına bağlı olarak azalan yorulma dayanımıdır. Yorulma dayanımı tane boyutunun küçülmesiyle artış göstermektedir. Nano malzemelere bakıldığında tane boyutlarından dolayı klasik malzemelere göre %200-300'e varan daha yüksek yorulma dayanımı gösterirler. Bunun yanında nano malzemelerden yapılmış parçalar daha sağlamdır ve daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilmektedirler. Bu sayede uçaklar daha verimli ve hızlı uçabilmektedir. Uzay araçlarında çok önemli bir kıstas olan yüksek sıcaklıklara dayanım nano malzemelerle karşılanabilmektedir. Roket ağız kısımlarında ve mekiklerin yüzey kaplamalarında bu malzemelerden yararlanılabilir.

- Silah Endüstrisi

Kimyasal yöntemlere göre çalışan klasik silahlarda maksimum atış hızı yaklaşık olarak 1.5-2.0 km/sn civarındadır. Diğer tarafta railgunlar ve elektromanyetik ateşleyiciler elektrik enerjisi kullanarak çalışırlar ve ateşleme hızları yaklaşık 10 km/sn kadardır. Aradaki bu artışın sebebi kinetik enerjideki farklılıkla açıklanabilir. Yüksek enerji demek, daha fazla tahrip gücüne sahip olmak da demektir. Bu sebeplerden dolayı railgunları geliştirmek üzere bir dizi

alışmalar yapılmaktadır. Bu silahların ateşleme sırasında yüksek enerjiye ihtiyaçları oldukları kadar, sağlamlık, bükülmemek gibi önemli diğer ihtiyaçları da vardır. Ateşleme mekanizması için genelde bakır kullanılmaktadır. Ancak bakır yüksek sıcaklıklarda çalışmalara elverişli değildir. Bakırın rakibi olarak nano kristalli tungsten bakır ve titanyumdiboridden yapılmış nanokompozit malzemesi kullanılabilir. Bu malzeme, istenilen elektrik iletkenlik, yeterli ısıl iletkenlik, yüksek dayanım ve rijitlik gibi özellikleri vermektedir. Bu özelliklerinden dolayı silahlar çok daha uzun süreli ve verimli kullanılabilir.

- Uzun Ömürlü Uydular

Uydular hem sivil hem de askeri amaçlı olarak kullanılmaktadır. Bunlar, dünyanın uyguladığı çekim kuvvetinden dolayı konumlarını muhafaza etmek ya da yerlerini değiştirmek için itici roketlerden yararlanırlar. Uyduların ömürlerini, taşıdıkları yakıt miktarı tayin eder. Taşıdıkları yakıtın 1/3'ünü yeryüzünden uzaya yollamada ve yörüngeye oturmada kullanırlar. Ateşleyicilerin tam verimle çalışmamasından dolayı, yakıtın hepsi verimli olarak da kullanılmaz. Tungsten-Titanyumdiborid-bakır nanokompozitten yapılmış ateşleyiciler sayesinde, yakıttan yüksek verim elde edilebilir. Böylece uyduların ömrü arttırılır.

- Uzun Ömürlü Medikal İmplantlar

Kalp kapakçıkları gibi vücudumuzda kullanılan implant malzemelerin birçoğu titanyum ve paslanmaz elik alaşımlarından imal edilir. Bu malzemeler biyolojik uygunluk göstermeleri ve insan dokusuyla reaksiyona girmediklerinden dolayı tercih edilirler. Bu ortopedik yapılar oldukça gözeneksizdirler. Bir implantın doğal davranabilmesi için etrafını saran dokunun içine nüfuz etmesi gerekir ki bu da implantın dayanımını ortaya koyar. İnsan dokusu implanta nüfuz edemediğinden, etkinliklerinde azalma meydana gelir. Bu sebepten dolayı bunların sürekli değiştirilmesi gerekebilir ve bu işlemler çok pahalı ve zor ameliyatları gerektirir. Buna karşın; nano kristalin zirkonya dayanıklı ve biyolojik uyuma sergileyen bir malzemedir. Üstelik sol-gel yöntemi ile üretilmesi durumunda gözenekli aerogel yapıya sahip olurlar. Bu durum implantın uzun süre kullanılmasını sağlamakla beraber yeni cerrahi müdahaleleri de ortadan kaldırır. Örneğin nano kristalin silisyum karbid (SiC), alternatif kalp kapakçığı

malzemesidir; çok dayanıklı, uzun ömürlü ve sağlamdır. Üstelik biyolojik dolgularla reaksiyona girmezler.

- Yumuşak ve İşlenebilir Seramikler

Seramikler, sert, kırılgan ve şekillenmesi çok zor malzemelerdir. Bu özelliklerinden dolayı bazı uygulamalarda kullanımlarını sınırlamaktadır. Ancak tane boyutlarını küçülterek seramik kullanım oranını büyük ölçüde yükseltebiliriz. Zinkonyanın nano yapıda imal edilmesi ile sert ve kırılgan olan yapısı, sanki bir süper plastikmiş gibi davranış sergiler(boyunun yaklaşık %300 'ü kadar uzaması). Bunun dışında silisyum nitrit gibi nano seramikler, sergiledikleri iyi biçimlendirilme ve işlenme özelliklerini mükemmel kimyasal ve mekanik özelliklerle kombine ettiklerinden, otomobil endüstrisinde, yaylar, filtreler ve bilyeli yataklarda kullanılmaktadırlar. Ayrıca bunlar yüksek sıcaklıkta çalışan fırınlarda da kullanılırlar. Klasik seramiklerin preslenip sinterlenmesinin mümkün bile olmadığı düşük sıcaklıklarda preslenip sinterlenebilirler.

- Nano Malzemedan Bisikletler

2005 Fransa Bisiklet Yarışı' nda ilk karbon nano tüp iskeletli bisiklet kullanılmıştır. Artık aynı teknoloji BMC marka bisikletlerde tüketiciyle buluşuyor. İskelet ağırlığı yaklaşık olarak 1055 gram kadar, yani 5 tane cep telefonu ağırlığından daha azdır.

2.4 Nano Malzemelerin ve Nanoteknolojinin Avantajları

Nano teknolojinin önemi, atomlar ve moleküller seviyesinde (1 ila 100 nanometre (nm)) çalışarak, gelişmiş ve/veya tamamen yeni fiziksel, kimyasal, biyolojik özelliklere sahip yapılar elde edilmesine imkân sağlamasından kaynaklanmaktadır. Teknik açıdan açıklamak gerekirse, malzeme özellikleri ve cihazların çalışma prensipleri, genel olarak 100 nm'den büyük boyutları temel alarak yapılan varsayımların sonucunda ortaya çıkarılmış geleneksel modelleme ve teorilere dayanmaktadır. Kritik büyüklükler 100 nm'nin altına indiğinde ise geleneksel teori ve modeller, ortaya çıkan özellikleri açıklamakta çoğu zaman yetersiz kalmaktadır.

Nano teknoloji işte burada devreye girmektedir. Daha sağlam, daha kaliteli, daha uzun ömürlü, daha ucuz, daha hafif, daha küçük cihazlar geliştirme isteği birçok iş kolunda gözlenen eğilimlerdir. Minyatürizasyon olarak tanımlanabilecek bu eğilim birçok mühendislik çalışmasının temelini oluşturmaktadır. Minyatürizasyonun sadece kullanılan parçaların daha az yer kaplamasından çok, daha önemli getirileri de vardır. Minyatürizasyon üretimde daha az malzeme, daha az enerji, daha ucuz ve kolay nakliye, daha çok fonksiyon ve kullanımda kolaylık olarak uygulamada kendini göstermektedir.

20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren birçok endüstride kullanılan toleranslar sürekli iyileştirilmiş, üstün kalite anlayışı geliştirilmiştir. Mikroteknoloji ürünü olarak tanımlayabileceğimiz parçalar, otomobil, elektronik, iletişim gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılır olmuştur. Günümüzde ise mikro teknolojilerden daha küçük teknolojilerin, nano teknolojinin kullanımı yaygınlaşmaktadır.

Nano teknoloji sayesinde sanayide, bilişim teknolojilerinde, sağlık sektöründe ve daha birçok alanda yeni ürünler geliştirilecek, günümüzün üretim süreçleri ve yöntemleri değişecektir. Bu teknolojiye yatırım yapılan ülkelerde ekonomik değerler yaratılacak ve toplumların yaşam kalitesi gelişecektir (Tekinbaykal D., Oğuz M., 2008)

2.5 Nano Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Nano yapılar elde edilmesinde iki ana yöntem bulunmaktadır. Aşağıdan yukarıya (bottom-up) ve yukarıdan aşağıya (top-down) olarak adlandırılan bu iki yaklaşımı şu şekilde özetleyebiliriz:

2.5.1 Bottom-up Yöntemi

Aşağıdan yukarıya yaklaşımı (küçükten büyüğe), moleküler nano teknolojiyi belirtir ve organik veya inorganik yapıları, maddenin en temel birimi olan atomlardan başlayarak atom atom, molekül molekül inşa edilmesi yöntemini ifade eder.

2.5.2 Top-down Yöntemi

Yukarıdan aşağıya yaklaşımı (büyükten küçüğe), makineler, asitler ve benzeri mekanik ve kimyasal yöntemler kullanılarak nano yapıların fabrikasyonu ve imal edilmesi yöntemlerini ifade eder.

Teknolojinin bugünkü seviyesi sebebi ile yapılan çalışmaların birçoğu yukarıdan aşağıya (top-down) klasmanında değerlendirilir (<http://www.nanoturk.com>).

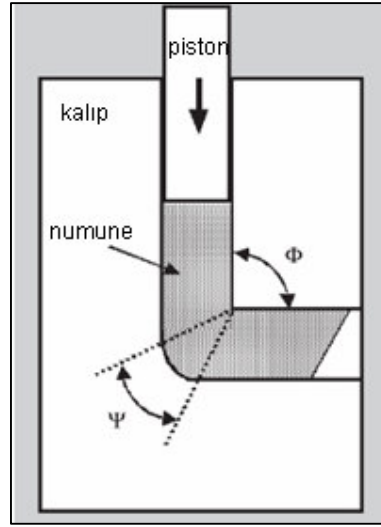
3. ŞİDDETLİ PLASTİK DEFORMASYON (SPD – SEVERE PLASTIC DEFORMATION) PROSESLERİNİN TEKNİKLERİ

Ultra ince taneli yapıların, şiddetli plastik deformasyonu ile işlenmesine olan ilgi son yıllarda artış göstermiştir. Yapılan araştırmalar son yıllarda hızla geliştirilmesine karşılık, malzeme biliminin bu alt dalı, bunun tam tersine zayıf bir biçimde olduğu yerde kalmıştır. Araştırmaların terminolojisinin ayırımı yapılırken iki önemli devre dikkate alınmıştır. İlki ince tane yapılı malzemeler, ikincisi ise aşırı plastik deformasyon metodudur. Ultra ince taneli yapılı malzemeler polikristal malzemeler olarak bilinir. Polikristal malzemelerin karakteristiklerinden bahsedilmek istenirse; ortalama tane boyutları 1µ' un altındadır. Yani bazı malzemelerde 100–1000 nm arasında tane boyutu gözlenirken, bundan daha az oranlarda 100 nm' ninde altında tane boyutları mevcuttur. Ultra ince taneli yapılı malzemeler için, tane içerisindeki yüksek yanlış yönlenme açılarına sahip tane sınırlarına, çoğunluğu ile beraber makul derecede eşeksenli, oldukça iyi homojen yapıya ihtiyaç vardır. Uygulamada, gelişmiş ve benzersiz özellikler elde etmek için yüksek açılı tane sınırlarının, geniş kesimlerinin var oluşları çok önemlidir. Aşırı plastik deformasyon uygulaması, malzemeler üzerinde çok yüksek gerilim oluşturabilen, metal şekillendirmenin çeşitli deneysel prosedürlerine ilişkilendirilir. Bu prosedürler, malzemede istenilen tane küçülmesine yol açarlar. Aşırı plastik deformasyon uygulamasının benzersiz bir yönü, çalışma parçasının boyutsal ölçümlerinde herhangi bir değişiklik olmaksızın, yüksek gerilimin parça üzerine uygulanmasıdır. Diğer bir yönü ise, malzemenin serbest akışını önleyen ve öylece belirgin bir hidrostatik basınçla üretim yapmayı sağlayan özel kalıp geometrisiyle şeklinin bozulmamasıdır. Uygulanan hidrostatik basınç aslında yüksek gerilimi başarmak ve beklenen tane küçülmesi için yüksek yoğunlukta lattice hataları üretmek içindir.

SPD işleminin prensipleri, numunelerin başlangıç boyutlarının makul seviyede saklanıldığı HPT, TE ve MDF gibi işlemlerde kanıtlanmıştır. Fakat SPD prosesi, şiddetli gerilimin zorla kabul ettirilmesini içermesine rağmen, ovalama, tel çekme gibi birçok geleneksel şekillendirme yöntemini de dışarıda tutmuştur. SPD işleminin uygulamasıyla, yapısında farklı yönlerdeki 1000' in üzerinde tane barındıran ultra ince taneli malzemeler, göreceli olarak kolay bir biçimde üretilir.

Ultra ince taneli yapıları içeren malzemeler, mikrometre seviyesinden de daha düşük tane içerdiklerinden ötürü genel olarak NanoSPD malzemeleri olarak dizayn edilirler. SPD işlemi için şu an birçok teknik bulunmaktadır. Ultra ince taneli yapıli malzemelerinin üretimi için tespit edilen asıl metotlar HPT, TE, MDF, ECAP, ARB, CEC, RCS' dir. (Zhu, Y. T., 2006) .

3.1 Eşit Kanal Açısıl Basma (ECAP - Equal-Channel Angular Pressing)



Şekil 3.1 Eşit kanal açısıl basma.

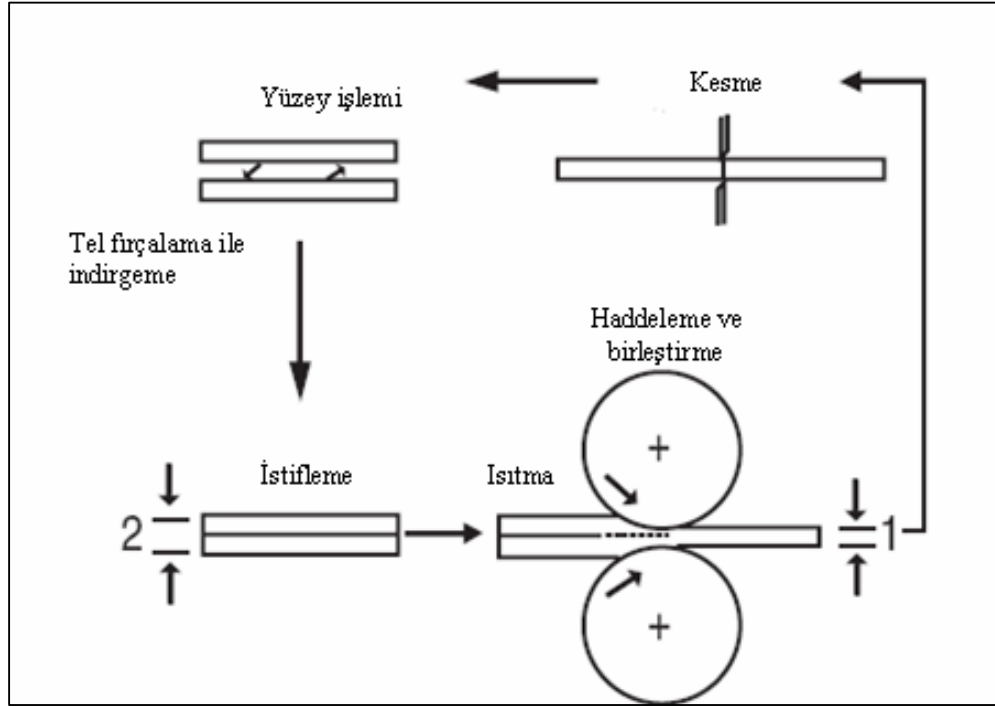
Bu işlem, SPD alanında en fazla geliştirilen tekniktir. Yukarıda görüldüğü üzere yuvarlak şeklindeki çubuk, keskin bir açıya sahip bükük kanallı kalıbın içerisinde malzemeye presle uygulanmaktadır. Çubuk, kanalın her iki parçasının kesişme noktasından geçtiği anda zorlama meydana gelmektedir. Çubuk, çapraz geçiş yapan ölçülerinden dolayı değişmeden kalabilmekte ve böylece uygulanan preslemelerle beklenen yüksek gerilimler elde edilebilmektedir. İşlemin genel formülü ise aşağıdaki gibidir:

$$\varepsilon = (N/\sqrt{3})[2\cot\{(\Phi/2)+(\Psi/2)\} + \Psi\operatorname{cosec}\{(\Phi/2)+(\Psi/2)\}] \quad (3.1)$$

Burada ε eşit gerilimi, Φ dış kavis açısını, Ψ kesişme açısını ve N ise toplam geçiş sayısını vermektedir. Tekrarlanan presleme işlemleri esnasında, gerilim kalıp içerisinde eninde

sonunda ultra ince taneli yapı elde etmek amacıyla biriktirilir. Uygulamada, farklı kayma sistemleri, her geçiş arasında dönen kalıp boyunca ortaya çıkarılabilir (Zhu, Y. T., 2006).

3.2 Toplayıcı Haddemeyle Bağlama (ARB - Accumulative Roll-Bonding)



Şekil 3.2 Toplayıcı haddemeyle bağlama.

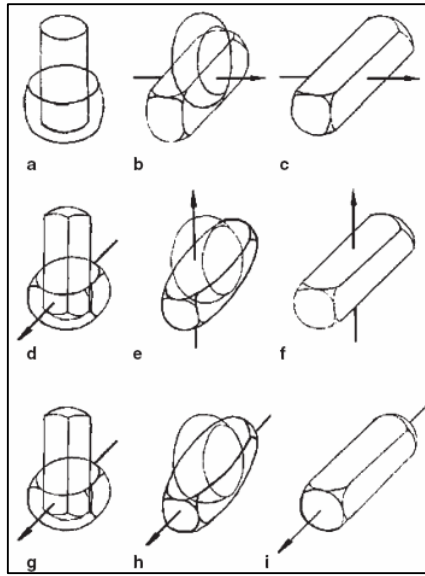
Şiddetli plastik deformasyonun bu tekniği, geleneksel haddeme tekniklerini kullanır. Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere, bir tabaka kalınlığı, tek bir tabaka kalınlığına gelecek şekilde ön haddeme işlemi öncesinde hazırlanıyor. Haddelenmiş tabaka, sonradan yığılmış beraber bulunan iki tabaka olarak kesilir. Haddeme esnasında iyi bir bağlama işlemini başarmak için, her iki temas yüzeyi indirgenmeli ve birbirlerine temas ettirilmeden önce yüzeyleri tel fırça ile temizlenmelidir. Daha sonra birbiri üzerine yerleştirilmiş tabakalar tek bir yarım parça olacak şekilde haddelenmelidir. Bu şekilde haddeme, kesme, fırçalama ve birleştirme işlemleri sırasıyla tekrarlanmalıdır. İşlem sonunda tabaka içerisinde birleştirme işlemi için şiddetli gerilimler oluşturulmalıdır. Bu işlem için de gerilim N kadar turdan sonra

$$\varepsilon_N = 0.80N \text{ olarak belirlenir.}$$

(3.2)

Uygulamada, ARB işleminde üç boyutlu işlemten ziyade, tıpkı bir kek yapısı gibi yanal yönlerde uzama göstererek, ultra ince taneli yapıların üretimini gerçekleştirmektedir. Bu mikro yapısal kısım, metal veya alaşımın çeşidine bakmadan, aynıdır. Ayrıca bu işlem karışık tozlarla tabakalandırılmış ve işlenmiş metal matrisli kompozitlerin üretiminde de uygulanabilir (Zhu, Y. T., 2006).

3.3 Çok Yönlü Dövme (MDF - Multi-Directional Forging)

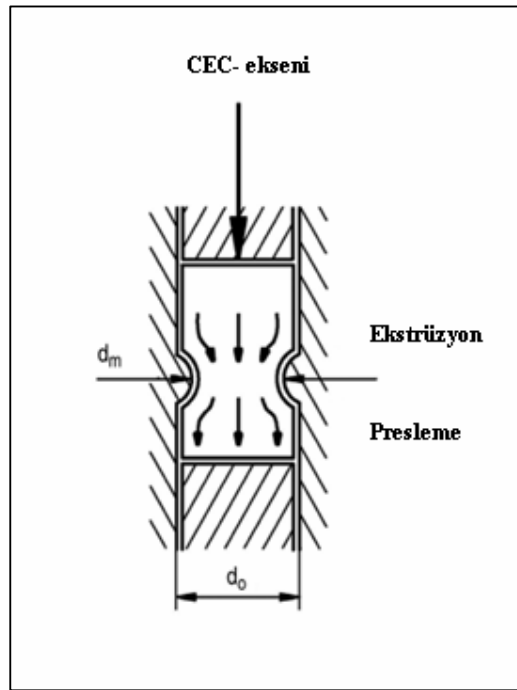


Şekil 3.3 Çok yönlü dövme.

Çok yönlü dövme işlemi, 1990' lı yılların ilk yarısında, dökme kütük yapısı içinde, ultra ince taneli yapılar elde etmek amacıyla uygulanmıştır. Çok yönlü dövme prosesi, genellikle tek faz yapısına sahip metal ve alaşımlarının, dinamik yeniden kristalleşmelerine ilişkilendirilmektedir. MDF işleminin çalışma prensibi, yukarıdaki şekilde belirtilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere; a, b ve c ilk eksen boyunca ayarlama ve çekmeyi göstermekte d, e ve f ise ikinci eksen boyunca ayarlama ve çekmeyi göstermektedir. Son olarak, g, h ve i ise üçüncü eksen boyunca ayarlamayı ve çekmeyi göstermektedir. MDF işlemi, uygulanan yükün değişen eksenleri ile beraber ayarlama ve çekme işlemlerini içeren serbest dövmenin çok yönlü olarak tekrarlanabilmesi olarak farz edilir. Gerilimin homojenliği, çok yönlü dövme işleminde, ECAP ve HPT işlemlerinden daha az oranda üretilir ama bu metot kırılğan malzemelerin, artan sıcaklıklar kullanılarak işlenmesinden çok, nano yapıli malzemelerin

üretmesinde kullanılabilmektedir. Ayrıca, kalıpta özel yüklemelere nispeten daha az gerek duyulmaktadır. Deformasyonun kendisine has sıcaklık ve gerilim değerlerinin seçimi, arzu edilen tane küçülmesini sağlamaktadır. Bu işlem genellikle, ergime sıcaklığının (T_m) 0.1–0.5 aralığında uygulanmaktadır ve geniş ölçülerdeki nano kristal yapıları kütüklerin üretimi için de faydalıdır(Zhu, Y. T., 2006).

3.4 Periyodik Ekstrüzyon ve Presleme (CEC- Cyclic Extrusion and Compression)



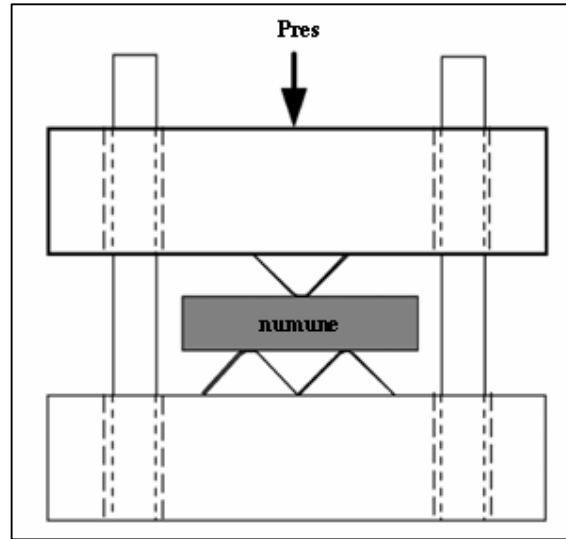
Şekil 3.4 Periyodik ekstrüzyon ve presleme.

Periyodik ekstrüzyon ve presleme işlemi, aynı zamanda hourglass pressing, yani kum saati presleme işlemi olarak da bilinmektedir. Bu işlem, malzemenin, d_0 çapındaki bir silindirik daireden, diğer bir d_m çapına sahip eş eksenli daireden geçirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Şekilden anlaşılacağı üzere, bu işlem itme ile beraber ekstrüzyona ve daire içerisinde prese sebebiyet vermektedir. Buradaki pres ilk pres, ardından gelen ikinci kısımdaki pres ise son ve final pres olarak bilinmektedir. Bu gerilim bir çevirim, şu formülle hesaplanır:

$$\Delta \epsilon = 4 \ln (d_0/d_m) \quad (3.3)$$

İkinci turda ise ekstrüzyon yönü terstir ve bu, deformasyon modunun aynı sırada olmasına sebebiyet verir. İşlem N kez numunenin geri ve dışa doğru ittirilmesi ile gerçek gerilimin ($N\Delta\epsilon$) elde edilmesi için tekrarlanabilir ve $d_m/d_o \approx 0.9$ çap oranı ile tek bir turda malzeme içerisinde maruz bırakılan gerilim değeri $\Delta\epsilon \approx 0.4$ tür. 90° a kadar birikmiş asıl gerilim 10 mm çapında ve 25 mm boyundaki numunede görülmüştür. Deformasyon hızı genellikle numunenin <5 K olan ısınma limitinde olsun diye ~ 0.2 mm/s olarak belirlenmektedir. Bu metotla elde edilen gerilimlerin, diğer tek yönlü aşırı plastik deformasyon yöntemlerine göre daha fazla olmasına rağmen, gerilmenin periyodik karakterine bağlı olarak ekstra dislokasyonların yok edilmesinden dolayı, mekanik özellikleri ve mikro yapıları benzerdir (Zhu, Y. T., 2006).

