



EGE ÜNİVERSİTESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ti6Al4V SAC MALZEMESİNİN
DÜŞÜK DARBE HIZLARINDAKİ DEFORMASYON
DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI**

Nihal YUMAK

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Yeliz PEKBEY

İkinci Danışmanı: Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu : 625.03.00

Sunuş Tarihi : 15.01.2015

Bornova-İZMİR

2015

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**Ti6Al4V SAC MALZEMESİNİN
DÜŞÜK DARBE HIZLARINDAKİ DEFORMASYON
DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI**

Nihal YUMAK

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Yeliz PEKBEY

İkinci Danışmanı : Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu : 625.03.00

Sunuş Tarihi : 15.01.2015

Bornova-İZMİR

2015

Nihal YUMAK tarafından YÜKSEK LİSANS tezi olarak sunulan “Ti6Al4V SAC MALZEMESİNİN DÜŞÜK DARBE HIZLARDAKİ DEFORMASYON DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 15.01.2015 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Raportör Üye : Doç. Dr. Yeliz PEKBEY

Üye : Prof. Dr. Hasan YILDIZ

Üye : Prof. Dr. Aydoğan ÖZDAMAR

Üye : Doç. Dr. Bülent İÇTEN

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Ti6Al4V SAC MALZEMESİNİN DÜŞÜK DARBE HIZLARDAKİ DEFORMASYON DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

15/ 01 / 2015

İmzası

Nihal YUMAK

ÖZET**Ti6Al4V SAC MALZEMESİNİN DÜŞÜK
DARBE HIZLARINDAKİ DEFORMASYON DAVRANIŞININ
ARAŞTIRILMASI**

YUMAK, Nihal

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yeliz PEKBEY

İkinci Danışmanı: Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Ocak 2015, 79 sayfa

Ti6Al4V alaşımı, düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek ısıl dayanımı ve korozyon direnci gibi özellikleri nedeniyle süper alaşım olarak isimlendirilmektedir. Bu nedenle Ti6Al4V malzemesi biyomedikal, havacılık, otomotiv ve uzay alanında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tüm bu kullanım alanları dikkate alındığında Ti6Al4V malzemesinin darbe davranışının bilinmesinde fayda vardır. Bu tez çalışmasında Ti6Al4V malzemesinin düşük enerji seviyelerindeki darbe davranışı araştırılmıştır. Darbe dayanımına etki eden vurucu uç geometrisi ve darbe enerjisi değişken olarak alınmıştır. Ayrıca Ti6Al4V malzemeye üç farklı ısıl işlem (yaşlandırma, kriyojenik ve kriyojenik işlem ardından yaşlandırma işlemi) uygulanarak malzemenin darbe dayanımına etkisi araştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, kriyojenik işlem, malzemenin sertliğini %2,25 arttırırken, yaşlandırma işlemi malzemenin sertliğinin %2 oranında azalmasına neden olmuştur. Uygulanan ısıl işlemler malzemenin akma ve çekme mukavemetini ciddi oranda etkilememiştir. Buna karşın, kriyojenik işlem ardından uygulanan yaşlandırma işlemiyle birlikte malzemenin hasar alanının azalmasına neden olmuştur. Bununla birlikte en büyük hasar ısıl işlem görmemiş numunede ve küresel vurucu uç geometrisiyle yapılan testlerde oluşmuştur.

Anahtar sözcükler: Ti6Al4V alaşımı, düşük hızda darbe testi, kriyojenik işlem, yaşlandırma işlemi, vurucu uç geometrisi.

ABSTRACT**INVESTIGATION OF DEFORMATION BEHAVIOUR OF
Ti6Al4V SHEET METARIAL IN LOW VELOCITY IMPACT**

YUMAK, Nihal

MSc in Mechanical Eng.

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Yeliz PEKBEY

Co-Supervisor: Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

January 2015, 79 pages

Ti6Al4V alloy is a super alloy which is used widely in biomedical, aerospace and automotive industry due to its low density, high strength, high heat and corrosion resistance properties.

To know the impact behavior of Ti6Al4V material is necessary when the area of usage is considered. In this study, impact behavior of Ti6Al4V material at low velocity was investigated. The impactor geometry and impact energy which affecting factors of the impact strength was taken as variable. Also three different heat treatment (aging, cryogenic treatment and aging after cryogenic treatment) are applied to materials.

According to the obtained results, the cryogenic treatment, while increasing the 2.25% hardness material, the aging treatment has led to 2% decrease in hardness. The applied heat treatments did not affect the yield and tensile strength of the material significantly. Moreover, the greatest damage was calculated in untreated samples in tests conducted with hemispherical impactor geometry.

Keywords: Ti6Al4V alloy, low velocity impact test, cryogenic treatment, aging treatment, impactor geometry.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca değerli bilgilerinden ve kıymetli görüşlerinden faydalandığım değerli danışmanlarım, **Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ** 'a ve **Doç. Dr. Yeliz PEKBEY** 'e

Maddi ve manevi destekleri hep benimle olan aileme, yanımda olan bütün değerli çalışma arkadaşlarıma ve başarımda katkısı bulunan herkese teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxi
ŞEKİLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxii
1.GİRİŞ	1
2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
2.1 Titanyum ve Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler.....	3
2.1.1 Kriyojenik işlem	3
2.1.2 Yaşlandırma işlemi	7
2.2 Darbe Dayanımına Etki Eden Faktörler	7
2.2.1 Vurucu uç geometrisi ve enerji seviyesi	7
2.2.2 Mekanik özelliklerin etkisi	10
3. TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARI	12
3.1 Kullanım Alanları ve Yapısal Özellikleri	12
3.2 Titanyum Alaşımları	14

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.2.1 Saf titanyum	16
3.2.2 α fazı titanyum alaşımları	16
3.2.3 β fazı titanyum alaşımları	17
3.2.4 α - β fazı titanyum alaşımları	18
3.3 Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Kullanım Alanları	18
3.3.1 Biyomedikal uygulamalar	19
3.3.2 Havacılık uygulamaları	20
3.4 Titanyum ve Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler	21
3.4.1 Kriyojenik işlem	22
3.4.2 Yaşlandırma işlemi	24
4. DARBE DENEYİ	26
4.1 Düşük Enerjili Darbe Testleri	27
4.1.1 İzod ve Charpy darbe test metodu	27
4.1.2 Ağırlık düşürmeli darbe test metodu	28
4.2 Yüksek Enerjili Darbe Testleri	30
4.2.1 Basınçlı hava ile darbe test metodu	30
4.2.2 Split-Hopkinson darbe test metodu	31

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5. METARİYAL VE METOD	33
5.1 Çalışma Yönteminin Belirlenmesi	33
5.2 Ti6Al4V Alaşımının Mekanik Özellikleri	34
5.3 Darbe Testi Uygulanacak Numunelerin Hazırlanması	34
5.3.1 Yaşlandırma işleminin uygulanması	34
5.3.2 Kriyojenik işleminin uygulanması	35
5.3.3 Kriyojenik işlem sonrası yaşlandırma işleminin uygulanması	36
5.4 Vurucu Uç Geometrilerinin Tasarlanması	36
5.5 Numunelerin Mikro Yapı İncelemeleri	39
5.6 Mekanik özelliklerinin belirlenmesi	41
5.6.1 Çekme testi	41
5.6.2 Sertlik ölçümü.....	42
5.7 Düşük Hızda Darbe Testleri	42
5.7.1 Düşük enerjili darbe testi sonuçlarının yorumlanması	44
5.7.1.1 Kuvvet-çökme grafikleri	45
5.7.1.2 Kuvvet-zaman grafikleri	47
5.7.1.3 Hız-zaman grafikleri	47