3.5 Tekrarlayan Kıvrırma ve Doğrultma (RCS - Repetitive Corrugation and Straightening)

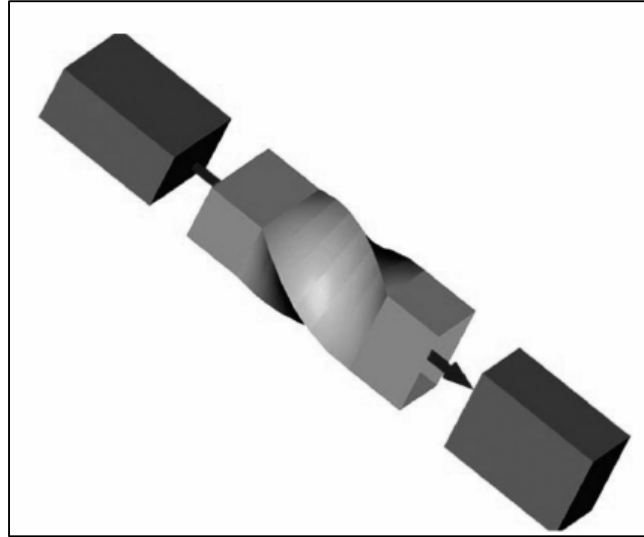


Şekil 3.5 Tekrarlayan kıvrırma ve doğrultma.

Tekrarlayan kıvrırma ve doğrultma işlemi son yıllarda ortaya çıkmıştır ve yukarıdaki şekilde olduğu gibi bir sisteme sahiptir. Tekrarlanan iki adımlı işlem sırasında, çalışma parçası kıvrırma şeklini almak için ilk başlangıç deformasyonuna maruz kalır. Sonrasında birçok kez tekrarlanabilen periyodik işlemle beraber iki düz tabakanın arasında doğrultulur. Şekilde de gösterildiği üzere bu işlem, çalışma parçasının eğik yüzeyler sayesinde tane küçülmesinin

daha da ileri aşamalara gitmesine izin verir. Tekrarlayan kıvrırma ve doğrultma işlemiyle 760 μ tane büyüklüğüne sahip bakır bir numunenin, nano yapıya sahip olması sağlanır. Benzer işlemler alüminyumun da tane yapısının küçültülmesi için kullanılabilir. Bu işlemin bir avantajı da günümüz haddeleme teknolojisine çok kolay bir biçimde adapte olabilmesidir. Doğrultma dişleriyle yapılan işlemin bugün, haddeleme tezgâhlarında haddeler arasında yapılabilmesi çok zor değildir. Bu anlamda, bu prose, nano yapı malzemeler üretmek için gerekli potansiyele sahiptir. Fakat bu işlem, önceki aşamalarıyla beraber nano yapı malzemelerin üretimi için geliştirilmeye ihtiyaç duymaktadır. Bu işlemdeki kritik diğer bir konu da, kalıp dizaynına ve işlem programının gelişimine ihtiyaç duymasındır (Zhu, Y. T., (2006)).

3.6 Bükme Ekstrüzyon (TE - Twist Extrusion)

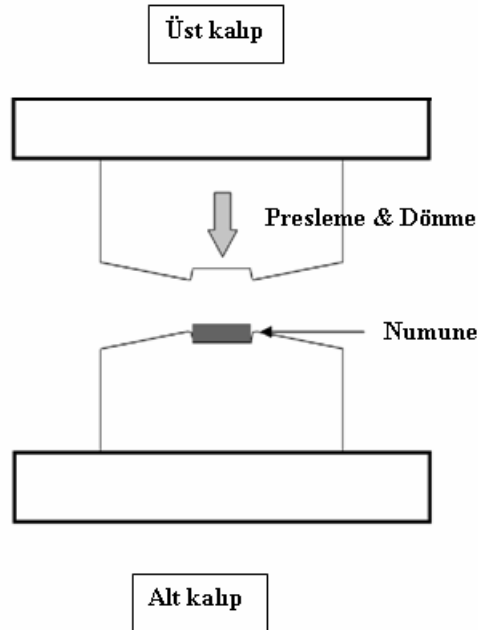


Şekil 3.6 Bükme ekstrüzyon.

Bükme ekstrüzyonunun tane küçültmek amacıyla kullanımı 2004 yılında karşımıza çıkmaktadır. Yukarıdaki şekilde bükme ekstrüzyonunun çalışma prensibi verilmiştir. Şekil bize çalışma parçasının işleme girmeden önceki, işlem sırasındaki ve işlem sonrasındaki yapısını açıkça göstermektedir. Bükme ekstrüzyonu sırasında, çalışma parçası ekstrüzyon kalıbı boyunca ittirilir. Ekstrüzyon kalıbının enine kesiti, dizayn edilen açıyla beraber numune boyunca şeklini ve ölçüsünü sürdürebilir. Sonuç olarak, çalışma parçası, bükme ekstrüzyonu

sonrasında şeklini ve ölçülerini yeniden kazanabilmektedir. Böylece, mükemmel bir tane küçülmesi için bu işlem tekrarlanabilir. Enine kesit çeşitleri mümkün olmasına rağmen dairesel geometriler bu prosesle mümkün değildir. Uygulamada bu işlem HPT' ye benzer özellikler göstermektedir. HPT' de olduğu gibi plastik gerilim, enine kesit boyunca uniform değildir ve mesafeyle beraber eksen boyunca ince taneli yapının bulunduğundan daha uzak bölgeye kadar artış göstermektedir. Bu mikro yapı heterojenliği, enine kesit boyunca merkezdeki daha az dayanıma sahip bölgelerde, homojen olmayan mekanik özelliklere yol açmaktadır. Artan bükme ekstrüzyon geçişiyle bu heterojen yapının ortadan kalkacağı tahmin edilmektedir (Zhu, Y. T., 2006).

3.7 Yüksek Basınç - Burulma (HPT - High Pressure – Torsion)



Şekil 3.7 Yüksek basınç-burulma.

HPT işlemi, karşılıklı olan iki kalıbın arasına yerleştirilen disk şeklindeki numuneye, presle beraber dönme hareketi uygulanarak, numunenin basınç altında tane boyutunu küçültmeyi amaçlayan SPD metodu olarak bilinmektedir. HPT işleminde kullanılan kalıplarda biri, presi

ve dönme hareketini numune üzerine etki ettirirken, diğeri ise sabit kalarak işlem sırasında numunenin akışını engellemeye çalışmaktadır. Bu sayede, numune içerisindeki tanelerin numunenin orta kısmından kenar kısmına doğru hareket etmesi ve aynı anda da küçülmesi sağlanmaktadır. Kalıplar arasında işlem gören numuneden dışarı doğru bir malzeme kaybı yok ve numune kalınlığı sabit kalır ise, asıl gerilim şu şekilde hesaplanır:

$$\gamma = (r/h)\varphi \quad (3.4)$$

Burada γ gerçek gerilimi, φ burulma açısını, r diskin merkezi ile kenar kısmı arasındaki mesafeyi, h ise numunenin kalınlığını vermektedir. Eğer, iki kalıp arasındaki malzemeden kayıp ve numunenin kalınlığında bir değişiklik olduğunu düşünürsek, alternatif bir bağlantıdan söz etmek mümkündür. Diğer SPD metotlarıyla kıyaslandığında gerçek gerilim ε şu şekilde hesaplanabilir:

$$\varepsilon = (1/a) \gamma \quad (3.5)$$

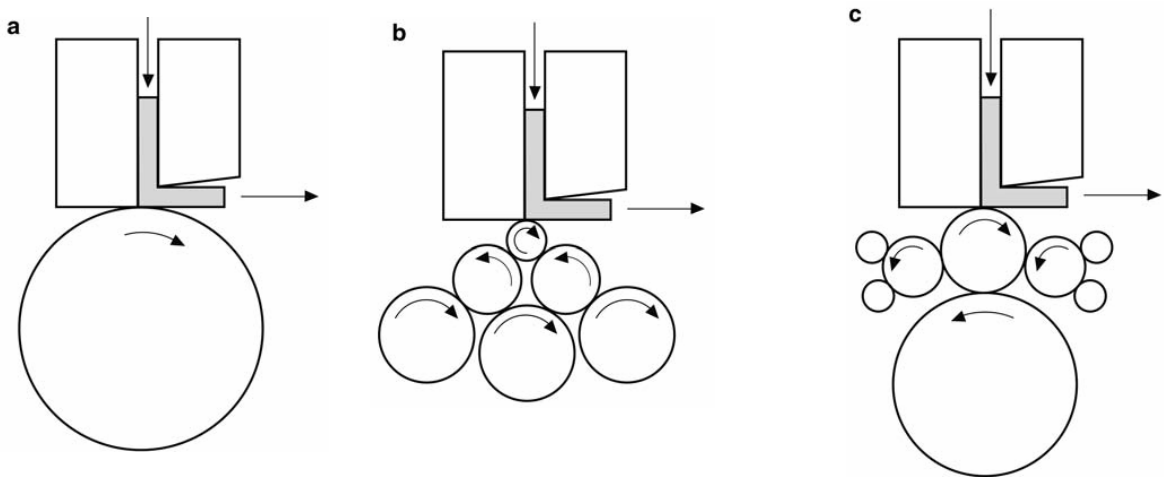
Buradaki a katsayıdır ve farklı iki teoriye göre bu değer 2 (Tresca teorisi) veya $\sqrt{3}$ (Mises teorisi) olarak değişir.

Bu işlemde kullanılan presleme oranları, genelde 0,5 GPa ile 8 GPa arasında değişirken dönme oranları makinenin kapasitesine bağlı olarak max.15 tam tur olarak belirlenebilir. Burada kullanılacak disk şeklindeki numunenin kalınlığı 0,8 mm ile 3 mm arasında değişmektedir. Yine aynı numunenin çapı ise 10 mm ile 20 mm arasında seçilebilir (Zhu, Y. T., (2006)).

4. YENİ AŞIRI PLASTİK DEFORMASYON (SPD - SEVERE PLASTIC DEFORMATION) METOTLARI

Aşırı plastik şekillendirme işlemlerinde, ihtiyaç duyulan yüksek gerilim değerlerini elde etmek için birçok yeni yol önerilmiştir. Bunlardan ilki ECAP işlemindeki düzeneğe değişmeyen geleneksel kalıbın yerine iç, dış veya her iki köşenin olduğu yerlere kalıpların konulmasıdır. Diğer metotlar, ECAP işleminin bazı özelliklerinin, gerilimin malzemenin deformasyonunda kullanılması için paylaştırılmasını öngörür. Bu özellikler, küçültme dönüşü ve taşıma haddemesi için ters çevirilmiştir. Bu yöntemler, tekrar eden periyotlarla malzemeyi deforme edebilen ve tekrar eski şeklini koruyabilen işlemlerde de kullanılabilir. Bu yeni yöntemler, mümkün olan endüstriyel uygulamalar için birçok potansiyel faydayı barındırmaktadır. Sağladığı faydalar ise kısaca, alternatif ve geniş bir malzeme boyutu kullanım imkânı, daha düşük kalıp yükleri, daha kolay yağlama imkânı, otomatik veya elle bazı parçaların şekillenmesi ve bazı durumlarda işlemin devam edebilmesi potansiyelini taşımaktadır. Bu yukarıdaki öneriler ve uygulamalar, alternatif SPD metotları için yeni çalışmalar ile beraber, yeni incelemelerin yapılmasına teşvik sağlayacağı umulmaktadır (Alexander, David J., 2007).

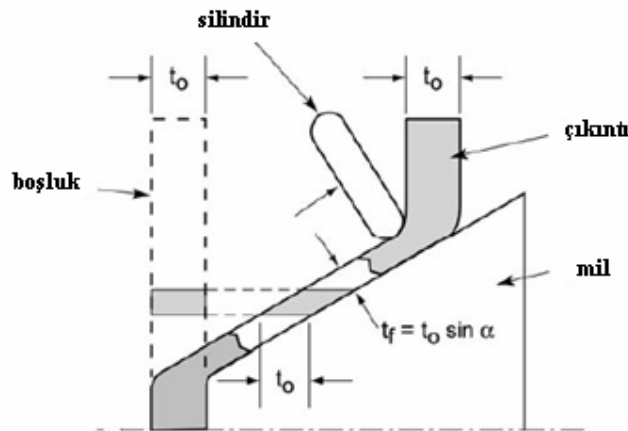
4.1 Dönen Kalıp ile Eşit Kanal Açısız Basma (Equal-Channel Angular Pressing with Rotating Tooling)



Şekil 4.1 Dönen kalıpla eşit kanal açısız basma.

Dönen kalıpla eşit kanal açısı basma prosesi, geleneksel eşit kanal açısı basma prosesine benzerdir. Numune, kanalın ağzına itici bir gücün yardımıyla ittirilir ve kanalın çıkışından alınır. Deformasyon, yine her iki kanalın kesiştiği bölgede işlevini gerçekleştirmektedir. Tek fark ise sabit olan kalıplardan birinin yerine dönen kalıp yerleştirilmesidir. Döner bu kalıp çıkış köşesine, giriş köşesine veya her iki köşeye yerleştirilebilir. Çıkış bölgesine konulan döner kalıplar, tek başına veya daha küçük olmaları şartıyla birden fazla olarak çalışabilirler. Konulan bu kalıplar, numunenin kalınlığını, tıpkı başlangıçtaki gibi aynı oranda tutmak için yerleştirilirler. Geleneksel metotta olduğu gibi, numunenin arzu edilen gerilime sahip olması için tekrar preslenmesine imkân bu sayede verilebilmektedir. Bu metodun birçok çeşidi mümkündür; işlem, ister aralıklı olarak, istersek de sürekli olarak gerçekleştirilebilir. Şekil 4.1’ dende anlaşılacağı üzere; ilk şekilde (a) en basit metot olarak gösterilmektedir. Burada sadece tek bir döner kalıp kullanılmıştır. İkinci ve üçüncü şekilde (b ve c) ise kullanılan küçük döner kalıp kümelerini göstermektedir. Burada, yöntemin sürekli veya aralıklı olması ise tamamen deformasyon bölgesine beslenen numuneye bağlıdır. Sürekli işlem bu üç şekilde de kullanılabilir. Aralıklı yöntem ise sadece döner kalıpların hızına bağlı olacağından küçük döner kalıplı sistemlerde daha uygun olduğu düşünülmektedir (Alexander, David J., 2007).

4.2 Ters Çevirip Kıvrarak İnceltme (RSS - Reversed Shear Spinning)



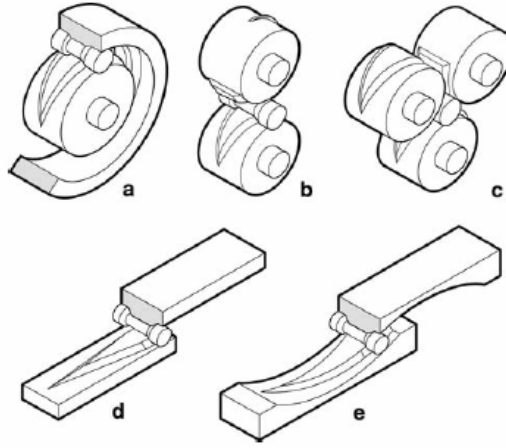
Şekil 4.2 Ters çevirip kıvrarak inceltme.

Tane küçültmek için gerekli olan yüksek gerilimi veren başka bir yeni metot daha bulunmaktadır. Bu metot, kıvrarak inceltme olarak bilinir ve kıvrım şekillenmesi, kıvrım dövmesi, inceltme şekillenmesi, akarak şekillenme veya kıvrım gücü olarak da teknik literatürde yerini almıştır. Bu metot, aslında birçok yöntemi olmasına rağmen dönebilen simetrik ve konik parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Şekilden de anlaşılacağı üzere bir silindir yardımıyla numune mil üstüne yatırılarak şekillendirilmektedir. Buradaki başlangıç boşluğunun kalınlığına ve koni açısına bağlı olan, arzu edilen sabit duvar kalınlığındaki silindir boşluğu aşağıdaki formülle izah edilir:

$$t_f = t_0 \sin a \quad (4.1)$$

t_f son kalınlık, t_0 orijinal boşluğun kalınlığı, a ise koni hacmidir (Alexander, David J., 2007).

4.3 Tel veya Çubuk Malzemenin Çapraz Haddelenmesi (Transverse Rolling of Rod or Bar)



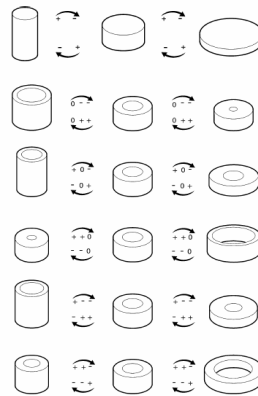
Şekil 4.3 Tel veya çubuk malzemenin çapraz haddelenmesi.

Çapraz takozla haddeleme, metal çubuk numunenin etrafını dönerek kendine has şekli yuvarlanması veya düz olan kalıpların şekillendirmesi olarak bilinen bir işlemdir. Bu kalıplar ismini aldıkları takoz şekillerini içerirler. Bu anlamda, birçok takoz şekli bulunmaktadır. Eğer ki silindir kullanılırsa, bu takozlar da aynı doğrultuda çalışarak numune üzerinde hareket ederler. Bu işlemde hem iki hem de üç silindir kullanmak mümkündür. Düz kalıplar kullanıldığında, çalışma parçasının tam tersi yönünde hareket ederler. Ayrıca bu sistemin içerisinde, tek başına çalışan büyük ve sabit dişlilere sahip silindirlerle beraber, iç büken

kalıplar da kullanılabilir. Yukarıdaki şekillerde a) iç büken kesimi; b) iki silindiri; c) üç silindiri; d) düz kalıbı ve e) iç büken kalıbı göstermektedir (Alexander, David J., 2007).

4.4 Silindir ve Halka Numuneler için Tekrarlanan Periyodik Deformasyon (Repetitive Deformation Cycles for a Cylinder or Annulus)

Önceleri bu metot, kübik ve silindirik parçalara uygulanmıştır. Çünkü kübik ve silindir parçalar dövme işlemiyle beraber yüksek gerilim değerlerine sahip olabiliyorlar. Fakat bugün birçok metot, her iki şekildeki parçaların deformasyon işlemi sonrasında tekrar eski hallerini alabilmesini sağlayabilmektedir. Silindirik parçalar, dış çaplarını arttırmak ve azaltmak amacıyla şekillendirilirler. Bütün bu deformasyon işlemleri süresince, çalışma parçasının kalınlığı göreceli olarak artar veya azalır. Böylece, üzerinde düşünülen kalınlıktaki ve dış çaptaki değişiklikleri tanımlamak istersek, katı silindir için sadece iki tane deformasyon yolunun olduğunu söyleyebiliriz. Bunlar; (+ -), (- +) dış çaptaki artışı, aynı zamanda da kalınlıktaki azalmayı gösteren veya tam tersini işaret eden yollardır. Aşağıdaki şekilde de bu görülmektedir. Dış çapa, iç çapa ve kalınlığa sahip halka şeklindeki çalışma parçalarının deformasyonu için de birçok metot bulunmaktadır. Bu işlemde, bu parça için her bir ölçü artabilir, azalabilir veya sabit kalabilir. Bu deformasyon, dış çap, iç çap ve kalınlık olmak suretiyle üçlü değişiklik olarak tanımlanabilir. $3*3*3=27$ tane değişik deformasyon biçimi vardır. Örneğin, bunlardan sadece birisi olan (0 0 0), numunenin ölçülerinde herhangi bir değişiklik yok anlamındadır. Bu işlemde birçok kombinasyon fiziksel olarak mümkündür. Örneğin, (+ - +) veya (- - -)' dir. (+ + +) ve (- - -) olan bu iki deformasyon biçimi ise, çok küçük gerilim sonucunda ortaya çıkan değişimin çok sınırlı oranları için mümkündür. Bunlar, çok fazla ilgi çekmemektedir. (Alexander, David J., 2007)



Şekil 4.4 Silindir ve halka numuneler için tekrarlanan periyodik deformasyon.

5. YENİ AŞIRI PLASTİK DEFORMASYON METOTLARININ AVANTAJLARI

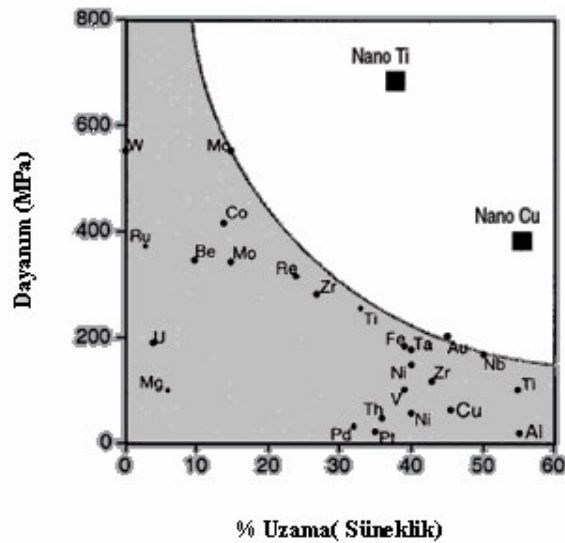
Yeni aşırı plastik deformasyon için birçok avantaj bulunmaktadır. Yeni metotlarla ECAP ve HPT' ye nazaran daha ince yapıli malzemelerin üretimi mümkündür. Ayrıca, bu yeni metotların, kullanılan numune şekilleri bakımından da birçok avantajı bulunmaktadır. Metal çubuklar, levhalar, plakalar, şeritler, silindir ve halka şeklindeki parçalar bu metotta işlenebilmektedir. İşlemler, sürekli veya kademeli olarak gerçekleştirilebilir. Var olan ve benzer metotlara yardımcı olmak amacıyla modifiye edilebilirler. Elle veya otomatik olarak hızlı bir biçimde bu tekniklere adapte olmaları söz konusudur. Bu metodun özelliklerinin çoğu açık kalıp kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Bu özellik, işlem sırasında yağlamayı kolaylaştırmaktadır. Yine bu metot, eğer gerekli ise çalışma parçasının ısıtılması ve soğutulması sırasında geleneksel metotlara da kolayca adapte edilebilir (Alexander, David J., 2007).

6. NANO YAPILI MALZEMELERİN AŞIRI PLASTİK DEFORMASYON YÖNTEMİYLE ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN TEMELLERİ

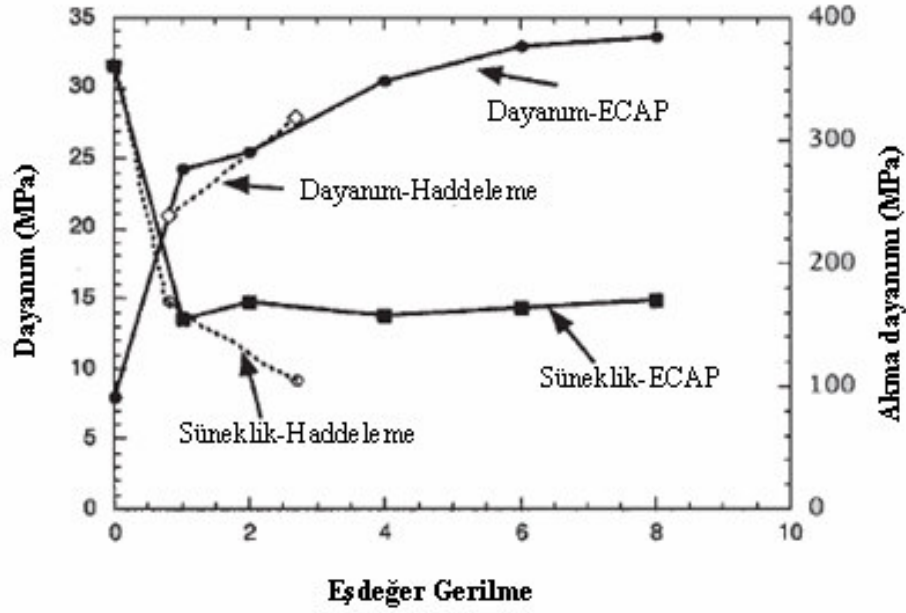
Nano yapıli malzemeler, 100 nm tane boyutunun altındaki taneleri içeren katı yapılar olarak tanımlanmaktadır. Nano yapıli malzemelerin sentezinin yapılabilmesi için iki farklı tamamlayıcı yaklaşım geliştirilmiştir. Bunlardan ilki, nano malzemelerin içerisinde bulunan nano yapı bloklarında, tek başlarına bulunan nano parçaları bir araya getirmek için geliştirilen Bottom-up, yani tabandan başlayan metottur. İkincisi ise, kaba yapıli malzemelerin şekillendirilerek, ince yapıya ulaşmasına ve nano yapının elde edilmesine imkân veren Top-down, yani üstten başlayan yaklaşım olarak bilinmektedir. En başarılı üstten başlayan yaklaşım uygulamaları, aşırı plastik deformasyon metotlarını içermektedir. Şu an için kullanılabilecek birçok SPD metodu bulunmaktadır. Bunların içerisinde en fazla geliştirilen ve gelecekteki uygulamalar için büyük bir potansiyele sahip metot ise, Eşit Kanal Açısıl Basma (Equal-Channel Angular Pressing) metodudur. Diğer önemli metot ise HPT yani yüksek basınç-burulma işlemidir. Bu işlem sayesinde, malzeme içerisinde 30 nm' den daha küçük tane elde etmek mümkündür. Ayrıca işlem sırasında, nano yapıli malzemelerin temelini daha iyi bir biçimde araştırılması amacıyla, disk şeklindeki numuneler kullanılmaktadır. SPD yöntemiyle şekillendirilen malzemelerin tane boyutları, genelde 100~1000 nm arasında değişmektedir. Fakat yapılan bir takım incelemeler, malzeme içerisindeki temel özelliklerin, dislokasyon hücrelerinin ve x-ray difraksiyon bölgelerinin 100 nm' nin de altında olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle bu metot, nano yapıli malzemelerin incelenmesi amacıyla kendine has bir metot olarak dikkat çekmektedir. Normalde bu malzemeler üstün mekanik özellikler gösterirler. Örneğin, SPD ile şekillendirilmiş nano malzemeler harika süper plastiklik, yüksek dayanım ve çok iyi süneklik özellikleri gösterirler. Nano yapıli bu malzemelerin üstün özellikleri, deformasyon mekanizmasının ve mekanik davranışların kontrol edilebildiği benzersiz mikro yapısından kaynaklanmaktadır. Bu görüş, nano yapıli malzemelerin SPD yöntemiyle şekillendirilmesinin ele alınmasına sebebiyet vermektedir. Özellikle son gelişmeler, bu malzemelerdeki deformasyon sırasındaki deformasyon mekanizmasının, mekanik özellikleri nasıl kontrol ettiğine dikkat çekmektedir (Langdon, T. G., 2004).

6.1 Dayanım & Süneklik ve Temelleri

Önceki bölümlerde tartışıldığı gibi, SPD yöntemiyle üretilmiş nano yapılı malzemeler, bu plastik deformasyon sonrasında, yüksek dislokasyon yoğunluklarına, dengesiz tane sınırlarına ve diğer yapı özellikleri ile ilişkilendirilmiş yapılara sahip olmaktadır. Yapı içerisindeki bu küçük taneler ve yüksek hata yoğunlukları, yapının kaba taneli olması durumuna göre daha fazla dayanımlı olmasına imkân vermektedir. Diğer yandan ise bu yapı özellikleri, yapının daha düşük sünekliğe sahip olmasına neden olurlar. Yüksek dayanıma sahip malzemeler, bu yapıların kimyasal özelliklerinin farklılığına, termo mekanik işlenmelerine, faz transferlerine ve diğer birçok metotlara bakılmaksızın daha düşük süneklik gösterirler. Örneğin, aşağıdaki grafikten de anlaşılacağı üzere eğrinin sol tarafındaki bütün malzemeler düşük sünekliğe sahip olmalarına rağmen nispeten daha yüksek dayanıma sahiptirler. Burada, asıl dikkat çekmesi gereken kısım ise SPD işlemi ile üretilmiş Ti (titanyum) ve Cu (bakır) numunelerinin, harika denilecek seviyede yüksek dayanım-süneklik kombinasyonuna sahip olmasıdır. SPD işlemi ile üretilmiş bu malzemelerdeki süneklik düşüşü, haddeleme, tel çekme, ekstrüzyon gibi geleneksel yöntemlerle üretilmiş bir malzemeye nazaran çok daha azdır. Örneğin, Al 3004 alaşımına sırasıyla uygulanan ECAP ve soğuk haddeleme sonrasında, dayanımları ve süneklikleri kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama ise aşağıdaki grafikte verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere artan eşdeğer gerilim ile beraber, her iki malzemenin akma dayanımında da artış gözlenmiştir (Langdon, T. G., 2004).



Şekil 6.1 Uzama-dayanım grafiği.



Şekil 6.2 Dayanım-eşdeğer gerilim grafiği.

Yukarıdaki grafikten de anlaşılabileceği üzere, bir tur ECAP geçişinden sonra, uzamadaki hata oranı %32' den %14' e kadar azalmıştır. Fakat bunun yanında, artan ECAP geçişleriyle birlikte süneklikteki düşüş çok da fazla değildir.

Soğuk haddelemede de aynı büyüklüklerde süneklikte düşüş olmaktadır. Ondan sonra da düşük hızların kullanılmasına rağmen artan haddeleme gerilimleri ile beraber süneklik, sürekli olarak düşüş göstermektedir. Sonuç olarak, ECAP prosesi, soğuk haddelemeye nazaran malzeme üzerinde daha fazla süneklik değerleri sağlamaktadır.

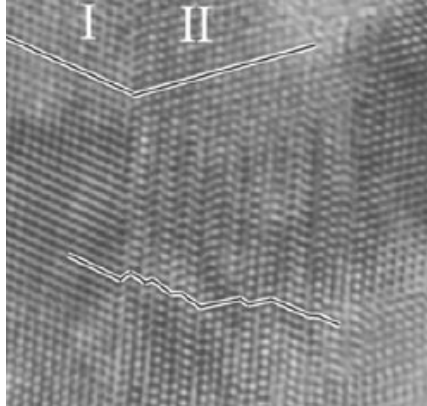
Deneyler, SPD işlemi ile üretilen malzemelerin daha üstün süneklik özelliği taşıdığını göstermektedir. Örneğin SPD işlemi uygulanmış saf bakır numuneye ECAP metoduyla 16 geçiş uygulanmış ve süneklik değerinin akma dayanımının artmasına karşılık, neredeyse kaba taneli bakırın sahip olduğu süneklik değerine yakın olduğu gözlenmiştir. Yüksek dayanım ve iyi süneklik, bir malzeme içerisinde çok nadir şekilde aynı anda bulunur. Bu uygulama, bu nedenle ileri malzemelerin uygulamaları için çok etkilidir. Fakat maalesef, nano malzemelerin mekanik özelliklerini, deformasyon mekanizmalarının belirlediğinin farkına varılmasına

rağmen, çok iyi mekanik değerlerin elde edilmesi için var olan kesin prosedürler henüz anlaşılmış değildir. Son zamanlarda, bakır numunede, çok fazla ECAP geçişlerinde düzensiz olan uzamanın işleme sertliğiyle beraber düzeltildiği bulunmuştur.

SPD yöntemiyle elde edilmiş nano yapılı malzemelerin çoğu, kaba taneli yapılara nazaran daha fazla dayanıma sahip olmalarına rağmen, daha düşük sünekliğe sahiptirler. Bu yüzden bu malzemelerin bu özelliklerinin geliştirilmesi çok önemlidir. Bir malzemenin sünekliği iki malzeme parametresiyle kontrol edilmektedir. Bunlar işleme sertliğinin oranı ve gerilimin duyarlılığıdır. SPD işlemi ile işlenmiş nano yapılı malzemelerin gerilim hız hassasiyeti, bugün tartışma konusudur, çünkü hem alçak hem de yüksek gerilim hız hassasiyeti değerlerine bir takım literatürde rastlanabilmektedir. Bu tartışma, işleme sertliğine doğru odaklanacaktır. Çekme gerilmesi altında, malzemenin plastik deformasyon kusurları makroskobik gelişimle başlamıştır. Bu olayın başlamasının ertelenmesi yüksek bir işleme sertleştirilmesiyle desteklenebilir. Sonuç olarak da bu engelleme, sünekliğin artması için yeterli olacaktır. İşleme sertleştirmesinin mekaniği, daha fazla deformasyonu daha zor hale getiren dislokasyonların bir araya gelmesi olarak bilinir, fakat SPD işlemiyle işlenmiş nano yapılı malzemelerde dislokasyon yoğunluğu çok fazladır. Doyma oranı, birçok dislokasyonu bir araya getirmek için belirgin bir biçimde düşürülmelidir. Bu nedenle, düşük sıcaklıklardaki tavlama malzemenin dayanımına çok fazla bir etki yapmadan sünekliğin artmasını sağlayabilmektedirler. Böylece tavlama, dislokasyon yoğunluğunun azalmasına yol açarken malzeme içerisinde de işleme sertliğinin ortaya çıkmasını sağlamaktadır. İşleme sertliğinin düşük orana sahip olmasının diğer bir nedeni de, tane boyutunun kritik değerlerin altında olduğu durumlarda, dislokasyonların tane sınırlarından dışarı atılması yerine, tane içerisinde uzun olmayan birikimler oluşturmalarıdır. Herhangi bir birikim olmaksızın tane sınırları gözden kaybolur. Gerçekten de SPD işlemi ve soğuk haddelemeye işlenmiş Ti (titanyum) alaşımının içerisindeki tane boyutunun 100 nm' nin altında olduğu bölgelerde sık sık serbest dislokasyonlar bulunmuştur. Doymuş dislokasyon yoğunluğu, plastik deformasyonun dengelenmesi ve yeniden yaratılmasıyla belirlenir. Bunun dışında ise, dislokasyonların yeniden kristalleşme gibi olayların arkasından, dinamik toparlanan dislokasyonlarda bu yoğunluğun belirlenmesine katkıda bulunur. Bu yüzden SPD işlemi ile işlenmiş nano yapılı malzemeler, SPD işlem sıcaklığının daha da düşük oranlarındaki sıcaklıklarda şekillendirilir. Ya da SPD işleminden daha yüksek gerilim değerlerinde deforme edilirler. İşleme sertliğinden daha yüksek süneklik versin diye, kısmen daha az toparlanma yapması umut

edilir. Bu etki, SPD işlemi sonrasında bakır, demir, titanyum gibi malzemelerde düşük sıcaklıklarda yüksek gerilim olarak gözlenmiştir.

Tane boyutunun 100 nm' nin altına indiği durumlarda, mekanik davranışların daha etkin bir rol alması için, yeni deformasyon mekanizmaları uygulanabilir. Örneğin, moleküler dinamik simülasyonlar ve deneysel gözlemler, nano yapıli malzemelerin kaba taneli yapılarına erişilemeyen mekanizmalar vasıtasıyla deforme edildiğini ortaya çıkarmıştır. 100 nm' nin altındaki tane büyüklüklerinde, tane sınırlarından kısmen dislokasyonların yayılımı, ana deformasyon mekanizması ile olmuştur. Bu yayılım, ikizlenmelerin oluşumuna ve bozulumu yol açmaktadır. Bu olayın bakır ve alüminyum numune üzerinde ortaya çıktığı önceki bilimsel çalışmalarda gözlenmiştir. Geleneksel ve kaba taneli alüminyum numunede, düşük sıcaklıklarda ve yüksek gerilimlerde bu oluşum asla açığa çıkmaz. Aşağıdaki şekil HPT işleminin sonrasında bakır numunenin, TEM görüntüleme cihazına ait bir mikro yapı resmidir. Şekilde de görüldüğü gibi I ve II bölgeleri ikizlenmeleri göstermektedir. İlginç bir biçimde II. bölge, alt tane sınırından başlayıp fakat üst tane sınırına kadar ulaşamayan, uzamış kusurları içermektedir. Böylece bu görüntü, düşük tane sınırından kısmen dışarı atılmış dislokasyonların varlığını kanıtlamaktadır.

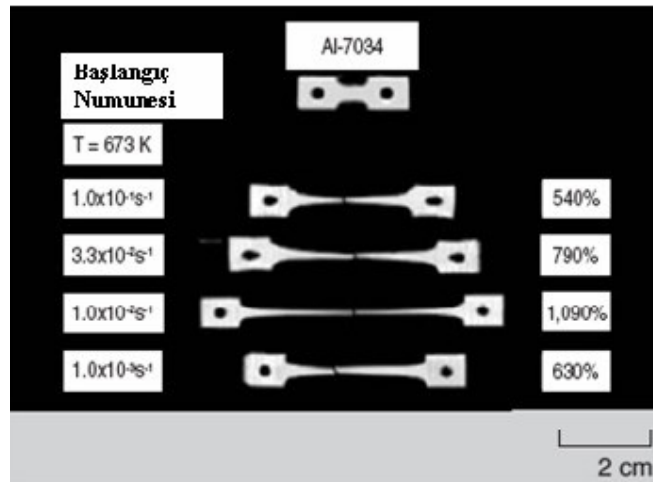


Şekil 6.3 İkizlenme örneği.

Ayrıca SPD işlemi sonrasında, yapı içerisinde sık sık, şekilsiz dislokasyonların fazlalığından dolayı dengesiz tane sınırları bulunmaktadır. Bu dislokasyonlardan bazıları, işlem sırasında tane sınırında çiftleri ayırabilir. Böylece, tane sınırları alıcı havuz gibi dislokasyon kaynağı olur. Ama bunun yanında, kısmi olarak dislokasyonlar, tane sınırlarından atomik değişimle dışarı atılırlar (Langdon, T. G., 2004).

6.2 Süper Plastiklik

Süper plastiklik, polikristal bir malzemede yüksek hızlarda uzama gösterme olarak adlandırılan bir akış prosesidir. Süper plastiklikteki uzama son bozulma olana kadar serbest boyun vererek devam eder. Akış tipi karmaşık parçaların süper plastik şekillendirilmelerinin bir karakteristiğidir. Süper plastik levhaların şekillendirilmesinde, çok yönlü eğri yüzeyler bu akışta ortaya çıkmaktadır. Süper plastik şekillendirmeyi elde edebilmek için, $10\ \mu\text{m}$ ' un altında tane boyutuna ve malzemenin ergime sıcaklığının $0.5\ T_m$ değerine ihtiyaç vardır. Süper plastik şekillendirme endüstrisi, aynı zamanda küçük ama çok etkili yapıların oluşumuyla ilgilenen uzay, mimari ve spor endüstrisine de hitap etmektedir. Nano yapı ve potansiyel olarak tane boyutunun genelde birkaç mikrometre olduğu malzemelerde, geleneksel süper plastik özellikliği, doğal limitlerin üzerindedir. Tane boyutu, bu işlemle küçülürken, süper plastik şekil verme de artmaktadır. Bu da, tane boyutunun 2 mikrondan 200 nm' ye inmesi ve şekillendirme süresinin de 20–30 dakikadan, 20–30 saniyeye inmesi anlamına gelmektedir. Düşük sıcaklıklarda tane boyutunun küçülmesi, tane içerisinde süper plastik şekillenmeye yol açmaktadır. İşlem sıcaklıklarındaki bu azalış, süper plastik şekillendirme endüstrisi için çok etkili bir özelliktir; çünkü kalıbın aşınması ile ilgili problemler bu işlemle beraber ortaya çıkmaktadır. Önceki çalışmalarda açıkça, nano yapı malzemelerde yüksek gerilim hızlarındaki süper plastiklik ve düşük sıcaklıklardaki süper plastiklik değerleri kanıtlanmıştır. Buradaki gerilim oranları, numunenin çekme deneyindeki hıza ilişkilendirilmiştir; bu hız $10^{-2}\ \text{s}^{-1}$ dir. Düşük sıcaklıklar ise $0.5\ T_m$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.4 ECAP sonrası malzemeye ait uzama değerleri (Langdon, T. G., 2004).

Önceki deneysel çalışmalarda, Zn-Al numune üzerinde 1 s^{-1} çekme hızında %2,0' den fazla uzama gözlenmiştir. Şekil 6.4, ECAP işlemi ile elde edilmiş Al 7034 alaşımına uygulanan çekme deneyi sonuçlarını göstermektedir.

Araştırmalar en fazla, nano yapılı malzemelerin ısı kararlılığı üzerine yoğunlaşmıştır. Bu kararlılık, nano yapılı malzemelerin süper plastik uygulamalarının kanıtının teşebbüsü için en önemli nokta olmuştur; çünkü difüzyon, kontrol işlemleri için gereksinim duyulan sıcaklıklarda, en azından makul seviyede kararlı olması istenen bir özelliktir. Bunun anlamı uygulamada çökelme veya ikinci faz gibi tane büyümesi oluşumunu engelleme gereksinimidir. Bunun dışında ekstra gereksinimler, yanlış yönlenmenin çok yüksek olduğu tane sınırlarının, daha yüksek açılı bölgeler haline gelme ihtiyacından ortaya çıkar ve böylece tane sınırları kayarak ara yüzeylerin en fazla olduğu bölgeler elde edilebilir. Son çalışmalarda, HPT ve ECAP gibi nano yapılı malzemelerin üretim işlemi, değiştirilemez bir tane sınırı misoryantasyon dağılımına yol açmıştır. Bu dağılım, misoryantasyon açısının 15° den küçük olduğu müstesna bölgelerde bulunmaktadır. Bu olay, diğer proseslerin manyetik tavlama gibi proseslerle birleştirilmesini keşfetmek için potansiyel bir öneri olabilir. Manyetik tavlama ise elektro kaplanmış nikeldeki gibi tane sınırlarındaki yanlış yönlenmenin rastgele dağılımını sağlar. (Langdon, T. G., 2004)

6.3 Isıl Kararlılık

Nano yapılı malzemeler, dislokasyon ve dengesiz tane sınırları gibi birçok kafes kusurlarına sahiptirler. Bu nedenle bu malzemelerin, ısıl kararsızlık üretebilecek yüksek enerjili yapılara sahip olduğu tahmin edilir. Fakat buna karşılık, uygulamada nano yapılı malzemelerin iyi seviyede ısı kararlılığına sahip oldukları görülmüştür. Örneğin, HPT işlemi sonrasındaki %99,99 saf bakır numunede oda sıcaklığında 10 nm' nin de altında taneler elde edilmiştir. Diğer bir örnek ise, ECAP işlemi ve soğuk haddeleme ile işlenmiş ticari saflıktaki titanyum numuneye uygulanan 673 K ' nin altındaki tavlama işleminde dahi, dayanımda herhangi bir değişimin meydana gelmemesidir. Bu deney gösteriyor ki; titanyum, medikal uygulamalarda başarılı bir biçimde kullanılabilir. Ayrıca bu deneylerin sonunda açıkça söylenebilir ki; düşük sıcaklıklarda yapılan tavlamlar, numunenin dayanımını aksi yönde etkilemezken, sünekliğini arttırmaktadır.

6.4 Korozyon Dayanımı

Nano yapılı malzemelerin korozyon dayanımları hakkında, bugüne kadar bahsi geçen çok fazla bir kaynak bulunmamaktadır. Ama yapılan bir deneysel çalışmada nano yapısına sahip titanyum numunenin korozyon dayanımının, kaba taneli titanyumun korozyon dayanımından daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Birçok çalışma nano yapılı titanyum ile kaba taneli titanyumun arasında korozyon dayanımı bakımından çok büyük farklılıkların olduğunu ileri sürmüştür. Nano yapılı titanyumun korozyon dayanımının arttırılması, korozyonun daha düzenli doğasına bağlı olabilir. Özellikle kaba taneli Ti' un çözünmesi sırasında, tane sınırları daha etkilidir, çünkü tane sınırları tane içine göre daha fazla enerji barındırmaktadır. Ayrıca düzensizlik tane sınırlarında daha fazladır. Bununla birlikte, nano yapılı malzeme içindeki tanelerin yüksek hata yoğunluğu içermesi, enerjiyi dengelemek için numune boyunca etkili olduğu da bir gerçektir. Bu gerçek de daha düzenli bir korozyona yol açmaktadır. Tane sınırlarındaki yüksek enerjiden ve tane içerisindeki yüksek hatadan ötürü, nano yapılı malzemede empürüte ayırımı çok daha düzenlidir. Bu da segregasyonların daha düzenli dağılmasını sağlamaktadır (Langdon, T. G., 2004).

6.5 Diğer Mekanik Özellikler

Bugüne kadar ECAP prosesi sonrasında numunelerde, çatlama tokluğu hiç araştırılmamıştır. Çünkü ölçümler, gerekli ölçüm şartlarını sağlayacak kadar geniş numunelere ihtiyaç duymaktadır. Bu olay, gelecekteki deneyler sırasında daha geniş numunelerin kullanılmasına imkân verebilir.

Sürünme dayanımı ise diğer önemli bir mekanik özelliktir. Fakat, bu konuda edinilen bilgi sınırlıdır. Yapılan ön çalışmalar, en çok SPD metotlarının, metaller üzerindeki çok daha kısa alçak çevirim yorulma ömründen ziyade, geliştirilmiş yüksek çevirim yorulma ömründen olduğunu ileri sürmüştür. Bu gözlemlerle, yüksek çevirim yorulma ömrünün dayanım ile alçak çevirim yorulma ömrünün ise süneklik ile alakalı olduğu anlaşılabılır, çünkü daha önce bahsi geçtiği üzere nano yapılı malzemeler, yüksek dayanımlara; buna karşılık daha alçak sünekliğe sahiptirler. SPD işlemi sonrasındaki makul derecelerdeki tavlama işlemi, dayanıma çok belirgin bir etki etmeksizin, sünekliği arttırabilmektedir. Bu tavlama sayesinde de alçak

evirim yorulma ömrünü arttırdığını söyleyebiliriz. Shot-Peening işlemi ile yüzeyi sertleştirilmiş nano yapılı malzemelerin yorulma ömrünün, etkisiz olduğu gözlenmiştir. Nano yapılı malzemelerin sertlikleri, diğer kaba yapılı malzemelerin sertliklerine nazaran fazla olduğundan dolayı, nano yapılı malzemelerin aşınma dayanımlarının geliştirilebilmeleri mümkündür (Langdon, T. G., 2004).

7. AŞIRI PLASTİK DEFORMASYON İŞLEMİNİN UYGULANMASI

SPD işlemi, geleneksel malzemelerle beraber, tipik endüstriyel çalışmalar için nanoteknolojinin kullanım görevini de üstlenmektedir. Bu anlamda, yeni fikirlerin ortaya atılmasını ve rekabet edilebilir Avrupa endüstrisinde rakipsiz olarak ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Çoğu teknik alaşımlar, SPD' ye pozitif anlamda karşılık verdiklerinde ötürü endüstriyel üretimlerde bu tarz malzemelerin etkisi çok büyüktür. Bu malzemeler ileride daha da önemli bir hale gelecek ve ticari ihtiyaçlar doğrultusunda daha da önem kazanacaktır.

Hedef pazar ise aşağıdaki gibidir:

“Otomotiv, uçak sanayi, implantlar, spor malzemeleri ve enerji depolama.”

SPD sayesinde geliştirilen yorulma ömürlü ve geliştirilmiş hata payları, endüstriyel uygulamalar için önemli bir zemin oluşturacaktır. Medikal uygulamalara bağlı olarak, SPD işlemi ile elde edilmiş alaşımlar, gelişmiş biyouyumluluğa sahiptir.

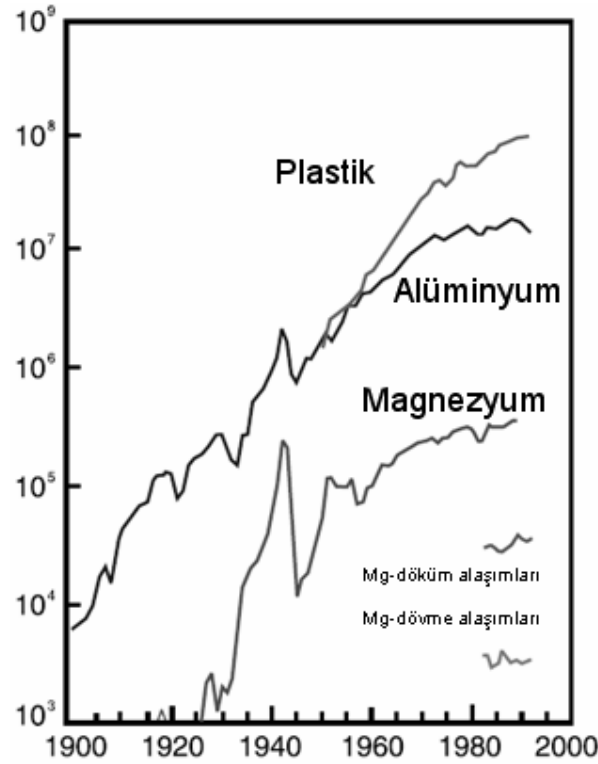
Nano ölçüdeki magnezyumda hidrojen depolamanın, çevre için aşırı derecede etkili olacağı tahmin edilmektedir. Otomotiv endüstrisinde, SPD malzemeler hakkında, hafif ve dayanıklı yapılar sayesinde daha fazla yolcu konforu ve güvenliğinin elde edileceği düşünülmektedir.

8. MAGNEZYUM ve ALAŞIMLARI

Magnezyumun en büyük özelliği, çok düşük yoğunluğa sahip olmasıdır. Yoğunluğu, çeliğin değerinin dörtte birinden daha azdır(1.74 g/cm^3). Elektrik iletkenliği, yaklaşık bakırın yarısı kadardır. Young modülü, yaklaşık olarak çeliğin değerinin dörtte biridir. Ergime sıcaklığı 650°C olan metalin, korozyon direnci iyi olmakla beraber, asitlere, deniz suyuna ve tuz çözeltilerine karşı dayanıksızdır. Ağır metallerle temas ederse kuvvetli elektrokimyasal korozyon oluşur. Önlemek için yüzey yağlanır veya greslenir. Ayrıca, uygun yüzey işlemleriyle korozyon direnci arttırılabilir.

Toz halindeki magnezyum, tutuşmaya hazırdır ve parlak bir alevle yanar. Talaşlı işleme esnasında benzer tarzda talaşlar tutuşabilir. Bununla birlikte, bu metal döküm yoluyla ve dövme metoduyla şekillendirilebilir.

Magnezyumun saf halde kullanılması çoğu diğer metallerde olduğu gibi, dayanımının düşük olmasından dolayı mümkün değildir. Bu gerçek, değişik alaşımlarının üretilmesini gerektirmiştir. Magnezyum alaşımlarında en önemli özellik, hafifliktir. Bu açıdan, bazı magnezyum alaşımlarının özgül çekme dayanımı, alüminyum ve çeliğin özgül çekme dayanımından daha büyüktür. Bundan dolayı, bugün uçak sanayinde yaygın olarak magnezyum alaşımları kullanılır. Magnezyum alaşımlarının oda sıcaklığında şekillendirilebilmeleri zor olmakla beraber, kaynak edilebilirler. Magnezyum alaşımlarında en önemli iki alaşım elemanı alüminyum ve çinkodur. Alüminyum dayanımı, çinko tokluğu arttırır. Ayrıca mangan ilavesi korozyon direncini arttırır.