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.7.1.4 Enerji-zaman grafikleri	47
5.7.2 Hasar alanlarının hesaplanması	48
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	50
6.1 Mekanik Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	50
6.1.1 Sertlik ölçümlerinin sonuçları	50
6.1.2 Çekme testi sonuçları	51
6.1.3 Isıl işlem uygulanmış numunelerin mikro yapılarının incelenmesi	52
6.2 Düşük Enerjili Darbe Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	53
6.2.1 Isıl işlemsiz numunelerin darbe test sonuçlarının değerlendirilmesi	54
6.2.2 Isıl işlemin darbe dayanımına etkisi	62
6.2.3 Vurucu uç geometrisinin darbe davranışı üzerine etkisi	65
6.2.4 Deformasyona uğramış bölgelerin mikro yapı incelemeleri	73
7. SONUÇLAR	73
7.1 Gelecekteki Çalışmalar İçin Öneriler	75
KAYNAKLAR DİZİNİ	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Ti6Al4V alaşımlarının mekanik özellikleri	4
2.2 Ti6Al4V alaşımının faz dağılımı	6
2.3 Farklı vurucu uç geometrilerine göre deformasyon oluşumları	8
2.4 Farklı uç geometrilerine ait deformasyon karakteristiği	9
2.5 Darbe testleri sonrası deformasyon bölgelerinin mikro yapı incelemeleri	10
2.6 Darbe testi sonucu plakaların yüzeylerinde deformasyon oluşumu	11
3.1 Titanyum ve alaşımlarının kullanıldığı protez örneği	12
3.2 Titanyumun yoğunluk açısından diğer metallerle kıyaslanması	13
3.3 Titanyumun SPH ve HMK Kristal yapıları	14
3.4 Ti6Al4V alaşımının sınıflandıran 3 boyutlu faz diyagramı	16
3.5 Titanyum ve alaşımlarının özelliklerine uygun kullanım alanları	19
3.6 Ortopedik medikal titanyum kalça kemiği protezi	20
3.7 Havacılık uygulamalarında titanyumun kullanım yüzdeleri	21
3.8 Kriyojenik işlem prosedürü	23
3.9 Kriyojenik işlem döngüsünde oluşan malzeme mikro yapılar	24
3.10 Sünek Delinme	24

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 Metaller için darbe sırasındaki hasar oluşumu	25
4.2 İzod-Charpy darbe test düzeneği	28
4.3 Ağırlık Düşürmeli Darbe Test Cihazı	29
4.4 Yüksek enerjili darbe testlerinde kullanılan vurucu uç geometrileri	30
4.5 Basınçlı hava ile darbe test düzeneği	31
4.6 Split-Hopkinson darbe test düzeneğinin şematik gösterimi	31
4.7 Split-Hopkinson yüksek hızda darbe test düzeneği	32
5.1 Yaşlandırma işleminin uygulandığı rezistanslı ısı kontrollü fırın	35
5.2 Kriyojenik işlem tankı	35
5.3 ACT numunelerinin ısıtıl işlem prosedürü	36
5.4 DIN 1.2550 soğuk iş takım çeliğinin menevişleme diyagramı	37
5.5 DIN 1.2550 soğuk iş takım çeliğinin ısıtıl işlem şeması	37
5.6 Düşük hızda darbe testleri için tasarlanan darbe uç geometrileri	38
5.7 Düşük hızda darbe testleri için tasarlanan darbe uçları.....	38
5.8 Deformasyona uğramış bölgeden mikro yapı incelemesi	39
5.9 Hasarlı bölgenin kalıba alınmış hali.....	40
5.10 Metalografik numunelerin hazırlanmasında kullanılan cihazlar	40

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.11 ASTM E8M-04 Standartlarına göre hazırlanan numune ölçüleri	41
5.12 Su jetiyle kesilen çekme testi numuneleri	41
5.13 Deneylerde kullanılan sertlik ölçüm cihazı	42
5.14 Instron DYNATUP 9250HV düşük hızda darbe test cihazı	43
5.15 Düşük hızda darbe test cihazı	44
5.16 Düşük hızda yapılan bir darbe testinde kuvvet-çökme grafiği	46
5.17 Geri sekme kuvvet-çökme grafiğinde net çökme miktarının bulunması	46
5.18 Enerji-zaman grafiği	48
5.19 Hasar alanı hesaplamasının gösterimi	49
6.1 Sertlik ölçüm sonuçları	51
6.2 Ti6Al4V alaşımının faz dağılımı	52
6.3 Isıl işlem uygulanmışTi6Al4V alaşımının mikro yapıları görüntüleri	53
6.4 Grafiklerin sınıflandırılmasında kullanılan kodlama sistemi	54
6.5 Yarı küresel uç geometrisi için elde edilen darbe testi sonuçları	55
6.6 Yarı küresel uç geometrisiyle meydana gelen hasar şekilleri	56
6.7 90° vurucu uç geometrisiyle darbe testi sonuçları	58
6.8 90° vurucu uç geometrisiyle darbe testi sonrası hasar oluşumları	59