Şekil 8.1 Mg metalinin diğer malzemelere göre yıllara bağlı kullanımı (Kainer K.U. 2003).

Döküm ve dövme Mg alaşımları genel olarak üçe ayrılmaktadır:

1. Mg-Mn Alaşımları: Bu alaşımlar, çok iyi kaynak edilebilirler ve çok ince plakaların üretiminde kullanılabilirler.
2. Mg-Zn-Al Alaşımları: Bu alaşımlar, basınçlı döküm, kum döküm, sürekli döküm, dövme ve ekstrüzyon üretim metotları ile üretilebilirler. En önemli özellikleri ise ısıl işlem uygulanabilir olmalarıdır.
3. Mg-Zn-Zr-Thorium Alaşımları: Bu alaşımların darbe toklukları çok yüksektir. Çok iyi derecede korozyon dayanımına sahiptirler ve işlenebilirlikleri oldukça iyidir. Bu alaşım grubuna da, tıpkı Mg-Zn-Al alaşımları gibi ısıl işlem uygulanabilir.

Mg alaşımlarının sınıflandırılması ASTM standardına göre şu şekilde geliştirilmiştir:

Alaşımlarımızı ZE63A-T6 olarak farz edersek, buradaki ilk iki rakam, malzeme içerisinde bulunan alaşım elementinin cinsini vermektedir. Normalde, metalin simgesi sahip olduğu ilk iki harftir. Fakat burada, aşağıdaki gibi elementlere kodlamalar yapılmıştır:

Çizelge 8.1 Mg alaşımlarının tanımlanmasında kullanılan kodlar (Kainer K.U. (2003).

A – Alüminyum (Al)	M – Mangan (Mn)
B – Bizmut (Bi)	N – Nikel (Ni)
C – Bakır (Cu)	P – Kurşun (Pb)
D – Kadyum (Cd)	Q – Arsenik (As)
E – Nadir Toprak Elementi	R – Krom (Cr)
F – Demir (Fe)	S – Silisyum (Si)
H – Toryum (Th)	T – Kalay (Sn)
K – Zirkonyum (Zr)	Z – Çinko (Zn)
L – Berilyum (Be)	

Bu iki harfin arkasından gelen rakamlar ise, alaşımların içerisinde % bulunma oranını göstermektedir. Beşinci sırada gelen harf ise, yapı içerisinde bulunan ana alaşım elementini simgelemektedir. Bütün bu kodlamaların arkasından gelen kısımdaki harf ve rakamlar ise malzemenin ısıtma işlem durumunu yansıtmaktadır. Bu simgelerin anlamı ise aşağıdaki gibidir:

F – Üretildiği gibi

O – Tavllanmış

H – Soğuk şekillendirilmiş

T4 – Çözelti işlemi uygulanmış

T5 – Suni yaşlandırılmış

T6 – Çözelti işlemi uygulanmış ve suni yaşlandırılmış

Bütün bu kodların analizi yapıldıktan sonra örneği verilen malzemenin, 6% oranında çinko 3% oranında nadir toprak elementi içerdiği, ana alaşım elementinin alüminyum olduğu ve sonunda ise çözelti işlemi uygulanıp suni yaşlandırılmış olduğu anlaşılmaktadır.

8.1 Dövmе Magnezyum Alaşımları

Dövmе magnezyum alaşımları; haddelenmiş levha ve plaka, ekstrüzyon çubuğu ve borusu şeklinde üretilebilmektedir. Magnezyum alaşımlarının düşük sıcaklıklardaki sünekliği oldukça düşüktür. Bu nedenle bu alaşımlar yaklaşık olarak 300–475° C arasında işleme tabi tutulurlar.

8.1.1 Dövmе Mg-Mn Alaşımları

Bu alaşım grubuna ait en önemli alaşım, M1A olarak bilinmektedir. Bu alaşım grubuna ısıtıl işlem uygulanamamaktadır. Çok düşük mekanik dayanıma sahiptirler. Bununla birlikte çok iyi derecede kaynak edilebilirlikleri ve korozyon dayanımları mevcuttur. Bu dövmе alaşım grubu, genellikle kaynak yapıları için gereklidir.

8.1.2 Dövmе Mg-Zn-Al Alaşımları

AZ10A, AZ31B, AZ61A, AZ80A bu gruba ait en önemli alaşımlardır. Bu alaşımlara ısıtıl işlem uygulanabilmekte ve çökelme sertleşmesiyle beraber üstün mekanik özellikler kazandırılabilir. Yüksek sıcaklıklarda işlenebilirlikleri oldukça iyidir. Ayrıca, mekanik dayanımı ve kaynak edilebilirliği bu sıcaklıklarda artırılabilir.

Dövmе Mg-Zn-Al alaşımları genellikle, uçak gövdesi, bilgisayar kasası, hoparlör parçası süper plastik tabakaları, ekstrüzyon şeritleri, haddelenmiş plaka vb. gibi ürünlerin üretiminde kullanılmaktadırlar.

8.1.3 Mg-Zn-Zr-Toryum Alaşımları

ZK10A, ZK20A, ZK60A, HM13A, HM31A gibi ısıtılabilirliği olan ve yüksek dayanımlı alaşımlar, bu grubu oluşturmaktadır. Bu alaşımlardaki zirkonyum ilavesi, tane dağılımına olumlu etki yaptığı için uygulanmaktadır. Aynı şekilde, çinko ilavesi ise alaşımların dayanımını artırıcı yönde etki yapmaktadır. Dövme Mg-Zn-Zr-Tr alaşımları, yüksek mekanik dayanıma ve sıcakta işlenebilirliğe sahip olmasına karşılık, kaynak kabiliyeti zayıftır. Bu alaşımlar genellikle uzay araçlarında, helikopter vites çarklarında ve bisiklet gövdelerinde kullanılmaktadır.

8.2 Dövme Magnezyum Alaşımlarının Kimyasal Kompozisyonları

Çizelge 8.2 Dövme Mg alaşımlarının kimyasal kompozisyonları (Kainer K.U. (2003)).

alaşım	Al	Ca	Zn	Mn	Cu	Zr	Y	Nd	Th
AZ21X1	1,6-2,5	0,1-0,25	0,8-1,6	0,15 max.	0,05				
AZ31	3,0		1,0	0,3					
AZ31B	2,5-3,5	0,04 max.	0,7-1,3	0,20-1,0	0,05				
AZ61A	5,8-7,2		0,40-1,5	0,15-0,5	0,05				
AZ80	8,5		0,5	0,12					
AZCOML	2,0-3,6	0,04 max.	0,3-1,5	0,15 min	0,10				
AZM	6,0		1,0	0,3					
ZC71			6,5	0,7	1,2				
ZK40			3,5-4,5			0,45 min			
ZK60A			4,8-6,2			0,45 min			
ZM21			2,0	1,0					
ZW3			3,0			0,6			
HM21				0,8					2,0
HM31						0,7			2,0
WE43						0,5	4,0	4,0	
WE54						0,5	5,25	3,5	

8.3 Dövme Magnezyum Alaşımlarının Mekanik Özellikleri

Çizelge 8.3 Dövme Mg alaşımlarının mekanik özellikleri (Kainer K.U., 2003).

Alaşım ve Durumu	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	0,2% Sıkıştırma Dayanımı (MPa)
Katı Profil				
AZ31B-F	262	193	14	103
AZ61A-F	317	228	17	131
AZ80-T5	379	276	7	241
HM31A-T5	303	269	10	172
ZK60A-T5	365	303	11	248
Boru Profil				
AZ31B-F	248	165	16	83
AZ61A-F	283	165	14	110
ZK60A-T5	345	276	11	200
Levha				
AZ31B-H24	290	221	15	179
AZ31B-0	255	152	21	110
HK31A-H24	262	207	9	159
HK31A-0	228	200	23	97
HM21A-T8	248	193	11	145

8.4 Magnezyum AZ80 Dövmeye Alaşımının Teknik Özellikleri

Çizelge 8.4 Dövmeye Mg AZ80 alaşımının teknik özellikleri.

Dövmeye Mg AZ80A Alaşımı				
Kimyasal Kompozisyonu: Mn = 0.12% min, Al=8.5%, Zn=0.5%				
Özellik	Metrik Birim Sistemi		US Birim Sistemi	
Yoğunluk	1.80 *10 ³	kg/m ³	112	lb/ft ³
Elastik Modülü	45	GPa	6530	ksi
Isıl Genleşme (20 °C)	26.0*10 ⁻⁶	°C ⁻¹	14.4*10 ⁻⁶	in/(in* °F)
Özel Isı Kapasitesi	1050	J/(kg*K)	0.251	BTU/(lb*°F)
Isıl Geçirgenlik	76	W/(m*K)	527	BTU*in/(hr*ft ² *°F)
Elektrik Direnci	1.45*10 ⁻⁷	Ohm*m	1.45*10 ⁻⁵	Ohm*cm
Çekme Dayanımı (F)	330	MPa	47900	psi
Akma Dayanımı (F)	230	MPa	33400	psi
Uzama (F)	11	%	11	%
Kopma Dayanımı (F)	150	MPa	21800	psi
Sertlik (F)	69	HB(500)	69	HB(500)
Çekme Dayanımı (T6)	340	MPa	49300	psi
Akma Dayanımı (T6)	250	MPa	36300	psi
Uzama (T6)	5	%	5	%
Yorulma Dayanımı (T6)	100	MPa	14500	psi
Sertlik (T6)	72	HB(500)	72	HB(500)
Tavlama Sıcaklığı	385	°C	725	°F
Çözeltiye Alma Derecesi	415	°C	780	°F
Yaşlandırma Sıcaklığı	205	°C	400	°F
Yaşlandırma Zamanı	1	saat	1	saat
Sıvılaşma Sıcaklığı	610	°C	1130	°F
Katılaşma Sıcaklığı	490	°C	914	°F

9. DENEYSEL ÇALIŞMA

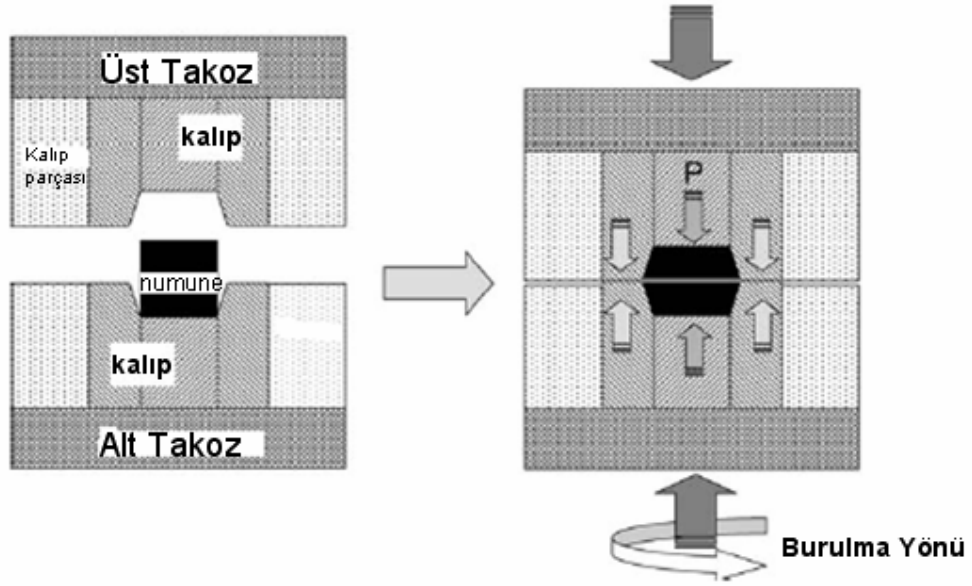
Deneysel çalışma kapsamında, dövme ürünü olan Mg Az80 alaşımına yüksek basınç burulma işlemi uygulanmıştır. İşlem parametreleri, uygulanan basınç, burulma sayısı ve burulma sırasındaki kalıbın dönüş hızına bağlı olarak belirlenmiştir. Buradaki basınç, yani presleme miktarı gigapascal biriminde, burulma işlemi tur olarak, dönüş hızı ise derece / saniye olarak belirlenmiştir. Çalışma, sıralı bir biçimde çeşitli denemeler sonrasında uygun deneysel şartlar sağlanana kadar devam etmiştir. HPT işlemi ve özellikle de Mg Az80 alaşımına uygulanmış HPT işlemi konulu çalışma, kaynak ve literatür azlığından ötürü, bu tarz bir yaklaşım izlenmesi uygun görülmüştür.

HPT işlemini uyguladığımız makine, Alman Zwick-Roell firmasına ait Amsler HB 1000 markalı presleme makinesidir. Bu makinenin presleme kapasitesi maksimum 1000 kN burulma kapasitesi ise maksimum 5000 Nm' dir. Aşağıdaki şekilde HPT makinesi görülmektedir.



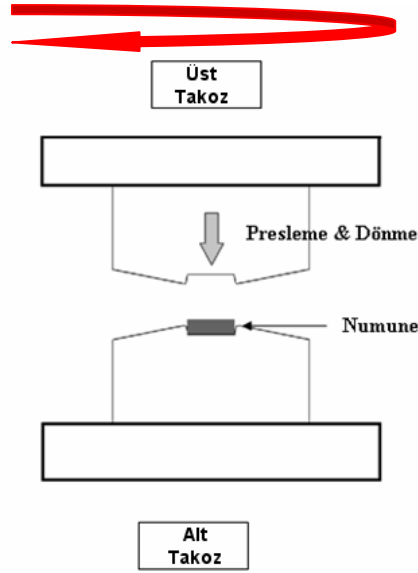
Şekil 9.1 HPT makinesi.

Presleme makinesi hidrolik bir sistem sayesinde çalışmakta ve bilgisayar kontrollü olarak idare edilmektedir. Makinenin işlem amacıyla belirli kalıpları bulunmaktadır. Presleme işlemi alt ve üst olmak üzere iki farklı takoz arasında kuvvet uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Burulma işlemi ise makinelerin özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Kullandığımız makine, burulma işlemi, yine presleme işlemi uyguladığımız üst takoz vasıtasıyla gerçekleştirmektedir. Bazı makinelerde bu işlem, alt takoz tarafından da uygulanabilmektedir



Şekil 9.2 HPT işleminin şematik gösterimi.

Kullandığımız makinedeki burulma işlemi üst takoz tarafından, kapalı sistem içerisinde iki kalıp arasında bulunan numuneye uygulanmıştır. Şekil 9.3' te şematik olarak gösterildiği üzere, burulma işlemi üst takoz vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir.



Şekil 9.3 HPT işleminin uygulaması.

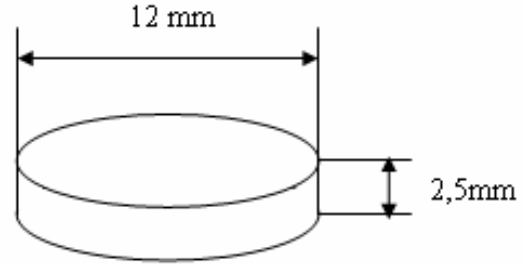
Makine ve çalışma prensibi hakkında daha detaylı bilgi vermek istersek, aşağıdaki şekilleri kullanmamız daha faydalı olacaktır. Bu nedenle, ilk önce işlem amacıyla incelemek istediğimiz numunenin boyutsal ve kimyasal özellikleri hakkında bilgi vermemiz gerekmektedir. Mg AZ80 numunesinin kimyasal ve mekanik özellikleri hakkında gerekli olan bütün teknik bilgiler, dövme magnezyum alaşımları başlığı altında, çizelge 8.4' te tablo halinde verilmiştir. Bunun yanı sıra numuneye uygulanan spektro analiz testi sonrasında şu sonuçlar elde edilmiştir:

Çizelge 9.1 Dövme Mg AZ80 alaşımının kimyasal kompozisyonu.

Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe	Mg
8.5	0.5	0.1	0.1	0.05	0.005	0.005	

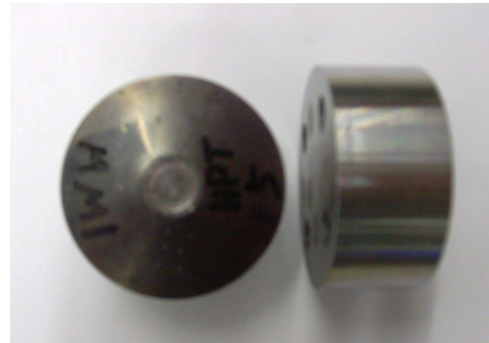
300 °C' de, 12 ekstrüzyon oranıyla direk metotla ekstrüzyon işleminde, dış çapı 20 mm olacak şekilde üretilen çubuklar, daha sonra tornalama işlemi ile dış çapı 11 mm kadar indirilmiştir. Dış çapı 11 mm olan bu çubuklar, ortalama olarak 2.5 mm kalınlığa sahip olacak şekilde kesme makinesinde kesilmiştir. Daha sonra numuneler, işlem sırasında pürüzsüz bir temas yüzeyi sağlanması amacıyla, 1200 ve 2400 numaralı su zımparaları vasıtasıyla zımparalama

ve hemen ardından da 1µm' lik elmas pastayla parlatılmıştır. Aşağıda ise HPT işlemi için hazırlanan numunenin şematik ve orijinal resimleri bulunmaktadır.

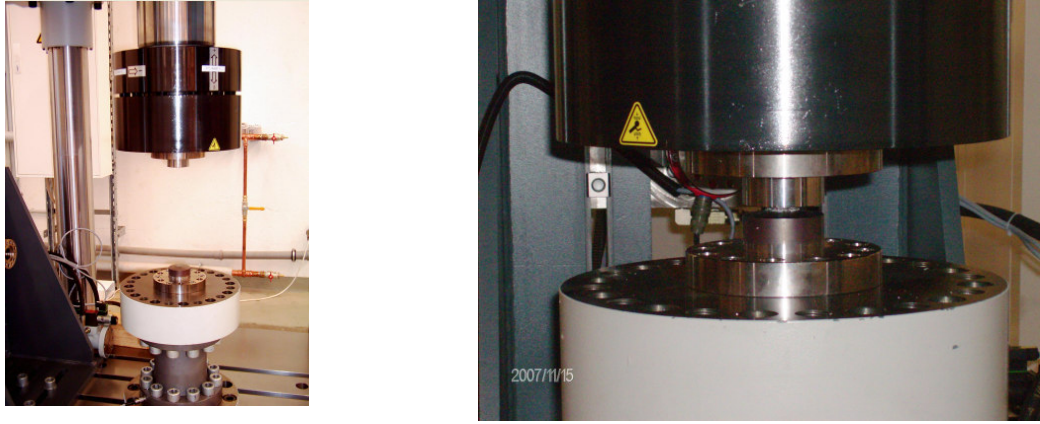


Şekil 9.4 HPT işleminde kullanılan numuneler.

Burada kullandığımız numunenin dış çapının 11 mm olarak belirlenmesinde, HPT makinesi için tasarlanan alt ve üst kalıpların boyutsal ölçülerinin önemi vardır. Yine, kalınlığın 2,5 mm olarak kabul edilmesinde ise daha önceden yapılan bir çalışmada, Al 2024 alaşımına uygulanan HPT işlemi dikkate alınmıştır. 2,5 mm' den daha fazla oranlarda kullanılacak olan kalınlıklarda, işlem sırasında numunenin malzeme kaybı hat safhada olmaktadır. Bu da yine kalıbın tasarımından kaynaklanmaktadır. Elde edilen numuneler ,HPT makinesinde alt ve üst takoza bağlı olarak bulunan, alt ve üst kalıbın arasında preslemeye maruz kalacak şekilde, alt kalıbın üzerine konulur. Bu kalıplar 58–60 HRC sertliğe sahip yüksek dayanımlı ve yüzey sertleştirme ısıtma işlemi uygulanmış çelik kalıplardır. Kalıpların iç çapı 12,5 mm ve kalıp içerisindeki açı 5 °' dir. Bu açının verilmesinin nedeni ise, numunenin, yüksek presleme sonrasında kalıptan rahat alınmasıdır. Kalıplar ve makine üzerindeki yerleşimleri, aşağıdaki resimler aracılığıyla daha net bir biçimde anlaşılmaktadır.



Şekil 9.5 HPT işleminde kullanılan kalıplar.



Şekil 9.6 HPT işleminde kullanılan kalıpların yerleşim şekli.

Deney esnasında en sık karşılaşılan ve en önemli problem ise; numuneye uygulanan presleme sonrasındaki burulma anında, malzemeden fazla kayıp olmasından ötürü, kalıpların birbirine fazla yaklaşmasıdır. Bu nedenle, cihaz, otomatik olarak uyguladığı presleme işlemini kesmek zorunda kalıyor ve maalesef numunenin istenilen deneysel özelliklere sahip olmadan, kalıplar arasından alınmak zorunda kalınıyor. Diğer önemli problem ise; yine presleme işleminin hemen akabinde uygulanan burulma işleminden ötürü numunenin kalınlığında önemli oranlarda kaybın meydana gelmesi ve bundan ötürü yine numunenin alt veya üst kalıba tıpkı kaynak olmuşçasına yapışmasıdır. Deney sonrasında numuneyi kalıplar arasından almak istediğimiz anda, maalesef bu, bazen mümkün olamamaktadır. Numuneler, HPT işlemi için hazırlandıktan sonra, kalıplarda makineye monte edilmekte, deney öncesinde gerekli deneysel bilgiler cihaza tanıtılmaktadır. Bu bilgiler, toplam presleme oranı, toplam dönme derecesi ve üst kalıbın saniye başına düşen dönme hızıdır. Burada hesaplamamız gereken sadece yük-presleme oranıdır. Çünkü GPa biriminde verilen ve sürekli bahsi geçecek olan 3 GPa, 4 GPa gibi değerler işlem sırasındaki bizim presleme oranlarımızdır. Bu birimi kN cinsinden yüke çevirmemiz gerekmektedir. Bu işlemi de bilindiği üzere, normal gerilim formülünden hesaplayabiliriz.

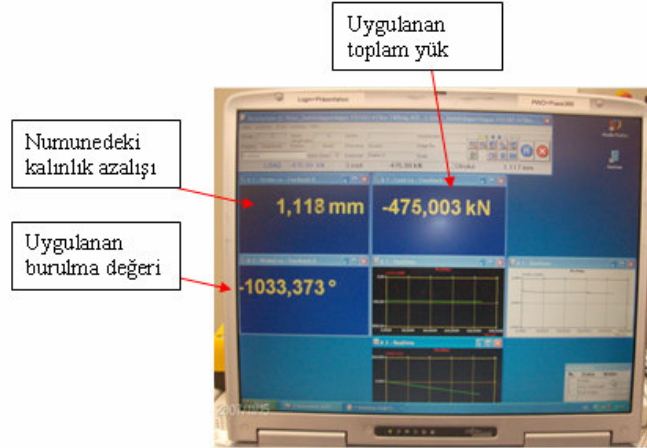
Örneğin numunemiz 3 GPa'lık bir presleme ile şekillendirilmek isteniyor. Bu durumda bizim kaç kN'lık yük kullanmamız gerekmektedir?

$$\sigma = P/a$$

$$\sigma: 3\text{GPa} \quad A = 3, 14 \cdot 11^2 / 4 \rightarrow 95 \text{ mm}^2, \quad \sigma = 3\text{GPa} \quad (9.1)$$

$$A: \pi d^2 / 4 \quad P = 3 \cdot 95 \rightarrow 285 \text{ kN} \quad P: ?$$

Gerekli bütün bilgiler, bilgisayar sayesinde cihaza tanıtılarak deneyin başlaması sağlanır. Aşağıdaki şekilde de deney sırasında cihaza ait bilgisayar ekranında, deneye ait veriler görülmektedir.



Şekil 9.7 HPT işlemi sırasında verilerin takip edildiği makine ekranı.

Ekrandaki bu veriler, deney esnasında oluşan ilerlemeyi bizlere vermektedir. Deney esnasında elde edilen burulma ve presleme değerleri hakkında bilgi sahibi olmamız sağlanmaktadır. HPT makinesi ve işlem hakkında verilen bu bilgilerden sonra, numunelerimize uygulanan deneyleri ve sonuçlarını verebiliriz.

HPT işlemi ile ilgili olarak yapılan çok fazla çalışma olmadığından ötürü, deney başlangıcı olarak belirleyebileceğimiz kesin bir değer yoktur. Bu anlamda yine, daha önce yapılmış çalışmaları da göz önüne alarak, başlangıç presleme değerini 3 GPa, burulma değerini 1 tam tur ve burulma hızını ise dakikada 3 derece olarak belirledik. Bununla beraber sırasıyla;

3 GPa basınç – 1 tam tur burulma

4 GPa basınç – 1 tam tur burulma

5 GPa basınç – 1 tam tur burulma

5 GPa basınç – 2 tam tur burulma

5 GPa basınç – 3 tam tur burulma

5 GPa basınç – 4 tam tur burulma

5 GPa basınç – 5 tam tur burulma değerlerini uyguladık. İşlemler sonrasında elde ettiğimiz numunelerin mikro yapılarını struers marka ışık metal mikroskoplarında inceledik.

Mikro yapıları incelemek amacıyla kullandığımız mikroskoplar aşağıdaki şekilde olduğu gibidir. Sertlik taramasını ise yine aynı marka mikrovikers sertlik ölçme cihazıyla gerçekleştirdik.



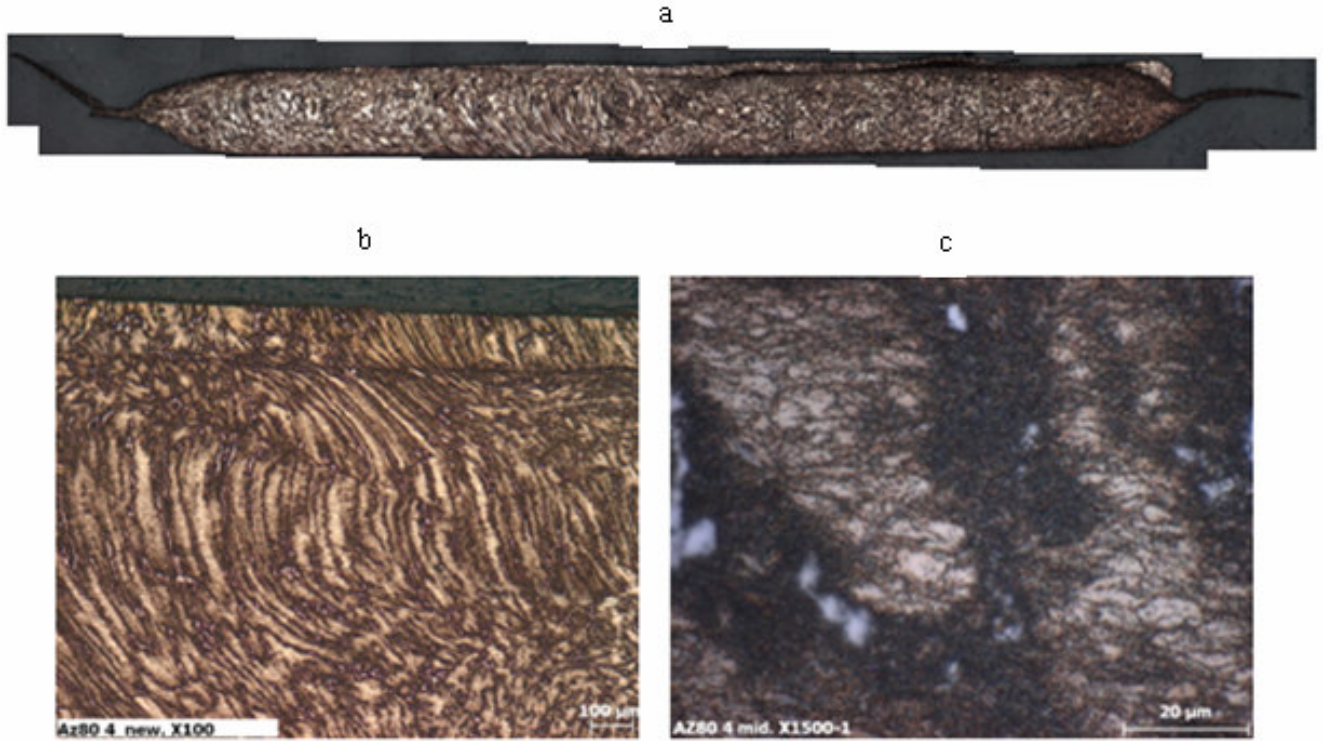
Şekil 9.8 Kullanılan ışık metal mikroskopları.



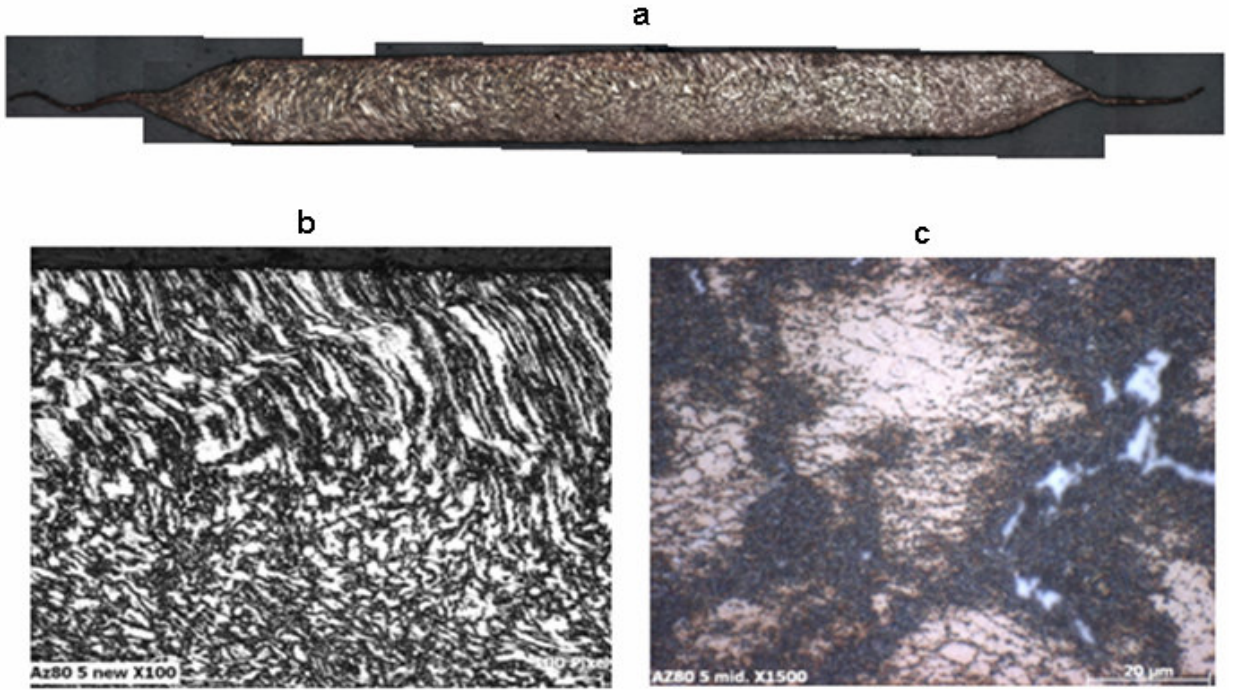
Şekil 9.9 Kullanılan mikro vikers sertlik ölçüm cihazı.



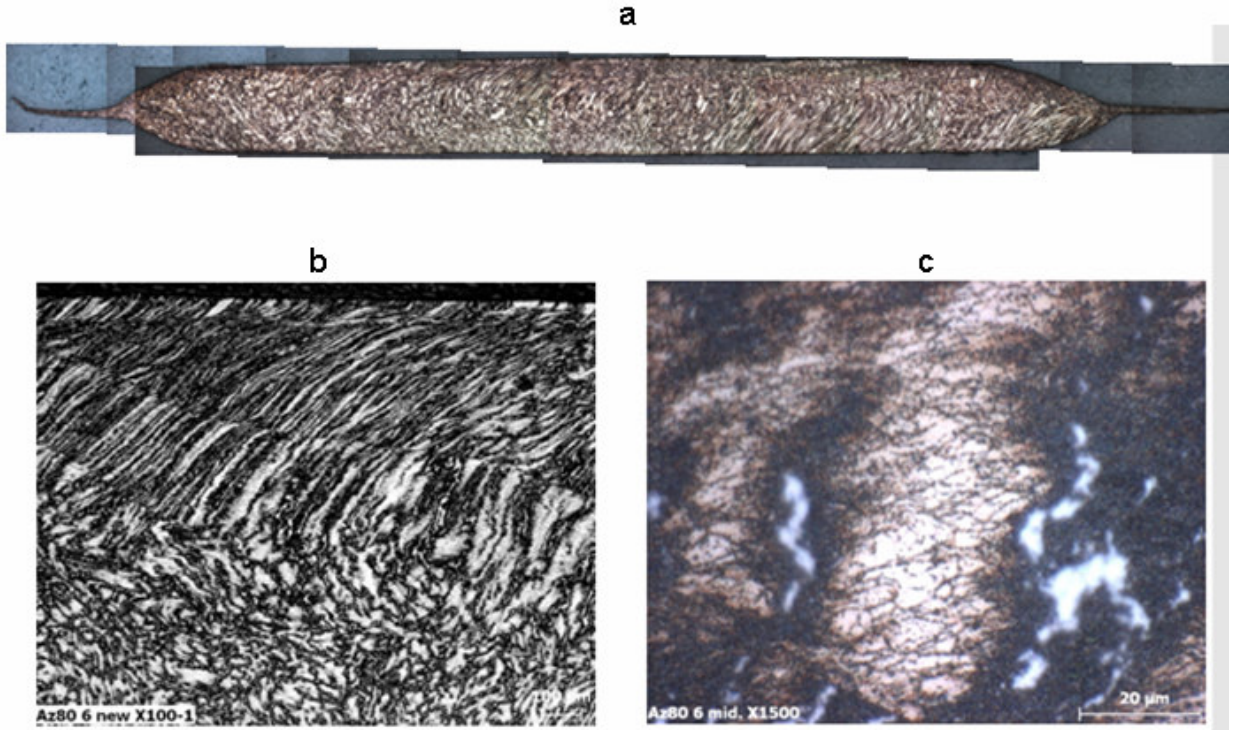
Şekil 9.10 0 GPa–0 tur burulan numunenin mikroyapısı X500(ortalama tane boyutu 10 mikron).



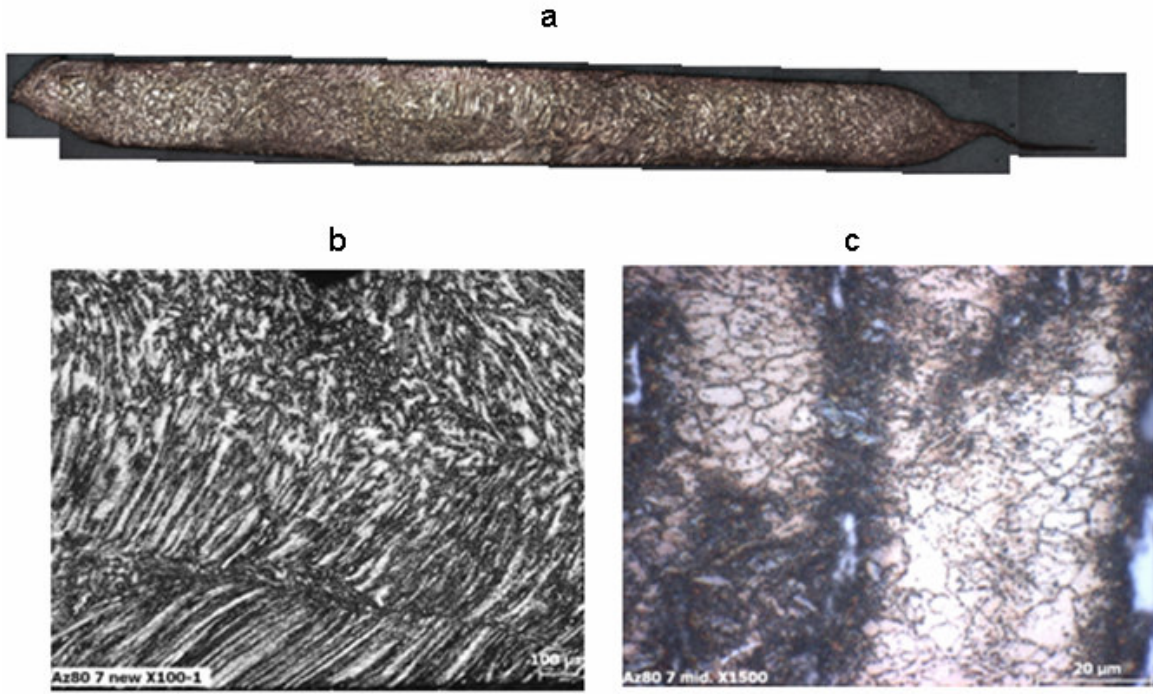
Şekil 9.11 3GPa basınç – 1 tur burulan numunenin a) yandan kesitinin montesi b) merkez kısmı X100 c) merkez kısmı X1500 (ortalama tane boyutu 8 mikron).



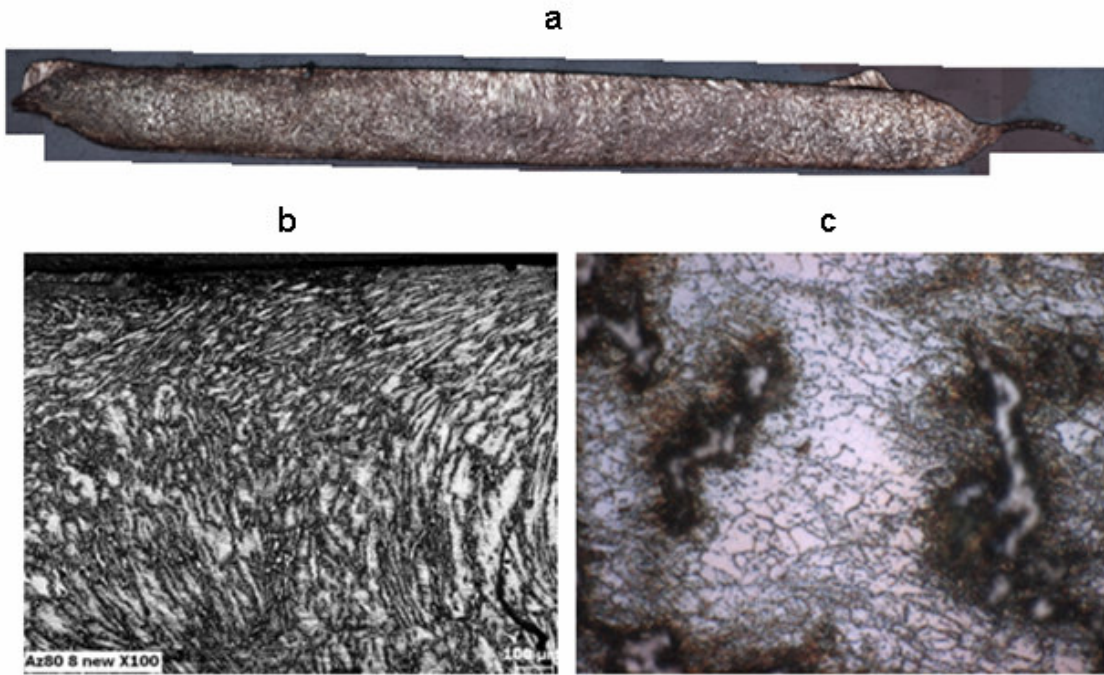
Şekil 9.12 4GPa basınç – 1 tur burulan numunenin a) yandan kesitinin montesi b) merkez kısmı X100 c) merkez kısmı X1500 (ortalama tane boyutu 6 mikron).



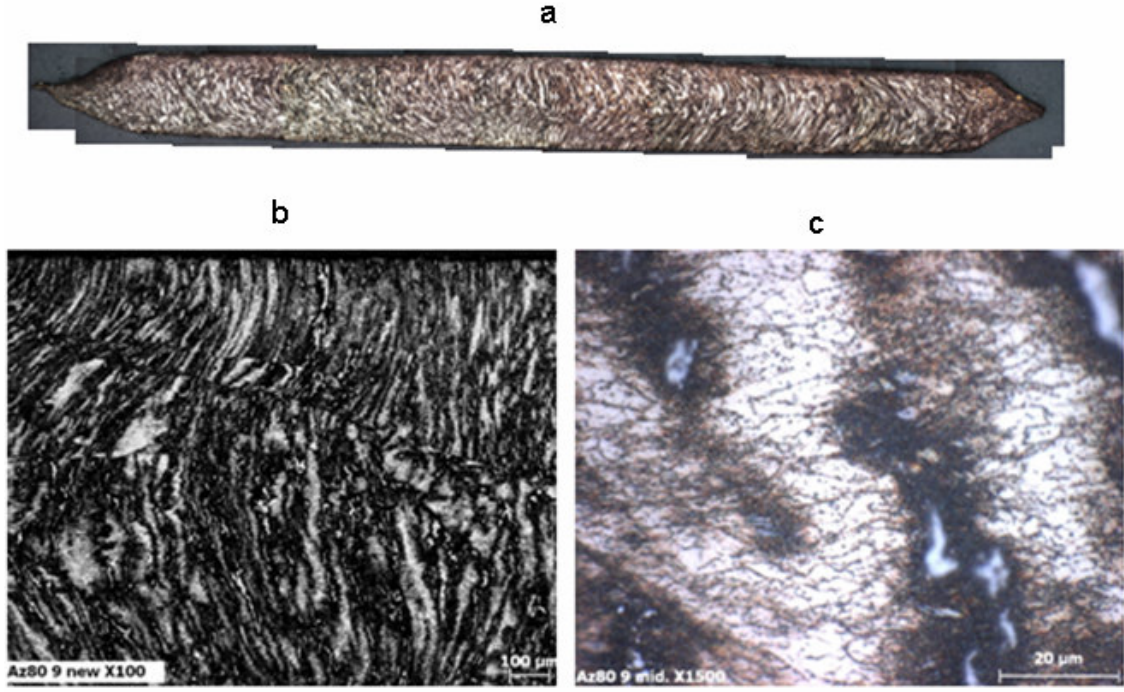
Şekil 9.13 5GPa basınç – 1 tur burulan numunenin a) yandan kesitinin montesi b) merkez kısmı X100 c) merkez kısmı X1500 (ortalama tane boyutu 6 mikron).



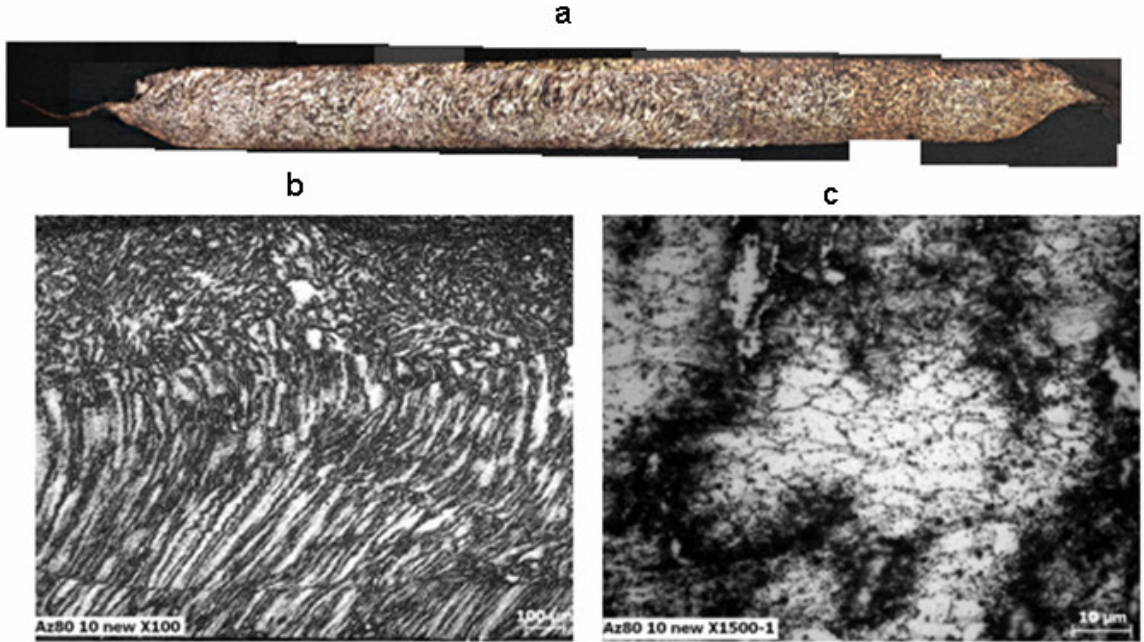
Şekil 9.14 5GPa basınç – 2 tur burulan numunenin a) yandan kesitinin montesi b) merkez kısmı X100 c) merkez kısmı X1500 (ortalama tane boyutu 6 mikron).



Şekil 9.15 5GPa basınç – 3 tur burulan numunenin a) yandan kesitinin montesi b) merkez kısmı X100 c) merkez kısmı X1500 (ortalama tane boyutu 5 mikron).

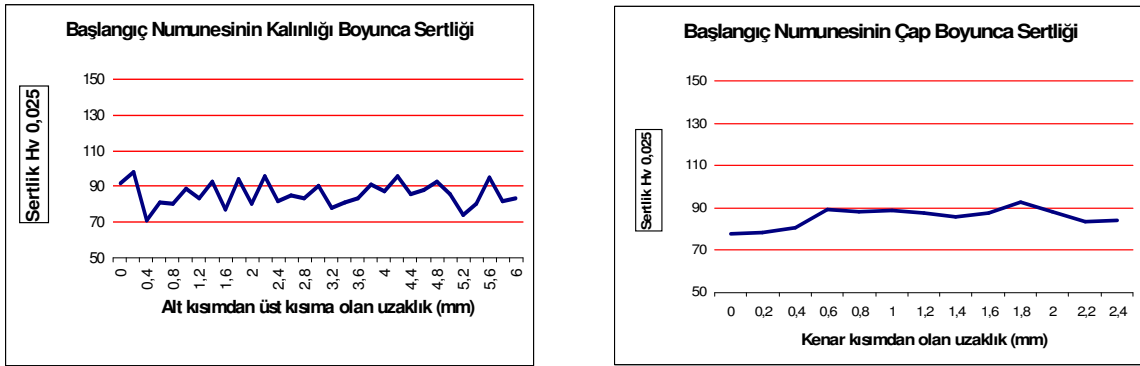


Şekil 9.16 5GPa basınç – 4 tur burulan numunenin a) yandan kesitinin montesi b) merkez kısmı X100 c) merkez kısmı X1500 (ortalama tane boyutu 5 mikron).

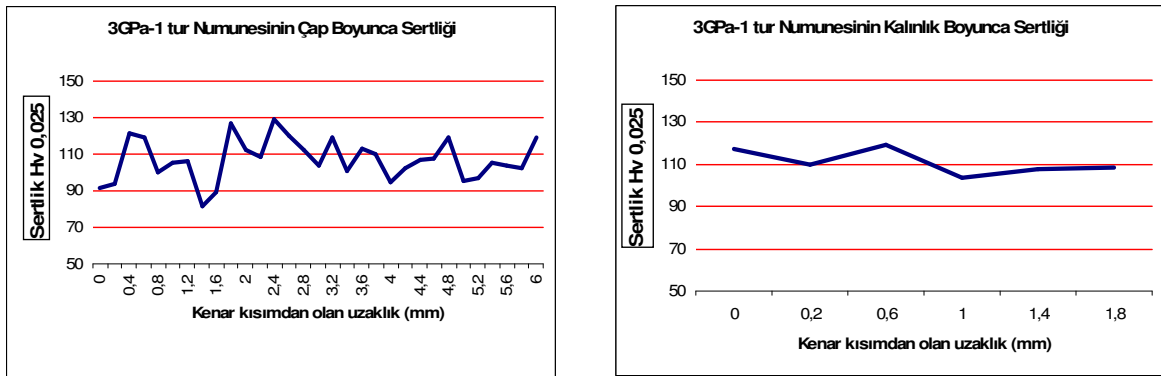


Şekil 9.17 5GPa basınç – 5 tur burulan numunenin a) yandan kesitinin montesi b) merkez kısmı X100 c) merkez kısmı X1500 (ortalama tane boyutu 5 mikron).

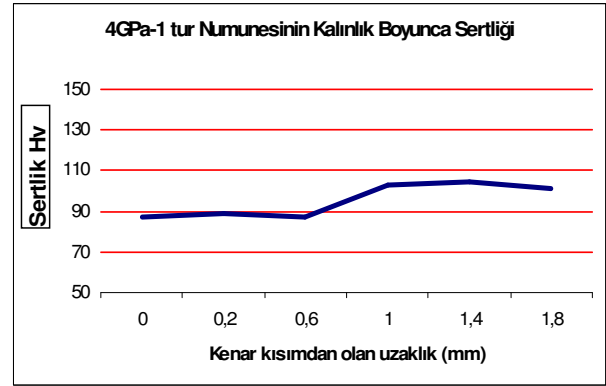
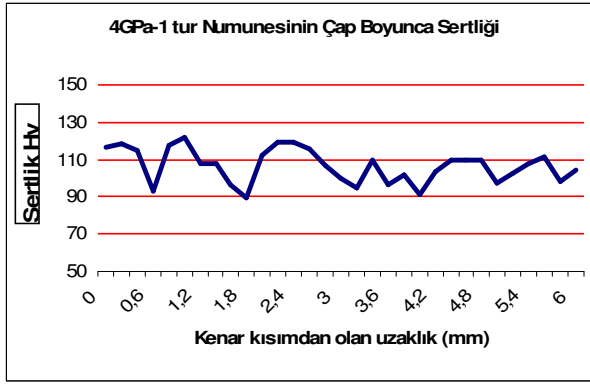
Yaptığımız ilk deneylerde, elde ettiğimiz sonuçları doğru bir biçimde değerlendiremedik. Numune içerisinde bulunan çatlaklar, sağlıklı bir inceleme yapmamıza engel olmaktadır. Resimlerden de anlaşılacağı üzere, numunenin genellikle orta kısımlarında çatlaklar mevcuttur. Bölgesel olarak çatlağın olduğu kesimlerde, tane küçülmesinin oranlarında farklılıklar göze çarpmaktadır. Başlangıç numunesini dikkate aldığımızda, aynı yönde elde edilen diğer numunelerin mikro yapılarıyla kıyaslandığı vakit, basınç ve burulma oranlarının tanelerin yönlenmesine etki ettiğini net bir biçimde anlayabilmekteyiz. Fakat yine bu basınç ve burulma oranları malzeme içerisinde çatlamalara sebebiyet vermektedir. Yapılan mikro yapı incelemeleri, numunelerin merkez kısmından sırasıyla X100 ve X1500 büyütmede çekilmiştir. Ayrıca, numunenin yine X100 büyütmede çekilmiş bütün resimlerinin birleştirildiği montelerde, numunelerin genel görünümü hakkında bilgi sahibi olmaya çalışıldı. Mikro yapı resimlerindeki çatlakları tespit ettikten sonra, yine aynı numunelere sırasıyla mikro sertlik testi uyguladık. Aşağıdaki grafiklerde bu numunelere ait sertlik değerleri verilmiştir. Sertlik taraması, numunenin kenar kısmından merkez kısmına 0,2 mm lik aralıklarla ve yine aynı numunelerin alt kısmından üst kısmına 0,2 mm' lik aralıklarla olmak üzere iki yönde gerçekleştirilmiştir.