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.9 60° konik vurucu uç geometrisiyle uygulanan darbe testi sonuçları	61
6.10 60° konik vurucu uç geometrisiyle darbe testi sonucu hasar oluşumu	62
6.11 Farklı ısıtıl işlem uygulanmış numunelerin 80 J enerji seviyesindeki darbe testi sonuçları	63
6.12 80 J enerji seviyesinde yarı küresel uç geometrisiyle yapılan darbe testlerinde deformasyon oluşumları	64
6.13 Isıl işlem prosesinin ve enerji seviyesinin hasar alanı üzerine etkisi	65
6.14 Vurucu uç geometrilerinin darbe dayanımı üzerine etkisi	66
6.15 Farklı uç geometrilerinin ve enerji seviyelerinin etkisi	67
6.16 Isıl işlem uygulanmamış numunelerde 80 J enerji seviyesinde vurucu uç geometrisinin hasar oluşumuna etkisi	68
6.17 Isıl işlem uygulanmamış numunelerde, farklı uç geometrisinin ve darbe enerjisinin hasar üzerindeki etkisi	69
6.18 Farklı vurucu uç geometrilerinin 40 J enerji seviyesindeki hasar alanlarının incelenmesi	70
6.19 80 J enerji seviyesinde 90° konik vurucu uç geometrisiyle oluşan hasar bölgesinin incelenmesi	71
6.20 40 J enerji seviyesinde ısıtıl işlem uygulanmamış numunelerin farklı vurucu uç geometrileri mikro yapı değişimleri	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Üretilen malzeme grupları ve malzeme kodları	5
3.1 Ti6Al4V ve saf titanyum mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	15
3.2 β Titanyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri	17
3.3 Titanyum ve alaşımlarının özelliklerine göre kullanım alanları	19
3.4 Farklı Titanyum alaşımlarının yaşlandırma süreleri	25
5.1 Ti6Al4V alaşımına uygulanan ısıt işlemleri ve türü	33
5.2 Kullanılan Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri	35
5.3 DIN 1.2550 soğuk iş takım çeliğinin ısıt işlemleri	35
5.4 Üretilen vurucu uç geometrileri ve kısa kodlamaları	37
6.1 Çekme testi sonuçları	51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
m	Kütle
g	Yer çekimi ivmesi (m/s^2)
V	Hız (m/s)
L	Litre (l)
UT	Isıl işlemsiz numune
CT	Kriyojenik işlem uygulanmış numune
UTA_2	400 °C’de 3 saat yaşlandırma işlemi uygulanmış numune
UTA_3	550 °C’de 3 saat yaşlandırma işlemi uygulanmış numune
UTA_4	600 °C’de 3 saat yaşlandırma işlemi uygulanmış numune
CTA_2	Kriyojenik işlem + 400 °C’ de 3 saat yaşlandırma işlemi
CTA_3	Kriyojenik işlem + 550 °C’ de 3 saat yaşlandırma işlemi
CTA_4	Kriyojenik işlem + 600 °C’ de 3 saat yaşlandırma işlemi
F_{max}	Maksimum kuvvet (kN)
E_a	Absorbe edilen enerji (J)
d_{max}	Maksimum çökme (mm)
Δd	Elastik şekil değişimi (mm)
d_{net}	Plastik şekil değişimi (mm)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
<i>AT</i>	Yaşlandırma işlemi uygulanan numune
<i>CT</i>	Kriyojenik işlem uygulanan numune
<i>ACT</i>	Kriyojenik işlem ardından yaşlandırma işlemi
<i>T</i>	Isıl işlemsiz numune
<i>A90</i>	90° konik vurucu uç geometrisi
<i>A60</i>	60° konik vurucu uç geometrisi
<i>D12,7</i>	Yarı küresel uç geometrisi
<u>Kısaltmalar</u>	
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Enstitüsü
KB	Kayma bandı
SPH	Sıkı Paket Hegzogonal
HMK	Hacim Merkezli Kübik

1. GİRİŞ

Titanyum, otomotiv, havacılık, uzay, spor aletleri, taşımacılık, denizcilik, kimya sanayi ve endüstrinin birçok alanında geniş kullanıma sahiptir. Titanyum sahip olduğu yüksek dayanım, düşük yoğunluk ($4,4 \text{ g/m}^3$) ve mükemmel korozyon direnciyle endüstride yaygın olarak kullanılan diğer malzemelerden ayrılmaktadır. Bu sebeple günümüzde, alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra dünya üzerinde en çok kullanılan dördüncü element haline gelmiştir (Joshi, 2006).

Titanyum ilk olarak 17. yüzyılda maden bilimci William Gregor tarafından keşfedilmiştir. Alaşımlarının üretilmesi ve yaygın olarak kullanılmaya başlaması, saf şekilde elde edilmesinin güçlüğü ve üretim maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle 1950'li yıllarda mümkün olabilmektedir. Günümüzde, bine yakın titanyum alaşımı üretilmektedir. Üretilen alaşımlar içerisinde Ti6Al4V alaşımı en yüksek kullanım oranına sahiptir (Leyens and Peters, 2003). Tüm titanyum alaşımları Ti6Al4V alaşımından çeşitli mekanik özellikler ön plana çıkarılarak türetilmektedir. Ti6Al4V alaşımı maliyet yönünden diğer titanyum alaşımlarıyla kıyaslandığında aynı zamanda düşük maliyetlidir.

Mekanik özellikleri ve kullanım alanları düşünüldüğünde, Ti6Al4V alaşımının mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ve çeşitli yüklemeler altındaki deformasyon davranışının anlaşılması önemli hale gelmektedir. Bu amaçla bu tez çalışmasında, Ti6Al4V alaşımının, düşük enerjilerdeki darbe davranışı araştırılmıştır.

Literatürde Ti6Al4V alaşımının mekanik özelliklerinin geliştirilmesiyle ilgili çalışmalar incelendiğinde, çeşitli ısıtma işlemleri uygulanarak, mukavemetinin arttırılabileceği görülmüştür (Gu et al., 2014; 2013 Yıldız ve Nalbant, 2008). Buradan yola çıkarak, Ti6Al4V alaşımının mukavemetini azaltmadan tokluğunu arttırmak için alaşıma kriyojenik işlem, yaşlandırma işlemi ve kriyojenik işlem ardından yaşlandırma işlemi uygulanmıştır.

Ti6Al4V alaşımının darbe karakteristiğinin araştırılması sırasında malzemelerin darbe davranışlarına etki eden vurucu uę özellikleri ve darbe enerji seviyeleri dikkate alınarak, düşük enerjili darbe testleri artan enerji seviyelerinde ve üç farklı vurucu uę geometrisiyle uygulanmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatür incelendiğinde, Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri, yorulma davranışları ve işlenebilirliğine yönelik birçok çalışmaya rastlanmaktadır. Fakat Ti6Al4V alaşımının darbe davranışları ve darbe davranışlarına etki eden faktörlerin, ele alındığı çalışmaların az sayıda olduğu söylenebilir.

Son yıllarda yapılan Ti6Al4V alaşımıyla ilgili, düşük hızda darbe deneyleri ve darbe sonrası hasar oluşumu ve hasar oluşumuna etki eden faktörler ile ilgili literatürdeki çalışmalar aşağıda farklı başlıklar altında değerlendirilerek özetlenmiştir.

2.1 Titanyum ve Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler

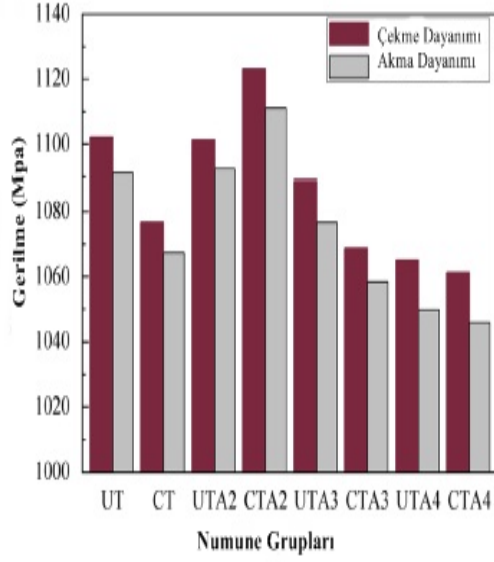
Titanyum ve alaşımlarına uygulan ısıt işlemler ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, yüksek ısıt verimleri sayesinde mekanik özelliklerinin geliştirilebildiği görülmüştür (Yıldız ve Nalbant, 2008; Jiang et al., 2010; Prieto et al., 2014; Gu et al., 2013). Titanyum ve alaşımlarına uygulanan kriyojenik işlem ve yaşlandırma işlemleriyle ilgili çalışmalar aşağıda verilecektir.