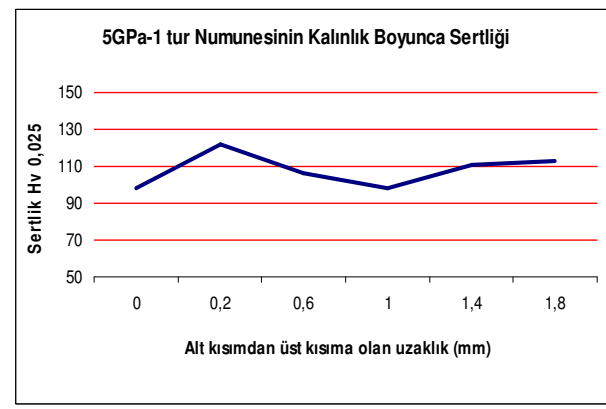
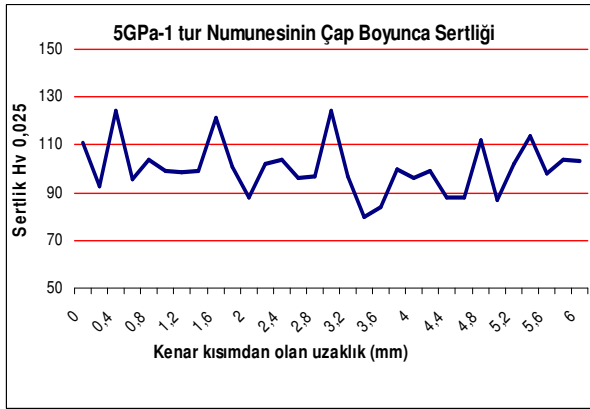
Şekil 9.18 0GPa-0 tur burulan numunenin sertlik taraması.



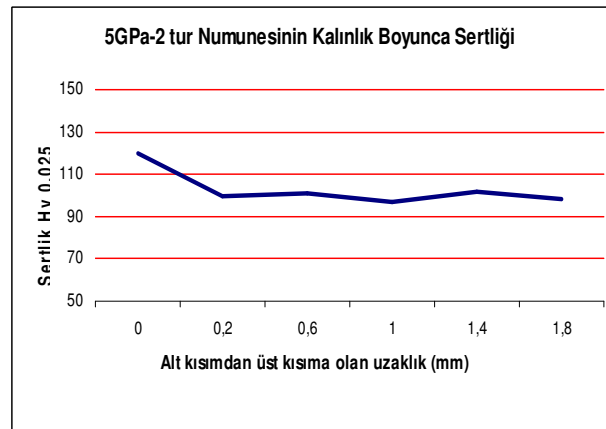
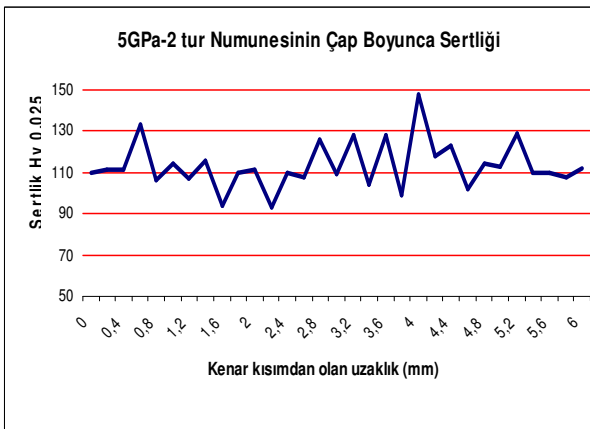
Şekil 9.19 3GPa basınç - 1 tur burulan numunenin çap ve kalınlık boyunca sertlik taraması.



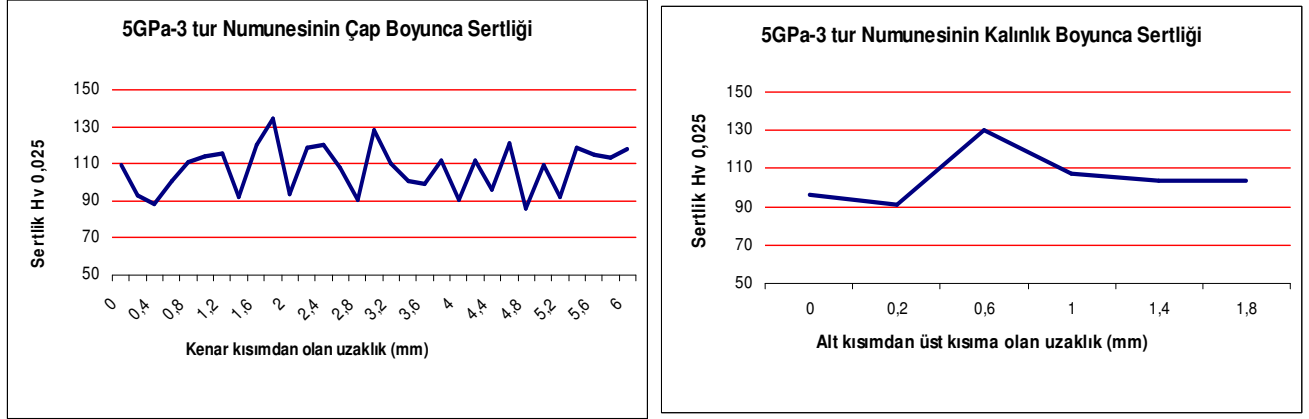
Şekil 9.20 4GPa basınç – 1 tur burulan numunenin çap ve kalınlık boyunca sertlik taraması.



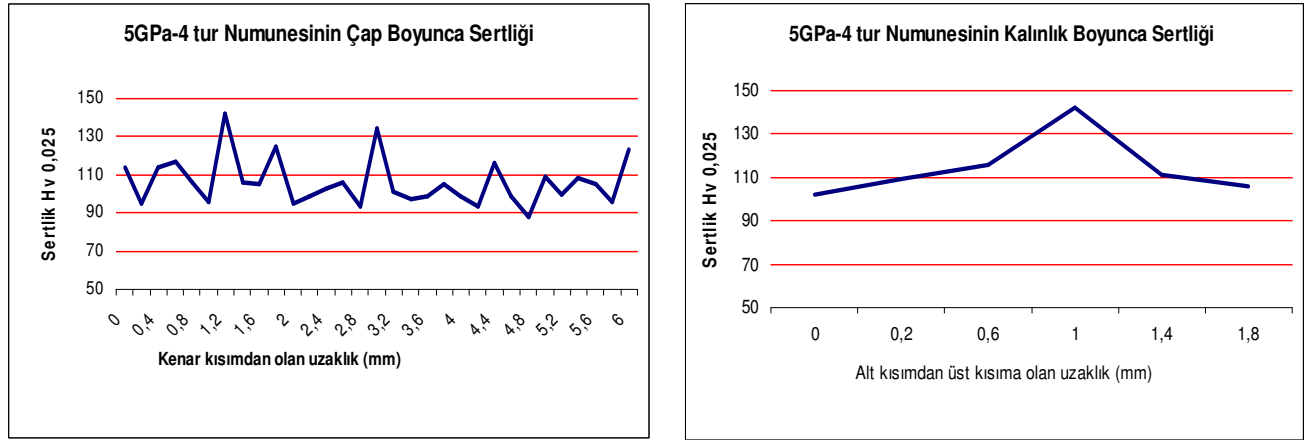
Şekil 9.21 5GPa basınç – 1 tur burulan numunenin çap ve kalınlık boyunca sertlik taraması.



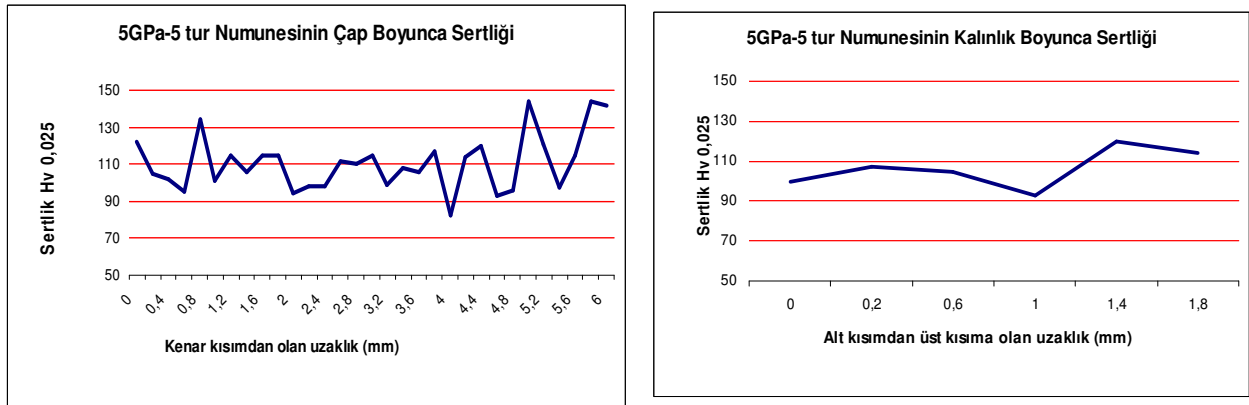
Şekil 9.22 5GPa basınç – 2 tur burulan numunenin çap ve kalınlık boyunca sertlik taraması.



Şekil 9.23 5GPa basınç – 3 tur burulan numunenin çap ve kalınlık boyunca sertlik taraması.



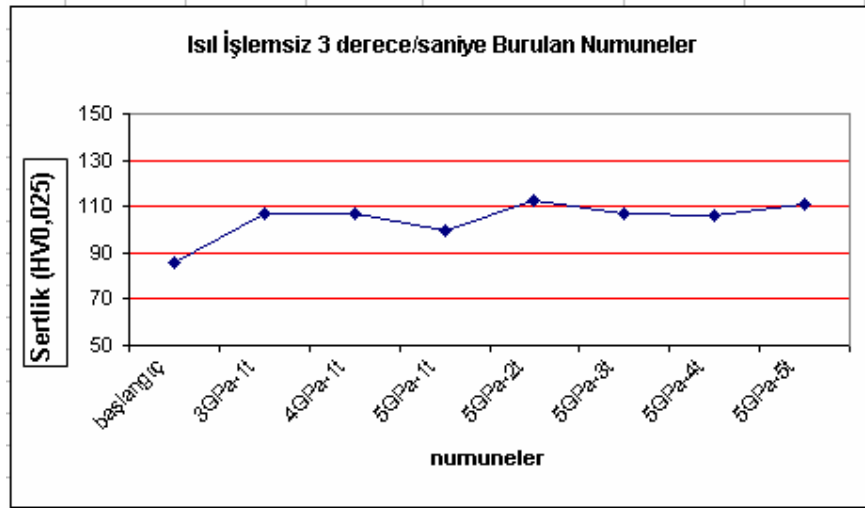
Şekil 9.24 5GPa basınç – 4 tur burulan numunenin çap ve kalınlık boyunca sertlik taraması.



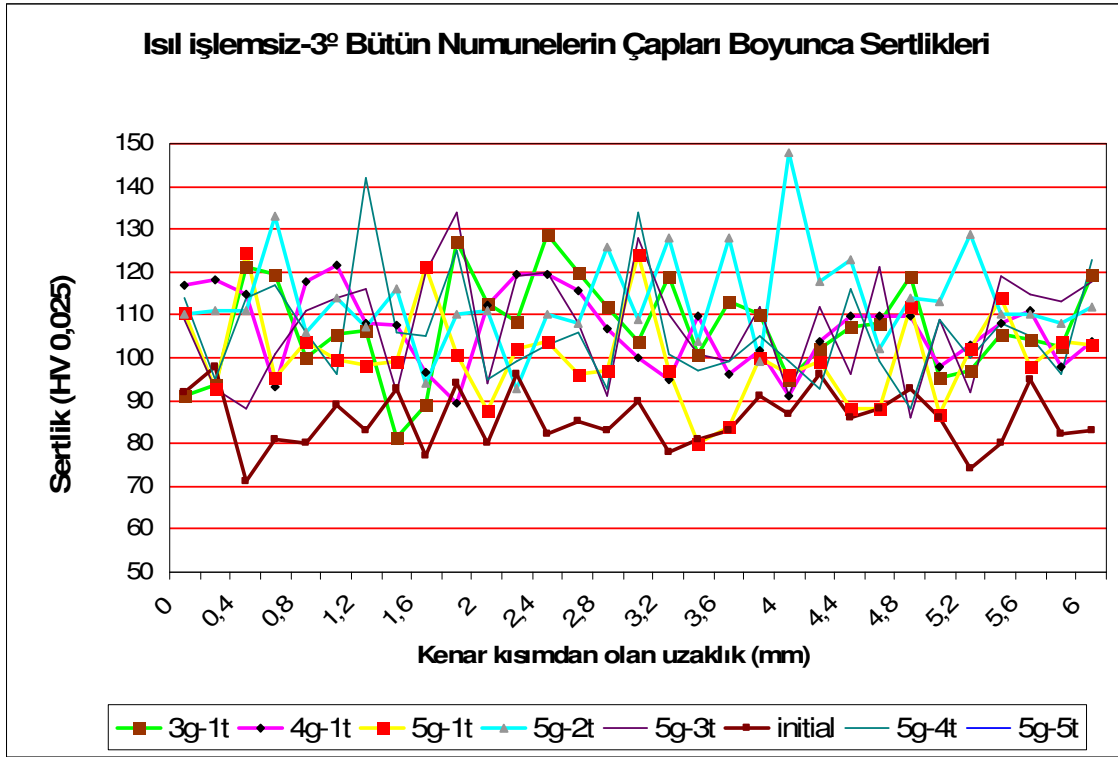
Şekil 9.25 5GPa basınç – 4 tur burulan numunenin çap ve kalınlık boyunca sertlik taraması.

Isıl işlem görmemiş ve saniyede 3 derece dönme hızında burularak elde edilen HPT numunelerinin ortalama sertlik değerleri ise aşağıdaki grafikte olduğu gibidir. Bütün numunelerin çapları boyunca sertlikleri sırasıyla şu şekildedir:

Başlangıç numunesi: 86 HV, 3GPa-1: 107 HV, 4GPa-1t: 107 HV, 5GPa-1t: 100 HV, 5GPa-2t: 113 HV, 5GPa-3t: 107 HV, 5GPa-4t: 106 HV ve 5GPa-5t: 111 HV dir.

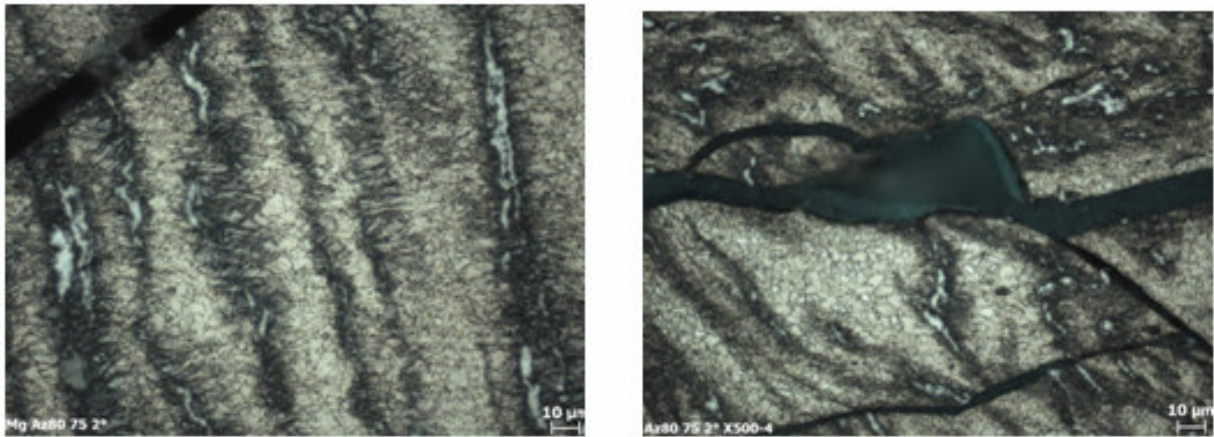


Şekil 9.26 Isıl işlemsiz numunelerin ortalama sertlik değerleri.

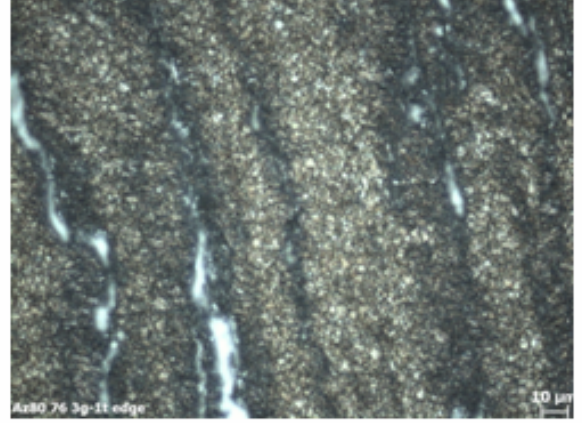
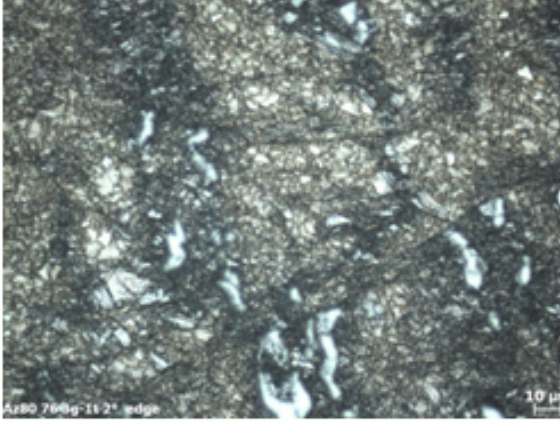


Şekil 9.27 Isıl işlemsiz numunelerin çapları boyunca sertlik taraması.

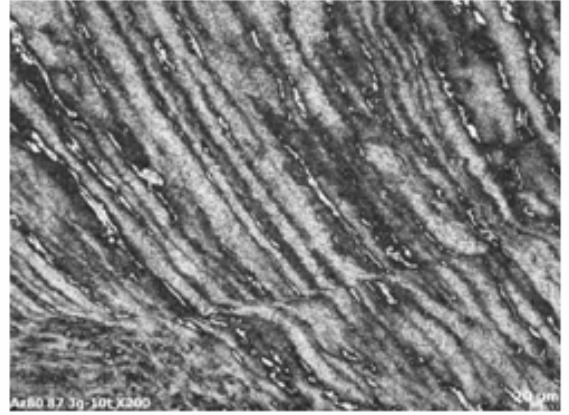
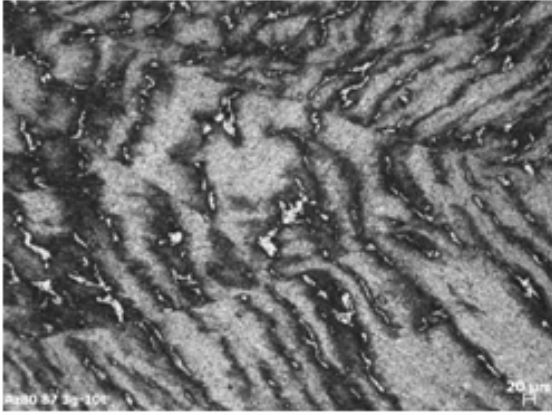
Bu deneyler neticesinde, elde ettiğimiz mikro yapılarda çatlaklar mevcuttu. Öncelikle bunu önlemek amacıyla, saniyede 3° olan dönme hızını, saniyede 2° olarak ayarlayarak, sırasıyla 1GPa–1 tur burulma ve 3GPa–1/10/15 tur burulma oranlarıyla numunelerimizi elde ettik. Bu numunelere ait mikro yapılar aşağıdaki gibidir:



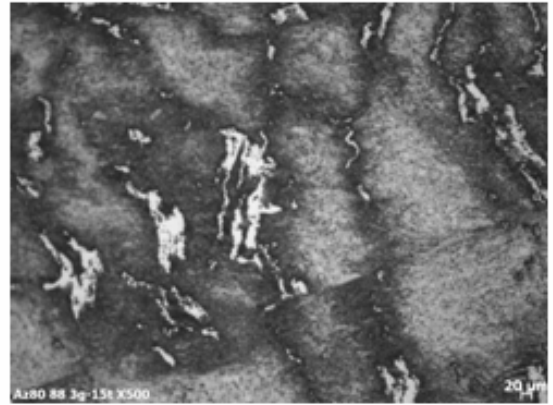
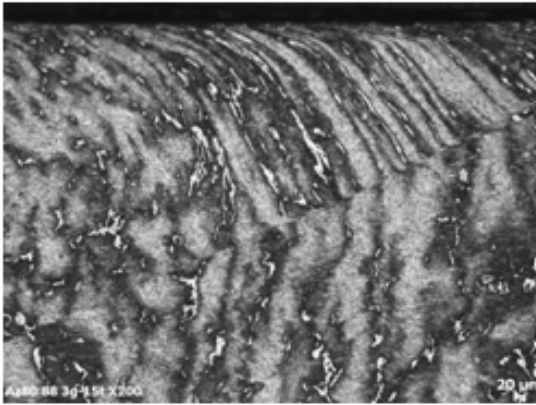
Şekil 9.28 1GPa basınç – 1 tur – 2° burulanan numunenin merkez kısımları X500.



Şekil 9.29 3GPa basınç – 1 tur – 2° burulan numunenin merkez kısımları X500.

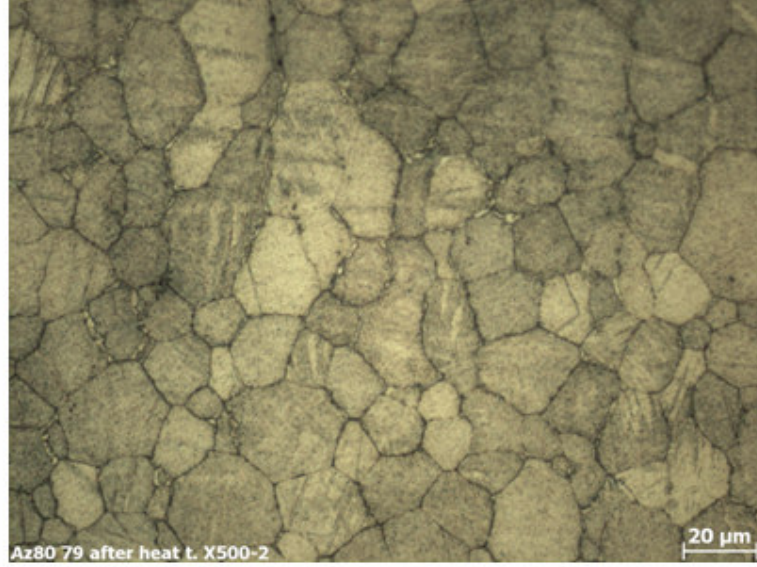


Şekil 9.30 3GPa basınç – 10 tur – 2° burulan numunenin a) merkez kısmı X500 b) kenar kısmı X500.

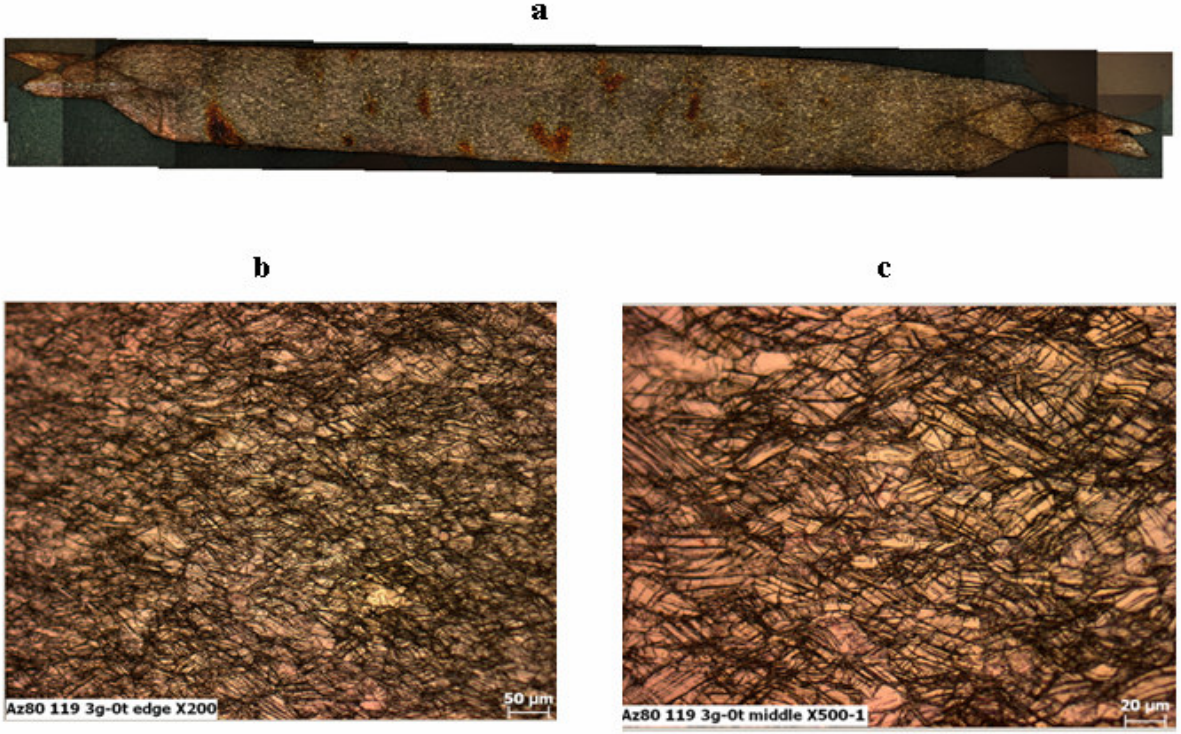


Şekil 9.31 3GPa basınç – 15 tur – 2° burulma numunenin a) merkez kısmı X500 b) kenar kısmı X500.