2.1.1 Kriyojenik işlem

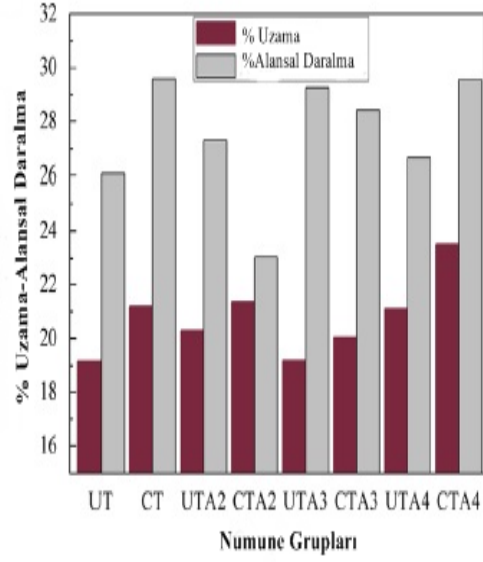
Kriyojenik işlem; çeliklerin aşınma dirençlerini, mekanik özelliklerini ve yorulma ömürlerini arttırmak için uygulanan ısıt işlemdir (Arslan ve Özdemir, 2013; Güneş vd., 2014; Amini et al., 2012). Kriyojenik işlem takım çeliklerinde, malzeme içindeki artık gerilmelerin giderilmesine, östenit fazının martenzit fazına dönüşmesine ve malzeme mikro yapısının daha düzenli bir hal almasına sebep olmaktadır. Fakat titanyum gibi demir dışı metaller için kriyojenik işlemin etkileri tam olarak açıklanamamıştır. Titanyum ve alaşımlarına uygulanan kriyojenik işlem malzeme üzerindeki etkilerini anlamak için literatür incelendiğinde, kriyojenik işlemin malzemenin sertliği, çekme dayanımı, tokluğu ve sünekliğine etki ettiği görülmüştür (Jiang et al., 2010; Gu et al., 2013).

Şekil 2.1' de kriyojenik işlem uygulanan Ti6Al4V alaşımının mekanik özelliklerindeki değişim görülmektedir. Çalışmada Çizelge 2.1'de verilen sekiz

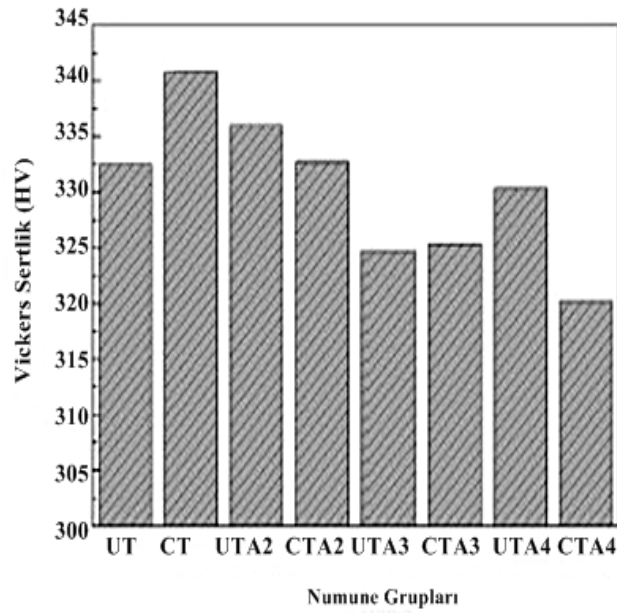
farklı malzeme grubu üretilerek kriyojenik işlemin ve yaşlandırma işlemlerinin mekanik özelliklere etkileri araştırılmıştır (Gu et al., 2013).



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.1 Ti6Al4V alaşımlarının mekanik özellikleri a) Çekme ve akma dayanımı, b) % uzama-alansal daralma, c) Vickers sertlik değerleri (Gu et al., 2013).

Çizelge 2.1 Üretilen malzeme grupları ve malzeme kodları (Gu et al., 2013).

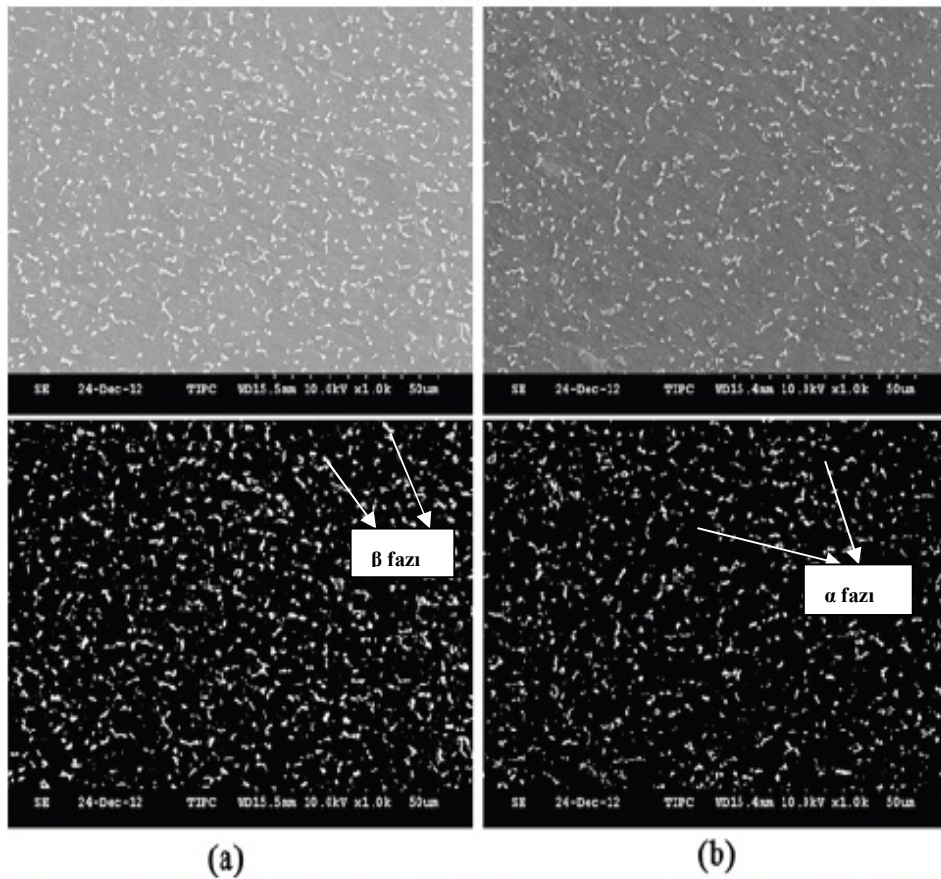
Numune Kodu	Uygulanan ısıt işlem
UT	Isıt işlem uygulanmamış numune
CT	Kriyojenik işlem uygulanmış numune
UTA ₂	400 °C' de 3 saat yaşlandırma işlemi uygulanmış numune
UTA ₃	550 °C' de 3 saat yaşlandırma işlemi uygulanmış numune
UTA ₄	600 °C' de 3 saat yaşlandırma işlemi uygulanmış numune
CTA ₂	Kriyojenik işlem ardından 400 °C' de 3 saat yaşlandırma işlemi uygulanmış numune
CTA ₃	Kriyojenik işlem ardından 550 °C' de 3 saat yaşlandırma işlemi uygulanmış numune
CTA ₄	Kriyojenik işlem ardından 600 °C' de 3 saat yaşlandırma işlemi uygulanmış numune

CT numunelerinde çekme dayanımında küçük miktarda (%2) düşüş görülürken, % uzama ve % kesit daralmasında %2 ve %3,5 oranlarında artış gözlemlenmiştir. Kriyojenik işlemle malzemenin sertliği %2,5 oranında artmıştır. CTA₂, CTA₃ ve CTA₄ numunelerinde ise % uzamanın yaşlandırma sıcaklığının artmasıyla birlikte arttığı, çekme dayanımının ise artan yaşlandırma işlemi sıcaklığıyla düştüğü görülmektedir. Kriyojenik işlem sonrası 650 °C' de yaşlandırma işlemi uygulanan numunede (CTA₄), en yüksek % uzama görülmüştür. Kriyojenik işlem ardından yaşlandırma işlemi uygulanan numunelerde ise sertlik değerleri düşmüştür. Çekme testi sonuçları ve sertlik ölçümleri değerlendirildiğinde, uygulanan ısıt işlemlerin, malzemenin çekme dayanımını düşürdüğü bu karşın malzemenin sertliğini arttırdığı görülmektedir (Gu et al., 2013).

Kriyojenik işlemin verimliliği üzerine etki eden diğer faktörler ise kriyojenik işlem sıcaklığı ve süresidir. Artan kriyojenik işlem süresine ve sıcaklığına bağlı olarak, malzemenin çekme dayanımı, akma dayanımı ve % uzama değerleri farklılıklar göstermektedir (Jiang et al., 2010; Gu et al., 2014). Gu ve arkadaşları kriyojenik işlem sıcaklığının ve süresinin mekanik özellikler üzerine etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, Ti6Al4V alaşımına -80 °C, -140 °C ve -196 °C' de ve 24, 48 ve 72 saat olmak üzere üç farklı sürede kriyojenik işlem uygulamıştır. Uygulanan kriyojenik işlemlerle birlikte, farklı işlem

sıcaklıklarının ve sürelerin malzemenin mekanik özelliklerine ve aşınma direncine etki ettiği görülmüştür. Ayrıca malzemenin mekanik özellikleri üzerinde işlem süresinin kriyojenik işlem sıcaklığından daha fazla etkili olduğu sonucu da çıkarılmıştır (Gu et al., 2014).

Kriyojenik işlemin Ti6Al4V alaşımının mikro yapısında meydana getirdiği değişimler incelendiğinde, işlem sonrası malzemedeki β fazlarını çökeltirerek daha sünek bir hal almasını sağlamaktadır. Şekil 2.2' de kriyojenik işlem sonrası malzemenin faz değişimleri görülmektedir. Şekil 2.2' de görülen siyah bölgeler α fazları, beyaz bölgeler ise β fazlarıdır. Numunelere uygulanan kriyojenik işlemle birlikte, alaşımın tane boyutlarında bir değişim görülmemektedir. Fakat uygulanan kriyojenik işlemle birlikte β fazları çökelmiştir ve α fazları içine dağılmıştır (Gu et al., 2014a; 2014b).



Şekil 2.2 Ti6Al4V alaşımının faz dağılımı a) Isıl işlem uygulanmamış numune, b) Kriyojenik işlem uygulanmış numune (Gu et al., 2014).

2.1.2 Yaşlandırma işlemi

Titanyum ve alaşımlarına sıkça uygulanan diğer ısı işlem yaşlandırma işlemidir. Yaşlandırma işlemi özellikle balistik dayanımı geliştirmek için uygulanabilmektedir. Burkins ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada yaşlandırma işlemi uyguladıkları numuneleri zırh delici 12,7 mm çapında mermiyle darbe testine tabi tutmuş ve yaşlandırma işlemiyle birlikte darbe dayanımının arttığı görmüştür (Burkins et al., 2000). Ti6Al4V alaşımına uygulanan yaşlandırma işlemleriyle birlikte malzemenin mekanik özelliklerindeki değişim Şekil 2.1’de verilmiştir. Yaşlandırma işlem sıcaklığının artmasıyla birlikte, çekme ve akma dayanımı azalmıştır. Sertlik ve % uzama değerleri ise 400 °C, 550 °C’ de yapılan yaşlandırma işlemlerinde düşüş görülürken, 650 °C’ de artış görülmüştür. Darbe dayanımı ve mekanik özelliklerin yanında, yaşlandırma işlemi malzemenin mikro yapısındaki faz morfolojisini de düzenlemiştir. Yaşlandırma işleminin ardından, mikro yapı değişimi incelendiğinde 400 °C’ de uygulanan yaşlandırma işleminden sonra β faz oranı % 6,3 azalırken, 650 °C’ de uygulanan yaşlandırma işleminden sonra % 3,5 artmıştır (Gu et al., 2013).

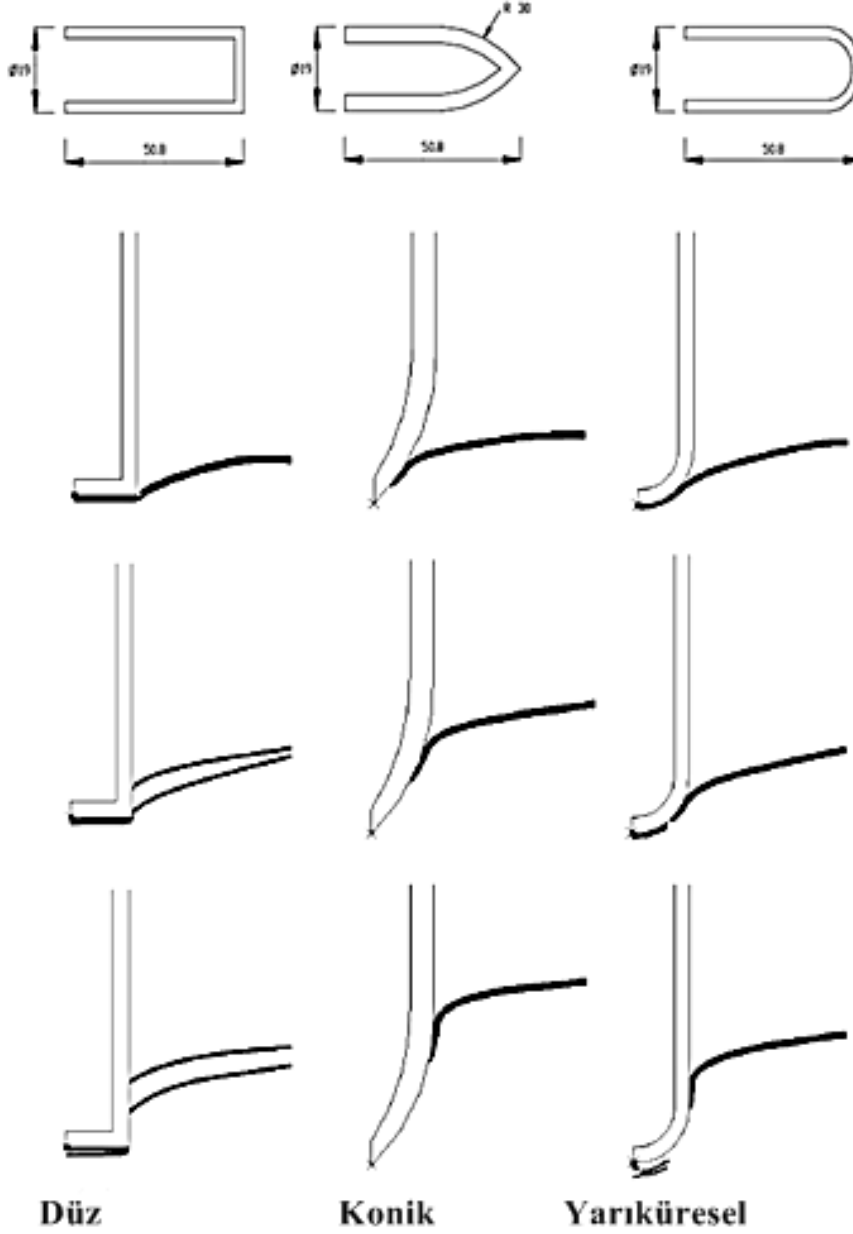
2.2 Darbe Dayanımına Etki Eden Faktörler