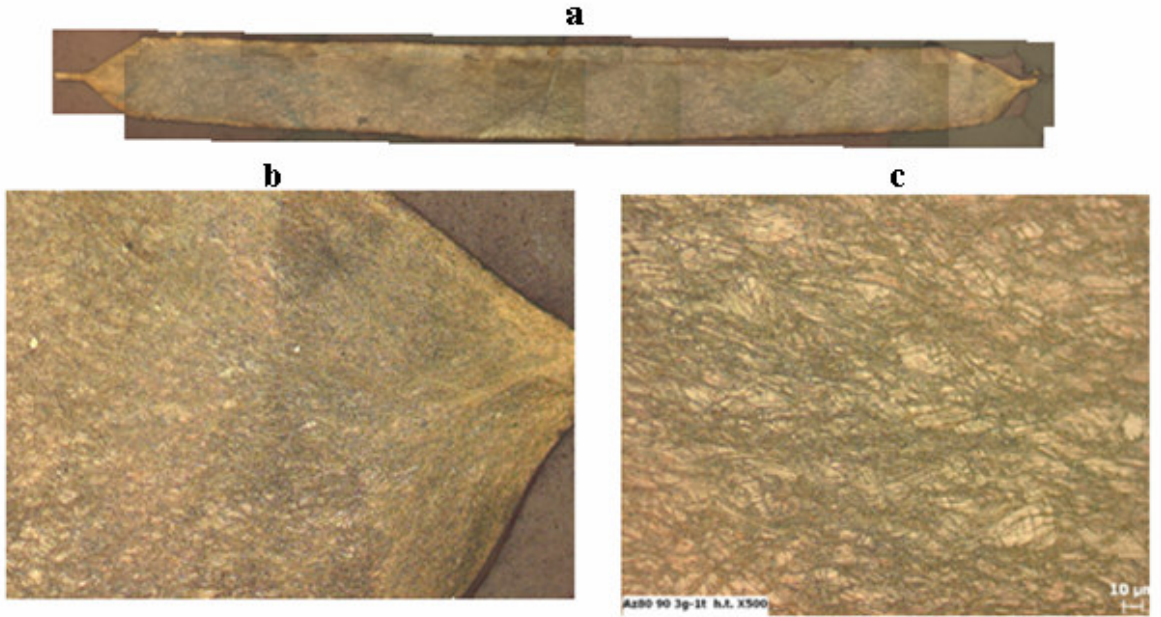
Burulma derecesini düşürerek, kalıbın 1 saniyedeki dönme hızını da düşürmüş olduk. Bunu yapmamızdaki amaç ise; işlem sırasında deformasyon hızını düşürerek, çatlama riskini minimize etmektir. Fakat yapılan bu müdahaleye rağmen, yukarıdaki mikro yapılardan da anlaşılacağı üzere, numune içerisinde mekanik değerleri etkileyen çatlakları önleyememiştik. Bunun hemen akabinde, numunemize normalizasyon ısı işlemi uygulayarak, daha rahat işlenebilir hale getirmeyi düşündük. Bu çalışma ile beraber, daha önceden düşünülen dönme hızının 3°'den 2°'ye düşürülmesi, yine aynı şekilde tüm numunelere uygulanmıştır. Bütün bu iyileştirmeye yönelik çalışmaların ardından, tatbik edilen basınç ve burulma oranları ile elde edilen numunelerin mikro yapıları ve mikro sertlik değerleri aşağıdaki gibidir.



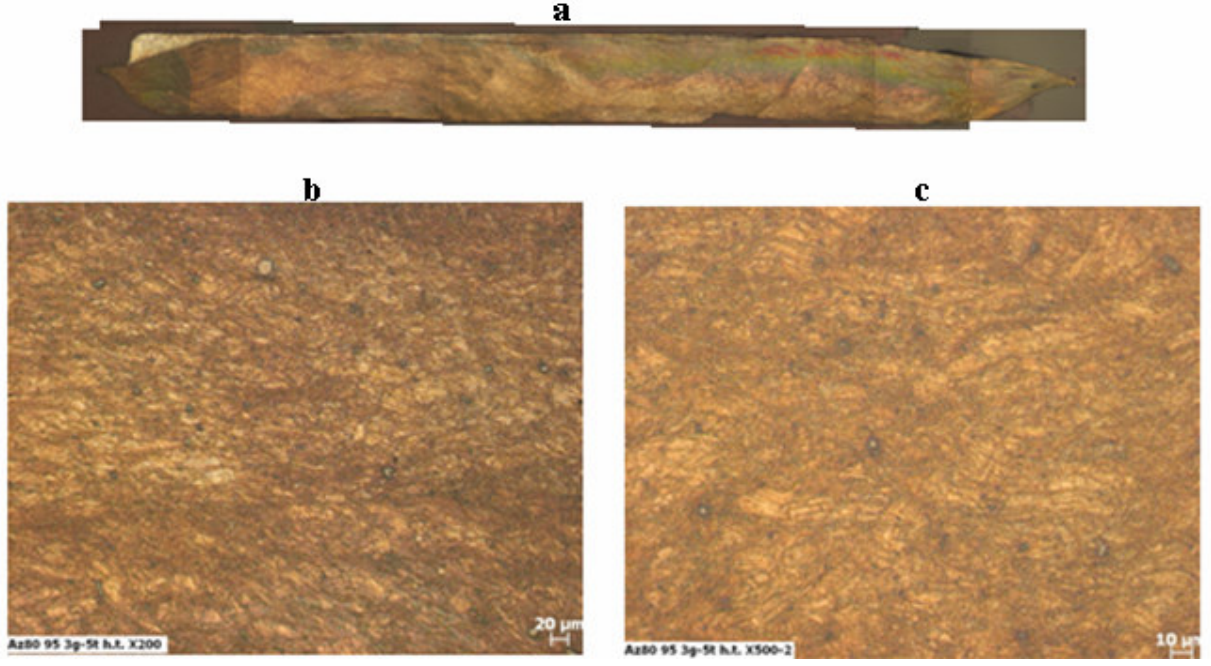
Şekil 9.32 Normalizasyon ısı işleminden sonra elde edilen mikro yapı X500 (Ortalama tane boyutu 30 mikron).



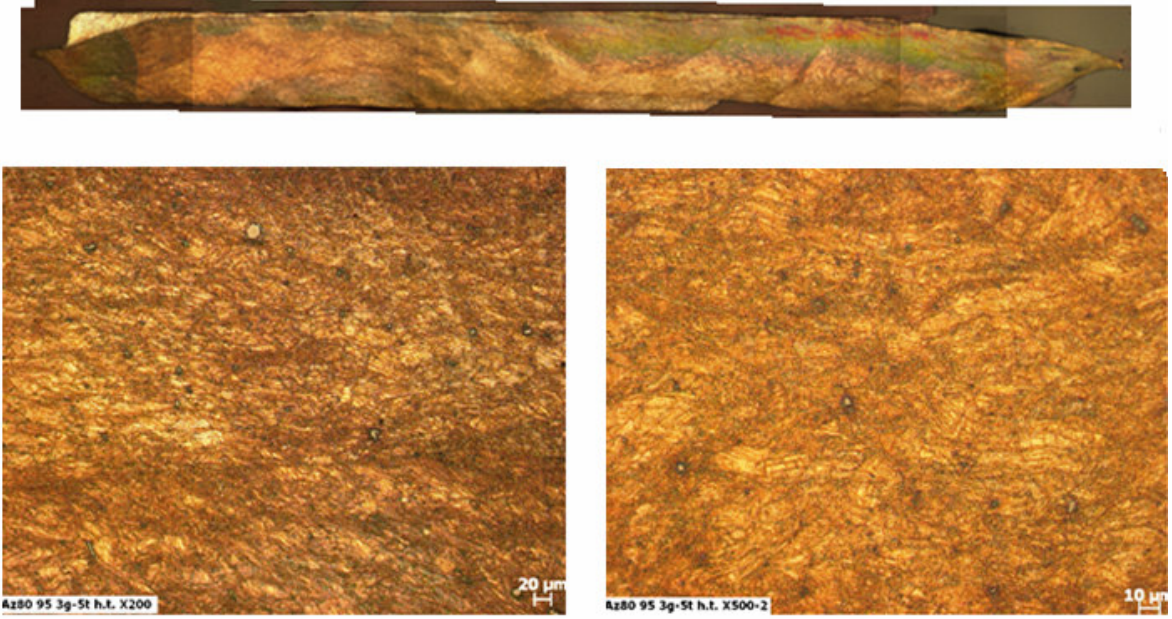
Şekil 9.33 3GPa basınç – 0 tur – 2° – ısıtıl işlemli numunenin a) yandan kesitinin montesi
b) kenar kısmı X200 c) merkez kısmı X500.



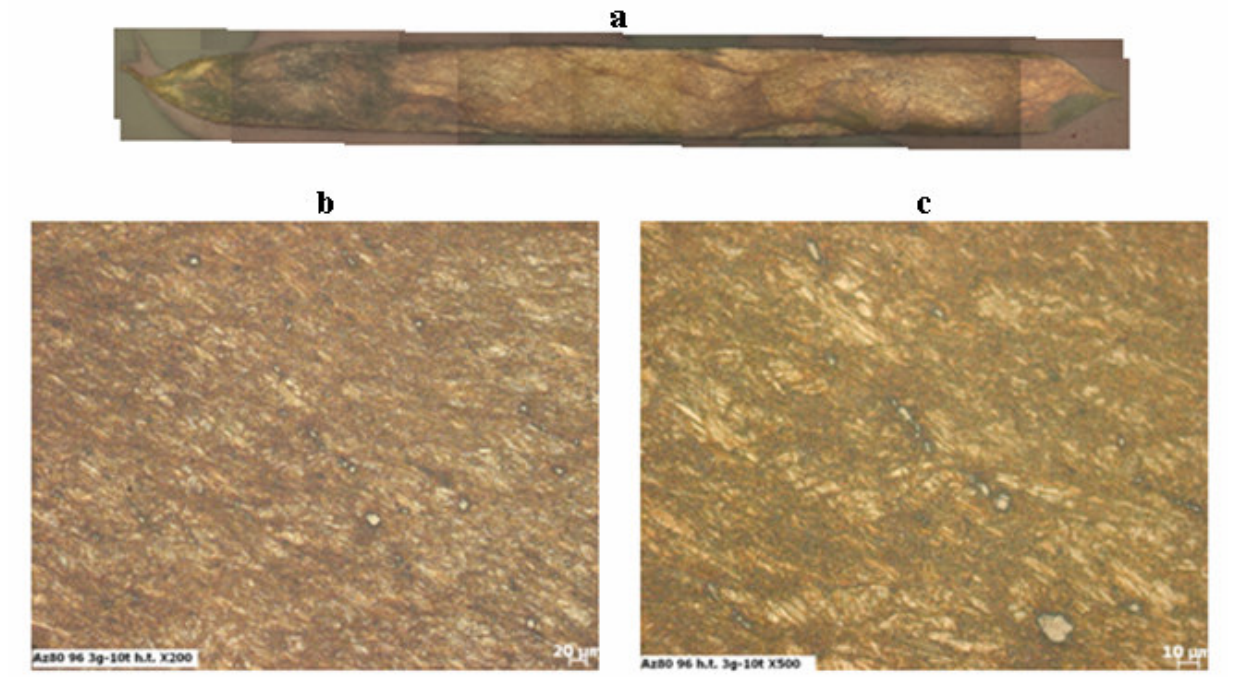
Şekil 9.34 3GPa basınç – 1 tur – 2° – ısıtıl işlemli numunenin a) yandan kesitinin montesi
b) kenar kısmı X200 c) merkez kısmı X500.



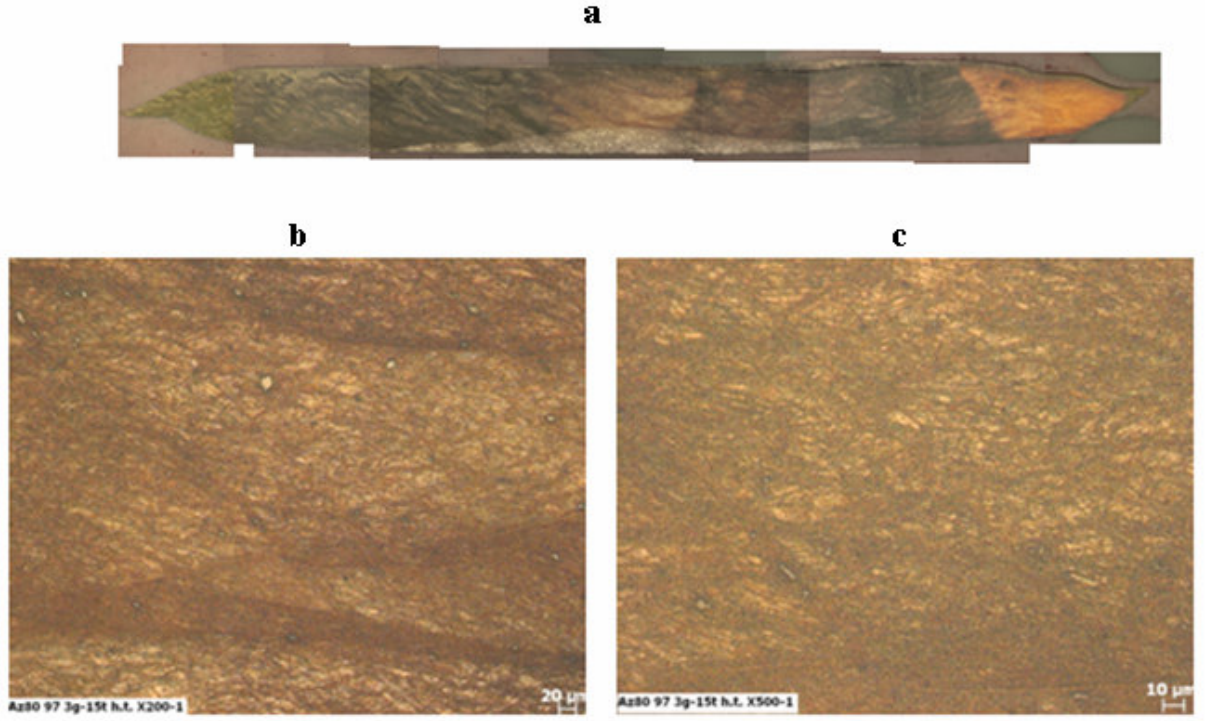
Şekil 9.35 3GPa basınç – 3 tur – 2° – ısıt işlemlili numunenin a) yandan kesitinin montesi
b) kenar kısmı X200 c) merkez kısmı X500.



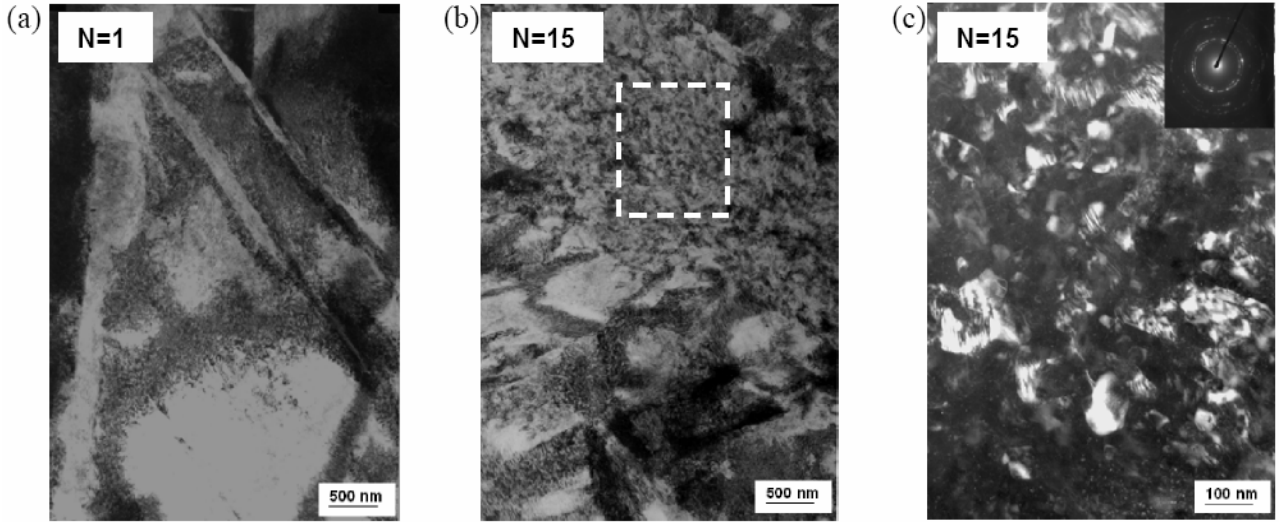
Şekil 9.36 3GPa basınç – 5 tur – 2° – ısıt işlemlili numunenin a) yandan kesitinin montesi
b) kenar kısmı X200 c) merkez kısmı X500.



Şekil 9.37 3GPa basınç – 10 tur – 2° – ısıtılmış numunenin a) yandan kesitinin montesi
b) kenar kısmı X200 c) merkez kısmı X500.



Şekil 9.38 3GPa basınç – 15 tur – 2° – ısıtılmış numunenin a) yandan kesitinin montesi
b) kenar kısmı X200 c) merkez kısmı X500.



Şekil 9.39 3GPa basınç – 15 tur – 2° – ısıtılmış numunenin a) yandan kesitinin montesi b) kenar kısmı X200 c) merkez kısmı X500 (Ortalama tane boyutu 100–200 nanometre).

3GPa basınç ve 1–15 tam tur burulan numunelerin, tane boyutları hakkında daha doğru bir karar verebilmek için, bu numunelerin merkez kısımlarından alınan TEM fotoğrafları incelenmiştir. Yukarıdaki TEM resimleri bizlere HPT işlemi sonunda, yapının değiştiğini kanıtlamaktadır. 1 tam tur burulan numunedeki ikizlenmeler açık bir biçimde fark edilmektedir. Ayrıca ikizlenme bölgelerinde, dislokasyonların biriktiği ve karmaşık bir düzenle bu sınırlarda yer edindiği açıkça gözlenmektedir. 15 tam tur burulan numunede ise yapı içerisindeki düzen karşımıza çıkmaktadır. Resim dikkatlice incelendiğinde, üst kısımda özellikle işaretlenmiş bölgede, tanelerin çok ince olduğu gözlenmektedir. Aksi durum ise numunenin alt kısmındaki tanelerin, üst kısmına nazaran daha büyük olduğundan ortaya çıkmaktadır. 15 tam tur burulma sonunda, tane boyutu ortalama olarak 300 ile 500 nm civarındadır. Kesikli çizgi ile belirtilmiş bölgedeki tanelerin boyutları ise 100 nm’inde altındadır.

TEM’de incelenmek üzere numuneler, işlem sonundaki sahip oldukları ortalama 1,5 mm kalınlıktan mekanik zımparalama sayesinde 150 mikrona kadar getirilmiştir. Ardından, LiCl ve Mg-Cl çözeltileri içinde -50°C elektro parlatma işlemine maruz bırakılmıştır. Bu işlemin akabinde oksit tabakasını metal yüzeyinden uzaklaştırmak için “GATAN PIP” adı verilen

cihazla 20 dakika içerisinde, 2 kV enerji kullanılmıştır. En son aşamada ise, 200 kV' lik "JEOL 2000 FX" isimli cihazla resimleri çekilmiştir.

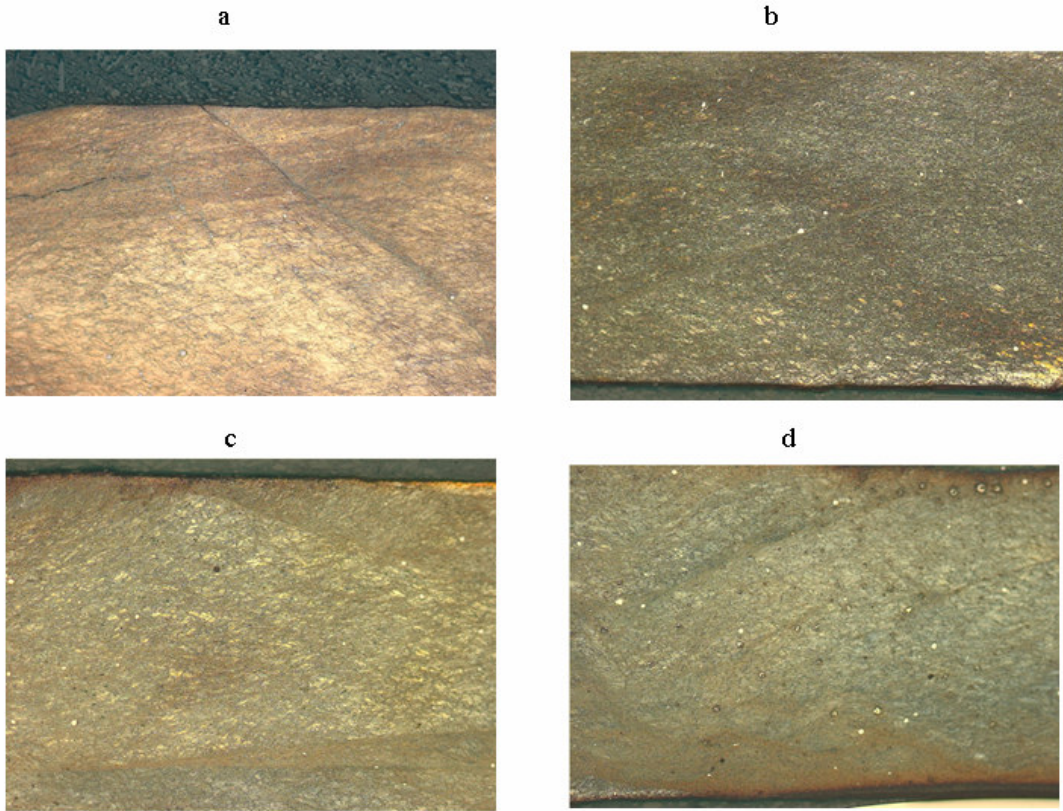
Isıl işlem görmüş, 3 GPa yük ve 2° / dakika burulma uygulanmış numunelerin mikro yapıları ayrı ayrı incelendiğinde bir takım tespitlerde bulunmak mümkündür. Numunelerin genelinde homojen olmayan tane küçülmelerini görmek mümkündür. Özellikle numunelerin kenar ve merkez kısımlarında bu fark, açık bir biçimde dikkatimizi çekmektedir. Bunun yanı sıra bölgesel anlamda tanelerin iç kesimleri ve tane sınırları arasındaki, tanelerin de boyutlarında farklılıklar göze çarpmaktadır. 3GPa–15 tur burulan numunenin sahip olduğu tane küçülmesinin, başlangıç ve 3GPa–0 tur burulan numuneye nazaran çok daha etkili olduğu artan burulma oranlarının tane küçülmesine olumlu yönde etki ettiğini göstermektedir. Fakat dikkat edilmesi gereken önemli nokta ise, burulma işlemine tabi tutulmuş numunelerin mikro yapılarında çok belirgin farklılıkların bulunmamasıdır. Ayrıca, mikro yapılar incelendiğinde birçok ikizlenmenin de var olduğu açıkça görülmektedir. İkizlenme, soğuk deformasyonun çok yoğun ve sıcaklık oranlarının düşük olduğu durumlarda, tanenin bir kısmının şekil değiştirmesi, diğer kısmının ise şekil değiştirmeden kalmasından dolayı ortaya çıkan ayna görünümüdür. Buradaki mikro yapılarda, bu tarz ikizlenmeleri görmek oldukça mümkündür. Elde edilen sertlik değerleri ise sırasıyla 0, 1, 3, 5, 10 ve 15 tur burulma için 97 HV, 122 HV, 114 HV, 118 HV, 116 HV ve 125 HV' dir. Yani, artan burulma oranlarıyla beraber numunedeki sertlik artışı aynı şekilde homojen değildir. Bu numunelerden alınan sertlik değerlerini, bir sonraki sayfadaki tabloda görebiliriz.

Çizelge 9.2 Isıl işlem görmüş 3GPa yük altında 2° / dakika burulan numunelerin çapları boyunca sertlik analizi.