Darbe dayanımına etki eden faktörler arasında vurucu uç geometrisi, darbe enerji seviyeleri ve malzeme özellikleri gibi parametrelerin ön plana çıktığı görülmektedir (Borvik et al., 2002; Senthil and Iqbal, 2013). Bu faktörlerin her biri farklı başlıklar altında aşağıda irdelenmiştir.

2.2.1 Vurucu uç geometrisi ve enerji seviyesinin etkisi

Literatür incelendiğinde, darbe ucu olarak sıkça kullanılan geometrilerin yarı küresel, küt ve değişen açılarda konik geometriler olduğu görülmektedir (Borvik et al., 2002; Gupta et al., 2007, 2008). Vurucu uç geometrilerinin darbe karakteristiğine etkileri incelendiğinde küt geometrilerin yarı küresel ve konik vurucu uç geometrisine göre daha geniş hasar alanına sebep olduğu görülmektedir. Fakat artan darbe enerjilerinde düz vurucu uç geometrisinin oluşturduğu deformasyonun yarı küresel ve konik geometrilerle kıyaslandığında

daha az olduğu görülmektedir (Borvik et al., 2002). Şekil 2.3'te kesiti alınmış üç farklı vurucu uç geometrileri ve deformasyon oluşumları görülmektedir (Gupta et al., 2007).

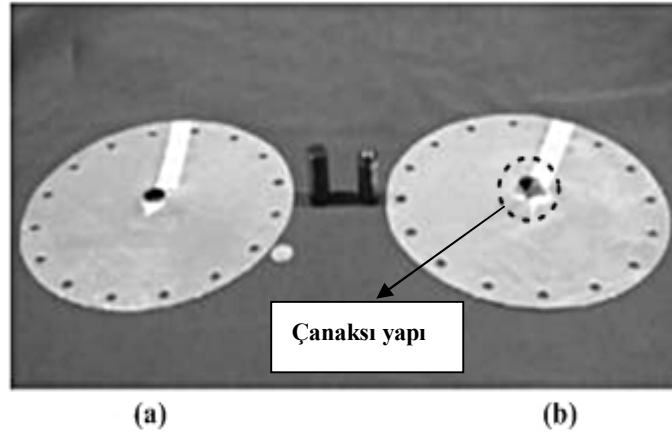


Şekil 2.3 Farklı vurucu uç geometrilerine göre deformasyon oluşumları (Gupta et al., 2008).

Düz vurucu uç geometrisiyle uygulanan darbe testi sonrası, vurucu uç geometrisinin temas alanı kadar bir alanda deformasyon oluşmuştur. Malzemede görülen çökme miktarı ise malzemenin kalınlığı kadardır. Konik geometride ise, deformasyon alanı, temas alanının az olması sebebiyle, dar bir alanda

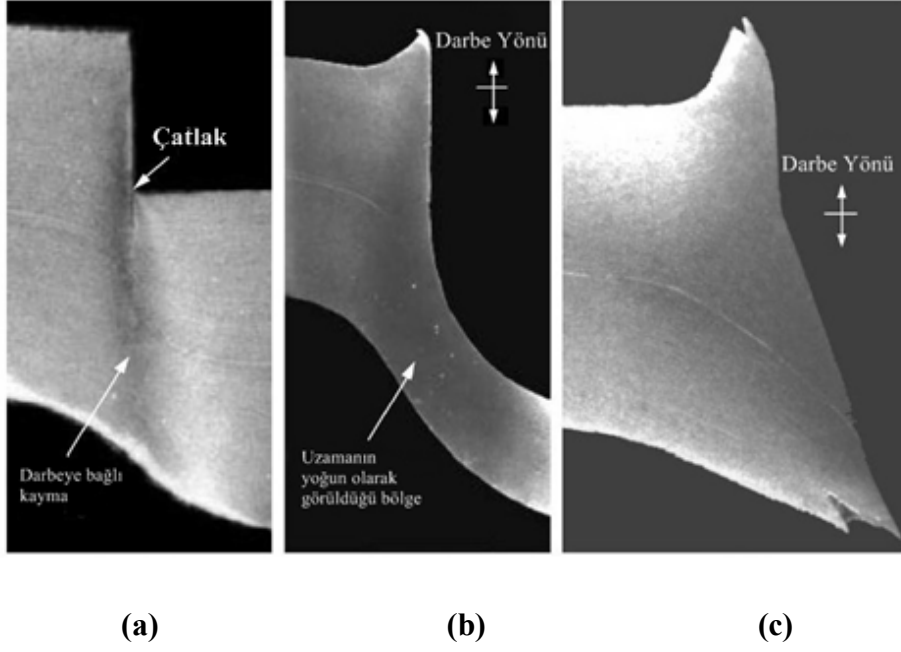
toplanmıştır. Konik vurucu uç geometrisinde ise artan darbe enerjisiyle birlikte malzemede gözlenen çökme artmış ve yırtılmalar oluşmuştur. Malzemenin arka tarafı incelendiğinde deformasyona uğrayan bölgede, çanaksı deformasyon oluşumu gözlenmiştir. Malzemede en fazla deformasyona sebep olan geometri, yarı küresel uç geometrisidir. Yarı küresel vurucu uç geometrisiyle deformasyon oluşumu kısmen konik geometriye benzemektedir. Fakat burada temas alanının daha fazla olması sebebiyle, deformasyon daha geniş bir alana yayılmıştır (Gupta et al., 2007).

Konik vurucu uç geometrisi ve yarı küresel uç geometrisiyle uygulanan testler sonucu oluşan deformasyon bölgeleri incelendiğinde, plakaların arka bölgelerinde Şekil 2.4’ de görülen çanaksı yapı oluşmuştur. Düz vurucu uç geometrisinde ise plakanın deformasyon bölgesinde çanaksı yapı ve çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir (Gupta et al., 2006).



Şekil 2.4 Farklı uç geometrilerine ait deformasyon karakteristiği a) Düz vurucu uç geometrisi, b) Yarı küresel vurucu uç geometrisi (Gupta et al., 2006).

Farklı vurucu uç geometrilerine ait deformasyon alanlarının mikro incelemeleri Şekil 2.5’ de verilmiştir. Düz vurucu uç geometrisiyle uygulanan darbe testinde daha keskin köşeler ve kalınlık boyunca düz bir deformasyon oluşumu görülmüştür. Fakat, konik ve yarı küresel geometride, darbe yönünde, darbe etkisiyle uzamalar, kırılmalar ve çatlak oluşumları gözlemlenmiştir (Borvik et al., 2002).