Isıl İşlem Görmüş 2°/Dakika Burulmuş Numunelerin Çapları Boyunca Sertlik Analiz Tablosu							
Ölçüm noktası (mm)	Başlangıç	3 GPa-0t	3 GPa-1t	3 GPa-3t	3 GPa-5t	3 GPa-10t	3 GPa-15t
0	73	108	125	118	117	108	117
0,2	76	106	122	109	111	117	124
0,4	81	106	124	120	122	124	123
0,6	80	100	118	131	114	121	121
0,8	77	98	127	124	127	114	116
1	76	102	123	120	121	117	131
1,2	76	101	119	119	120	116	137
1,4	74	102	122	115	125	119	128
1,6	70	98	117	121	132	113	119
1,8	77	96	120	125	122	112	120
2	76	97	119	112	113	113	129
2,2	96	96	122	119	113	109	123
2,4	80	91	124	106	115	115	121
2,6	90	98	126	109	120	122	120
2,8	78	97	124	114	118	126	130
3	76	94	125	108	119	111	116
3,2	79	97	124	114	121	120	135
3,4	83	98	119	111	118	128	126
3,6	83	95	118	118	112	118	124
3,8	77	94	114	104	119	118	126
4	80	92	124	104	111	117	129
4,2	78	95	120	116	117	119	126
4,4	86	96	117	112	114	119	130
4,6	93	92	128	108	113	116	129
4,8	88	91	119	106	120	114	122
5	83	92	116	102	116	117	124
5,2	80	95	123	108	115	114	126
5,4	78	94	120	106	114	105	126
5,6	86	92	127	108	117	111	124
5,8	93	91	121	117	119	107	120
6	88	92	124	116	117	114	118
Min (Hv)	70	91	114	102	111	105	116
Max (Hv)	96	108	128	131	132	128	137
Ortalama (Hv)	81	97	122	114	118	116	125

Numunelerin sertlik analiz sonuçlarına baktığımızda, mikro yapılarında karşımıza çıkan tutarsız ve homojen olmayan durumun, mekanik özelliklere de yansıdığı anlaşılmaktadır. Örneğin, 3GPa-1t numunesinin sahip olduğu ortalama sertlik değeri 122 HV iken, 3GPa-3t 5t-10t numunelerin sertlikleri sırasıyla 114 HV, 118 HV ve 116 HV' dir. Başlangıçta 81 HV olan sertlik, sadece 3 GPa yük uygulanmasının ardından 97 HV' ye kadar çıkmıştır. Uygulanan sadece 1 tur burulma işlemi ile beraber bu sertlik değeri 122 HV' ye kadar artmıştır. Bu da bize, uygulanan burulma işleminin, numunelerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği yönünde bilgi vermektedir.

Kullandığımız cihazın kapasitesini de göz önüne alarak, ısıtılmış ve 81 HV sertliğe sahip numuneye maksimum yük uygulayarak, numunelerin mekanik ve mikro yapıdaki özelliklerinin değişimini görmek istedik. Bu amaçla, 5 GPa yük altında sırasıyla 0 tur, 1 tur, 3 tur ve 5 tur burulma işlemi uygulayarak, aşağıdaki mikro yapılara sahip numuneleri elde ettik. Numunelerin mikro yapılarının ilk incelendiği anda dikkati çeken konu, henüz hiç burulma işlemine maruz kalmamış numune de bile, 5GPa yükün etkisiyle çatlakların oluşmasıdır.



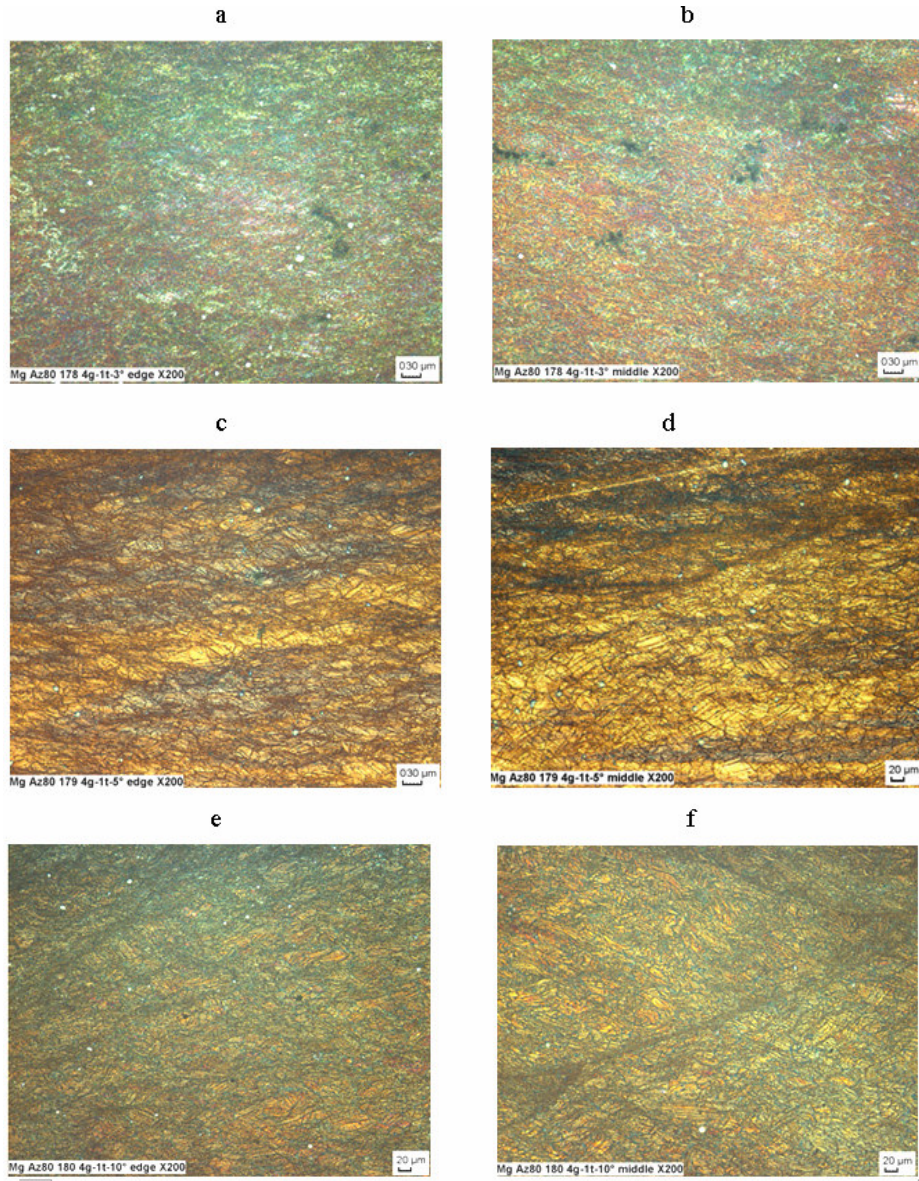
Şekil 9.40 a) 5GPa-0 tur burulan b) 5GPa-1 tur burulan c) 5GPa-3 tur burulan, d) 5GPa-5 tur burulan numunelerin merkez kısımları.

Çizelge 9.3 Isıl işlem görmüş 5GPa yük altında 2° / dakika burulmuş numunelerin çapları boyunca sertlik analizi.

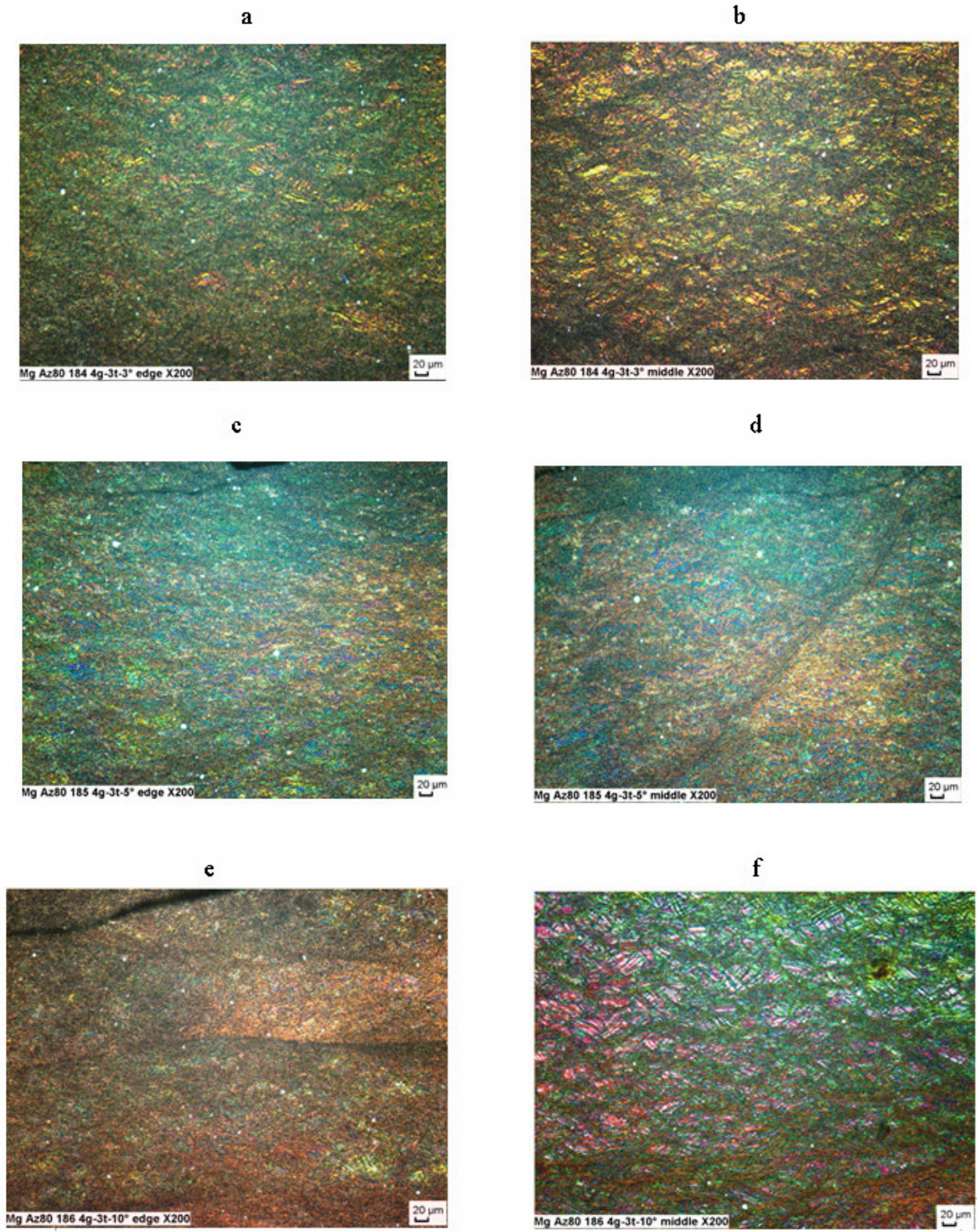
Isıl İşlem Görmüş 5GPa yük altında 2°/Dakika Burulmuş Numunelerin Çapları Boyunca Sertlik Analiz Tablosu					
Ölçüm noktası (mm)	Başlangıç	5 GPa-0t	5 GPa-1t	5 GPa-3t	5 GPa-5t
0	78	114	104	116	109
0,2	74	111	113	115	112
0,4	78	102	122	112	121
0,6	83	100	114	109	119
0,8	90	102	121	112	115
1	77	99	119	110	117
1,2	87	102	112	118	109
1,4	74	102	108	116	110
1,6	85	97	112	109	109
1,8	79	92	105	118	109
2	83	96	111	107	109
2,2	90	98	103	110	111
2,4	92	98	114	106	108
2,6	84	99	109	116	111
2,8	91	110	110	111	120
3	82	108	110	102	109
3,2	93	105	114	109	110
3,4	83	102	109	107	115
3,6	90	99	108	114	110
3,8	81	95	114	110	112
4	95	95	105	114	118
4,2	86	101	111	107	114
4,4	91	98	104	113	114
4,6	100	97	108	103	117
4,8	81	103	122	100	113
5	89	98	111	106	115
5,2	81	102	113	109	116
5,4	78	99	104	99	103
5,6	84	100	105	103	109
5,8	79	104	105	108	112
6	80	104	110	117	109
min (Hv)	74	92	103	99	103
max (Hv)	100	114	122	118	121
Ortalama (Hv)	84	101	111	110	112

5GPa yüke maruz kalmış numunelerin, merkez kısmından kenar kısmına kadar olan sertlik taraması sonucunda, 3GPa yüke maruz kalmış numunelere göre, daha efektif sertlik değerleri bulunduğumuzu söyleyemeyiz. Bunun nedenide yine aynı şekilde; homojen bir biçimde küçülmeyen tanelerin yapıda oluşturduğu etki olarak düşünülebilir.

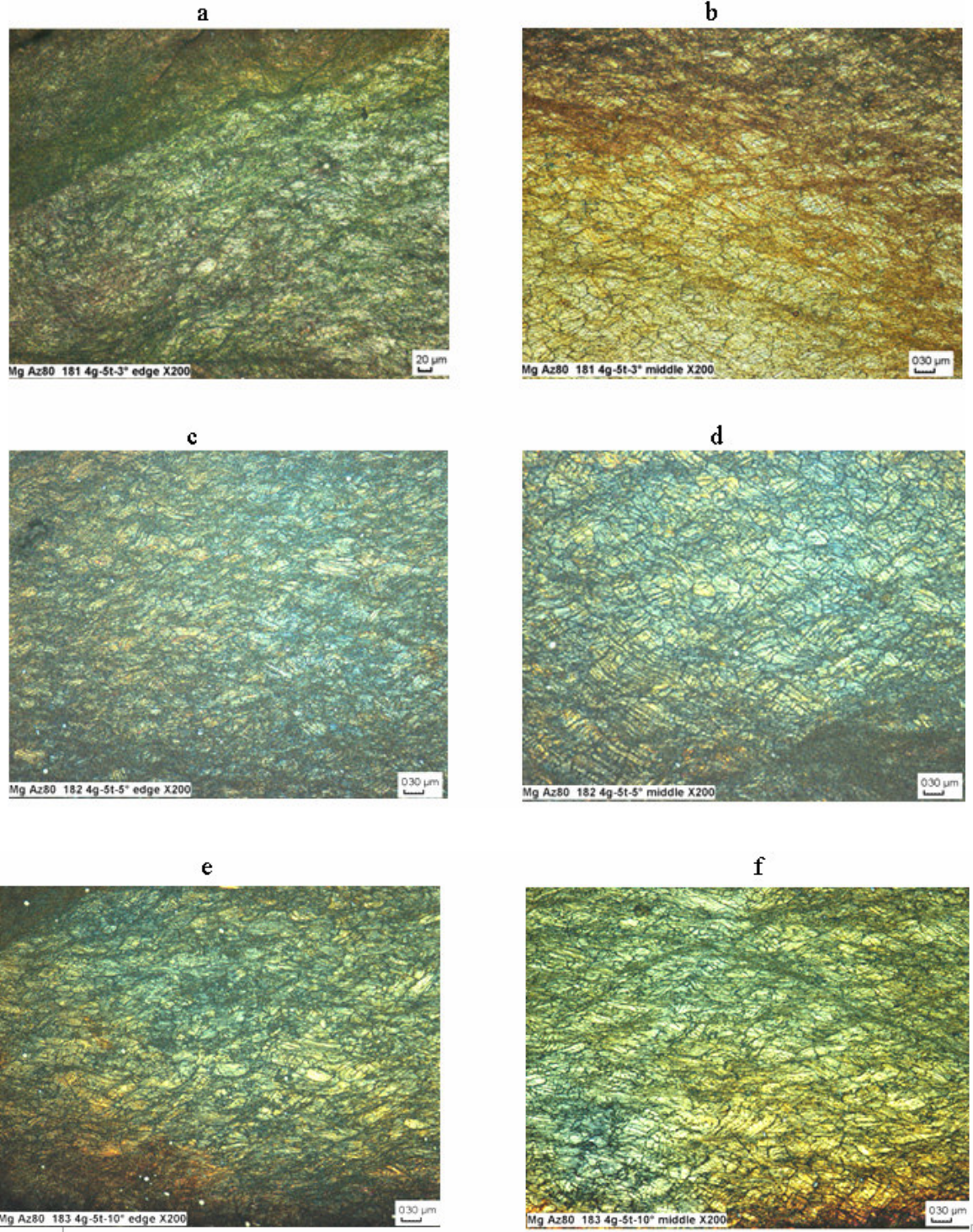
Yaptığımız tüm deneysel çalışmaların sonunda, mekanik özelliklere, burulma derecelerinin etkisini görmeyi amaçladık. Bu amaç ile 4 GPa yük altında numunelere 3°, 5° ve 10 ° / dakika olacak şekilde 1, 3, 5 tam tur burulma işlemini uyguladık.



Şekil 9.41 a) 4GPa-1 tur-3° kenar kısmı X200 b) 4GPa-1 tur-3° merkez kısmı X200
c) 4GPa-1 tur-5° kenar kısmı X200 d) 4GPa-1 tur-5° merkez kısmı X200 e) 4GPa-1
tur-10° kenar kısmı X200 f) 4GPa-1 tur-10° merkez kısmı X200.



Şekil 9.42 a) 4GPa-3 tur-3° kenar kısmı X200 b) 4GPa-3 tur-3° merkez kısmı X200
 c) 4GPa-3 tur-5° kenar kısmı X200 d) 4GPa-3 tur-5° merkez kısmı X200 e) 4GPa-3
 tur-10° kenar kısmı X200 f) 4GPa-3 tur-10° merkez kısmı X200.



Şekil 9.43 a) 4GPa-5 tur-3° kenar kısmı X200 b) 4GPa-5 tur-3° merkez kısmı X200
 c) 4GPa-5 tur-5° kenar kısmı X200 d) 4GPa-5 tur-5° merkez kısmı X200 e) 4GPa-5
 tur-10° kenar kısmı X200 f) 4GPa-5 tur-10° merkez kısmı X200.

Çizelge 9.4 Isıl işlem görmüş 4GPa yük altında burulmuş numunelerin çapları boyunca sertlik analizi.

Isıl İşlem Görmüş 4GPa yük altında Burulmuş Numunelerin Çapları Boyunca Sertlik Analiz Tablosu										
Ölçüm noktası (mm)	Başlangıç	4GPa-1±3°	4GPa-1±5°	4GPa-1±10°	4GPa-3±3°	4GPa-3±5°	4GPa-3±10°	4GPa-5±3°	4GPa-5±5°	4GPa-5±10°
0	78	124	118	116	126	120	120	114	127	120
0,2	74	119	116	122	122	122	119	130	121	132
0,4	78	121	112	120	117	113	122	132	121	125
0,6	83	122	109	114	120	121	122	137	122	127
0,8	90	111	111	112	120	123	110	126	120	127
1	77	116	116	110	121	117	114	119	122	127
1,2	87	107	106	117	114	120	118	117	120	127
1,4	74	114	108	113	120	122	106	124	124	117
1,6	85	110	104	109	115	115	116	120	120	124
1,8	79	108	110	110	114	115	115	111	120	120
2	83	110	106	105	113	115	116	119	119	121
2,2	90	113	108	113	119	113	111	120	125	117
2,4	92	111	117	108	113	112	105	120	120	130
2,6	84	120	114	102	113	112	116	114	121	117
2,8	91	113	113	105	116	115	118	118	120	110
3	82	125	107	110	110	103	112	114	121	121
3,2	93	102	110	112	122	110	123	125	120	136
3,4	83	114	111	112	126	112	117	124	121	123
3,6	90	117	114	111	123	113	123	120	118	124
3,8	81	107	113	102	119	115	120	117	130	124
4	95	112	106	113	124	115	119	122	137	126
4,2	86	106	104	110	111	119	118	123	132	114
4,4	91	113	110	111	122	118	115	124	132	123
4,6	100	116	104	109	115	108	109	115	129	128
4,8	81	117	116	112	123	107	116	125	132	119
5	89	113	113	109	115	108	112	116	127	112
5,2	81	120	114	114	120	113	114	120	123	128
5,4	78	112	116	119	120	120	110	110	119	135
5,6	84	110	115	107	117	102	109	112	126	116
5,8	79	120	118	99	113	111	112	106	123	124
6	80	114	116	108	107	112	111	108	117	126
min(Hv)	74	102	104	99	107	102	105	106	117	110
max(Hv)	100	125	118	122	126	123	123	137	137	136
Ortalama (Hv)	84	114	111	111	118	114	115	119	124	123

Elde edilen mikro yapılara baktığımız anda, taneler arası ikizlenmeler görmemiz oldukça mümkündür. Ayrıca, çatlak oluşumu hemen her numunede karşımıza çıkmaktadır. Tanelerin boyutları merkez ve kenar kısımlarında farklılık göstermektedir. Kenar kısımlardaki tanelerin boyutlarının, merkez kısımlardaki tane boyutlarına nazaran çok daha küçük olduğu anlaşılmaktadır.

10. SONUÇLAR

Mg AZ80 alaşımına uygulanan, oda sıcaklığındaki HPT işleminde, mikro yapıdaki değişim ve sertlikteki artış, yapılan bütün incelemeler neticesinde net bir biçimde gözlenmiştir. Artan presleme ve burulma oranlarıyla, tane yapısının da daha homojen bir hale dönüştüğü anlaşılmıştır. Başlangıçta, az sayıda burulan numunelerdeki tane küçülmesinin, sadece tanenin kısmi bölgelerinde ve ikizlenme sınırlarında ortaya çıktığını söyleyebiliriz. En belirgin şekildeki tane küçülmesi, 3GPa–15 tur burulan numunede gözlenmiştir. Bu numunede ortalama tane boyutu, 100 nm’ nin de altında olan tanelere rastlamak mümkündür. Fakat başlangıçta ortalama 81 HV olan sertliğin, 3GPa–15 tur burulan numunede 125 HV’ ye kadar çıktığı gözlenmiştir. Sertlik artışına baktığımızda, tam anlamıyla homojen bir sertlik artışından söz etmemiz mümkün değildir. Bu, belki sertlik ölçümü için kullandığımız sertlik ölçüm cihazında, numuneye batan ucun, geniş bir alanı kapsaması ve bu arada birçok ince tanelerin bir arada bulunduğu bir sertlik ölçümü yapmasından dolayı olabilir. Yapılan deneyler neticesinde;

1. Mg AZ80 alaşımının sertliğinin, HPT işlemi ile beraber arttığı açıkça tespit edilmiştir. Bu nedenle HPT işleminin mekanik özelliklere olumlu katkı yaptığı söylenebilir.
2. Numunelerin sertliklerinin artmasının en önemli nedeni olarak, tane boyutunun nano mertebelere kadar küçülmesi olarak gösterilebilir.
3. Deney sonrasındaki numunelerden elde edilen sertliklerin, numunelerin merkez kısmından kenar kısmına doğru, çok belirgin olmayan bir artış gösterdiği gözlenmiştir.
4. Sertlik artışındaki düzensizliğin, mikrovickers test cihazının batıcı ucunun çok fazla geniş bir alanı kapsayarak, tane boyutu farklı olan birçok taneyi kapsamasından dolayı olduğu düşünülmüştür.
5. En küçük tane boyutu, 3GPa yük ve 15 tam tur burulan numuneden elde edildiği için HPT işleminde, MgAZ80 alaşımına uygulanacak en uygun presleme değerinin 3 GPa ve burulma sayısının da 15 tur olduğu öngörülmüştür.
6. Yapı içerisindeki tane boyutlarının azalışlarının, her bölgede eşit oranlarda olmadığından dolayı, HPT işleminin homojen bir biçimde malzeme üzerinde etkili olmadığı söylenilebilir.
7. Mikro yapıların hemen hemen tümünde, aşırı soğuk şekillendirmeden dolayı ikizlenmelerin meydana geldiği gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

Alexander, David J., (2007), “New Methods for Severe Plastic Deformation Processing” ASM International , 360—Volume 16(3)

Bakkaloğlu, A., (2007), “Toz ve Nano malzemeler Ders Notları”, İstanbul

Baik S.C. , Estrin Y. , Kim, H.S. and Hellmig, R. J. , (2003) , “Materials Science and Engineering Vol. A351: 86

Estrin, Y. ,Yi, S.B., Brokmeier, H.-G. , Zuberova, Z., Yoon, S.C. , Kim, H.S. and Hellmig, R.J. , (2008), “Int. J. Mater. Res. Vol. 99: 50”

Furukawa, M., Horita, Z., Nemoto, M., Langdon, T. G., (2002), “Materials Science and Engineering A324: 82–89”

Hamu, G.B., Eliezer, D. and Wagner L. J. , (2008), “Alloys Comp.” in pres

Horita, Z. , Langdon, T.G., (2005), “ Materials Science and Engineering A 410–411: 422 425”

Kai, M., Horita, Z. and Langdon, T.G., (2008), “Materials Science and Engineering A” in press

Kai, M., Horita, Z., Langdon T. G., (2007), “Developing Grain Refinement and Superplasticity in a Magnesium Alloy Processed by High-Pressure Torsion

Kainer K.U. (2003), “ Magnesium Alloys and Technologies”

Matsubara, K., Miyahara, Y. , Horita, Z. and Langdon, T.G. , (2003), “ Acta Mater. Vol. 51 3073”

Sakai, G., Nakamura, K., Horita, Z. and Langdon, T.G. , (2005), “Materials Science and Engineering. Vol. A406: 268”

Sakai, G., Horita, Z. and Langdon, T.G. , (2005), “Materials Science and Engineering. Vol. A 393: 344”

Tekinbaykal D., Oğuz M., (2008), “Nanomalzemeler ve Nanoteknoloji”, YTÜ Lisans Tezi

Valiev, R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrow I.V. , (2000), “Prog. Mater. Sci. Vol. 45: 103”

Valiev, R.Z. , Langdon T.G. (2006) “Prog. Mater. Sci. Vol. 51: 881”

Valiev, R. Z., Estrin, Y., Horita, Z., Langdon, T. G., Zehetbauer, M. J., Zhu, Y. T., (2006), “Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation”

Vizyon 2023 projesi Nanoteknoloji Strateji Grubu, (Ağustos 2004), “Nanobilim ve Nanoteknoloji Stratejileri” Ankara

Zhu, Y. T., Langdon, T. G., (2004), “The Fundamentals of Nanostructured Materials Processed by Severe Plastic Deformation”

İNTERNET KAYNAKLARI

<http://www.nanoturk.com>

EKLER

Bu çalışmanın deneysel kısmı, 2007–2008 yılında erasmus ğrencisi olarak bulunduğum Clausthal Teknoloji Üniversite’ sinde (ALMANYA), tarafımdan yapılmıştır.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	02.06.1983	
Doğum yeri	Zonguldak	
Lise	1998–2001	İTO Çatalca Çok Programlı Lisesi
Lisans	2001–2006	Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2006–2009	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Malzeme	

Çalıştığı kurumlar

2005–2009	Çetin Cıvata A.Ş.
-----------	-------------------