Şekil 2.5 Darbe testleri sonrası deformasyon bölgelerinin mikro yapı incelemeleri a) Düz geometri, b) Konik geometri, c) Yarı küresel geometri (Borvik et al., 2002).

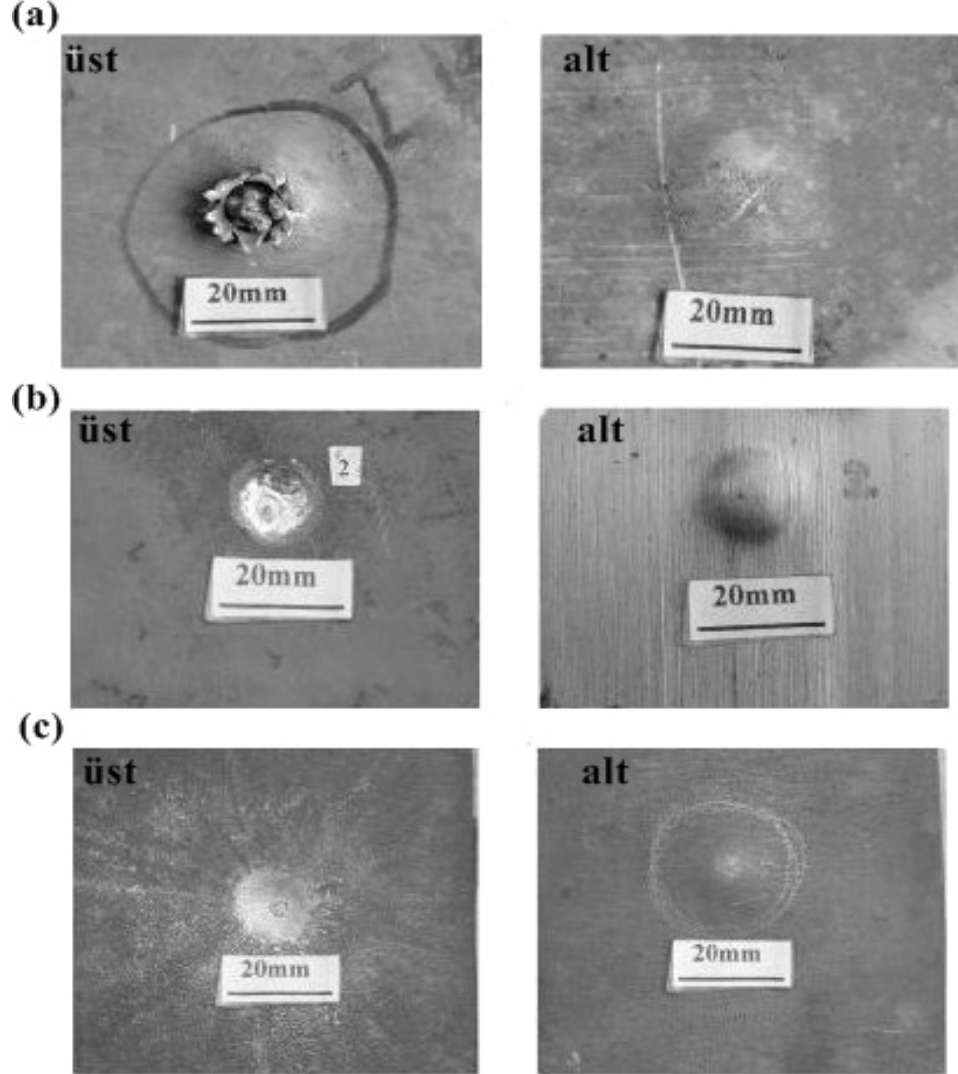
Vurucu uç geometrisinin yanında deformasyon oluşumuna etki eden diğer bir faktör ise, vurucu uç çapıdır. Vurucu uç çapının değişmesiyle birlikte, temas alanı, buna bağlı olarak üst yüzeydeki deformasyon alanı ve alt yüzeydeki çanak uzunluğu ve çanak sayısı değişmektedir. Aynı vurucu uç geometrisinde, farklı çaplarda üretilen vurucu uçlarla yapılan darbe testlerinde, vurucu uç çapının artmasıyla birlikte deformasyon alanı ve alt yüzeyde oluşan çanak sayısının arttığı görülmüştür (Senthil and Iqbal, 2013).

2.2.2 Mekanik özelliklerin etkisi

Farklı malzeme grupları, farklı mekanik özellikleri sebebiyle darbe altında farklı deformasyon davranışları gösterirler. Malzemelerin çekme davranışları, toklukları ve malzemeler üzerine sonradan yapılan ısıtma işlemleri malzemelerin deformasyon davranışlarını etkilemektedir.

Jena ve arkadaşları hem malzeme hem de ısıtma işlem türünün etkisini ortaya koyabilmek için, farklı ısıtma işlemi uygulanmış malzemelere yüksek enerji seviyelerinde darbe testleri uygulamıştır. Yüksek dayanımlı farklı sıcaklıklarda ısıtma işlemi tutulmuş zırh çeliği ve Al-7017 alaşımı plakaları yüksek hızlarda teste

tabi tutmuş, farklı malzeme özelliklerinin darbe dayanımı üzerine etkilerini araştırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre uygulanan ısıt işlemler neticesinde malzemenin mikro yapısı ve darbe dirençleri değişmiştir. Şekil 2.6' da görüldüğü üzere 3 farklı malzeme tipinden, 200 °C' de temperlenmiş zırh çeliğinin darbe dayanımı en yüksektir (Jena et al., 2010).



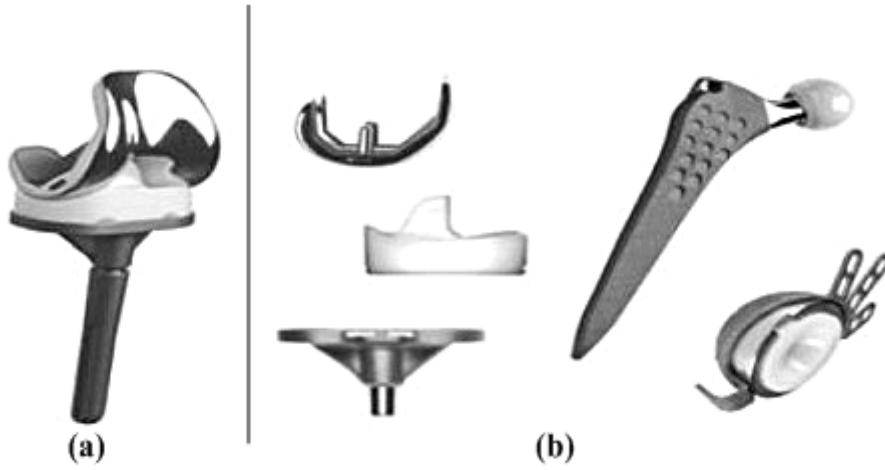
Şekil 2.6 Darbe testi sonucu plakaların yüzeylerinde deformasyon oluşumu **a)** Al-7017 plakanın hasar oluşumu, **b)** 10 mm kalınlığından 650 °C' de temperlenmiş zırh çeliğinin darbe sonrası hasar oluşumu, **c)** 6 mm kalınlığında 200 °C' de temperlenmiş zırh çeliğinin darbe sonrası hasar oluşumu (Jena et al., 2010).

3. TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARI

3.1 Kullanım Alanları ve Yapısal Özellikleri

İlk keşfedildiğinde mekanit adı verilen minerale daha sonra titanyum oksiti rutilden ayırıştırarak Martin Heinrich Klaproth, Yunan mitolojisindeki titanlardan esinlenerek Titanyum adını vermiştir.

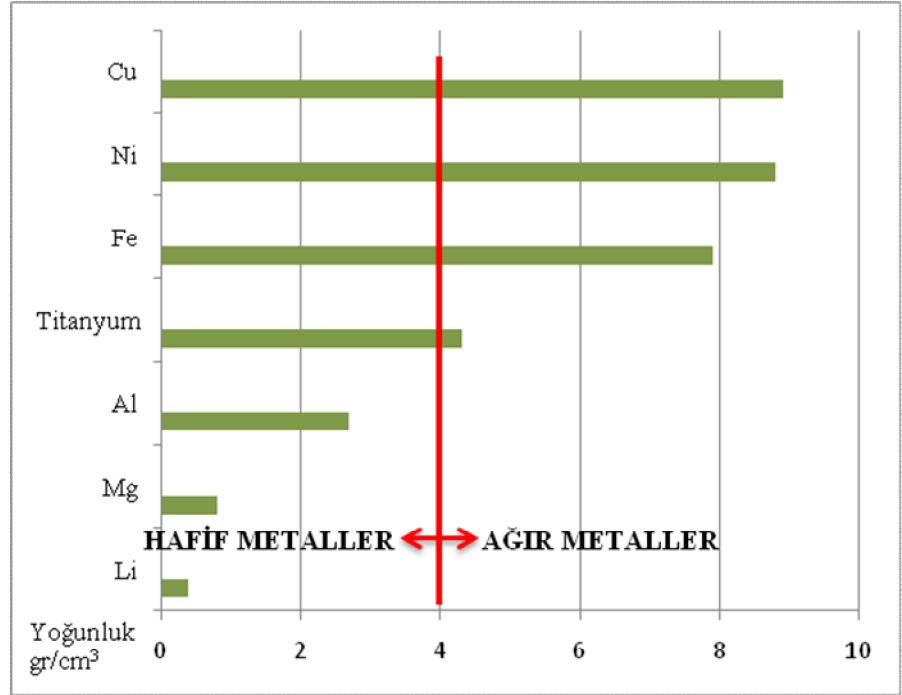
Titanyum geçiş metallerinden olup, atom numarası 22 ve atom ağırlığı ise $47,9 \text{ gr.mol}^{-1}$ 'dür. Titanyum metalinin erime noktası $1670 \text{ }^{\circ}\text{C}$, kaynama noktası ise $3260 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ' dir. Titanyum ilk olarak 1940' lı yıllarda 2. Dünya savaşının patlak vermesiyle birlikte yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Titanyum bu dönemde, diğer metallere kıyasla sahip olduğu yüksek mekanik özellikler ve düşük yoğunlukları sebebiyle "muhteşem metal" adını almıştır. Şekil 3.1' de titanyumun yaygın olarak kullanıldığı biyomedikal uygulamalardaki protez örneği görülmektedir (Ahmed and Jackson, 2007).



Şekil 3.1 Titanyum ve alaşımlarının kullanıldığı protez örneği a) Diz protezi, b) Protez elemanları (Ahmed and Jackson, 2007).

Günümüzde hala yüksek dayanım, mükemmel korozyon dirençleri, yüksek mekanik özellikleri ve biyo-uyumlulukları sebebiyle, tıbbi uygulamalar, uzay, otomotiv ve enerji başta olmak üzere, daha birçok endüstri alanında, geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Titanyum yoğunluk yönünden diğer metaller ile karşılaştırıldığında ağır metaller olarak bilinen metaller arasında en düşük yoğunluğa sahiptir (Leyens and Peters, 2003). Şekil 3.2’ de titanyum metalinin ağır ve hafif metaller ile kıyaslanması görülmektedir.



Şekil 3.2 Titanyumun yoğunluk açısından diğer metallerle kıyaslanması (Leyens and Peters, 2003).

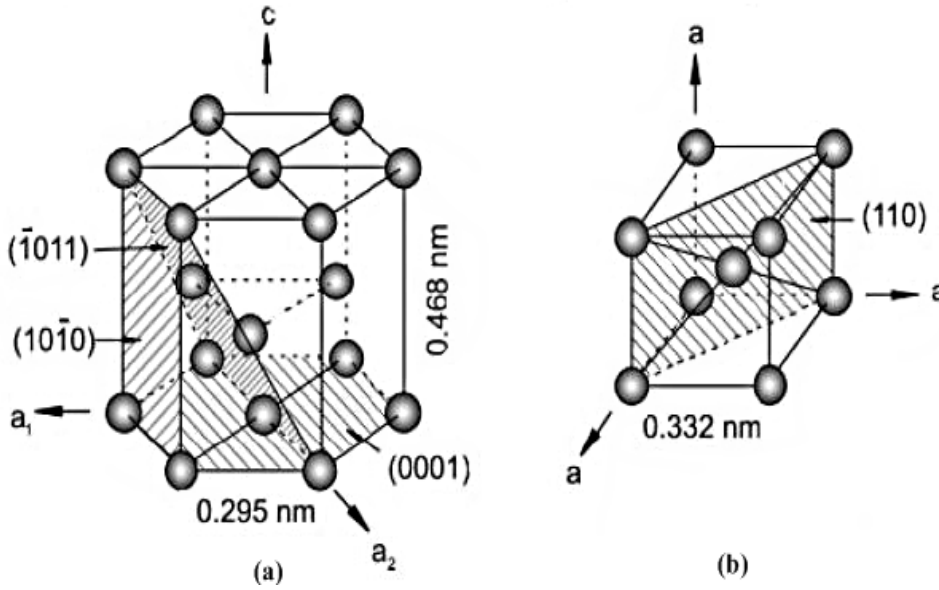
Titanyum ve alaşımlarının geniş kullanım alanına sahip olmasının bir nedeni de büyük yeryüzü rezervlerine sahip olmasıdır. Titanyum bu bakımdan dünya üzerinde en çok çıkarılan dördüncü elementtir (Joshi, 2006). Fakat yüksek rezervlere sahip olmasına rağmen titanyumun maliyeti diğer metaller ile kıyaslandığında yüksektir. Bunun sebebi titanyum cevherinin üretim sırasında yüksek ergitme ve özel üretim yöntemlerini gerektirmesi ve üretim maliyetinin yüksek olmasıdır (Smith, 2001).

Titanyumun diğer bir özelliği ise yüzeylerinde bulunan koruyucu film tabakası sayesinde korozyon ortamlara karşı yüksek direnç gösterebilmesidir. Film tabakasının rolü titanyum malzeme üzerinde herhangi bir çizilme veya belli bir noktadan kesilme olması durumunda, o noktaları kaplayarak, yüzeyi korumasıdır. Film tabakası üç katmandan oluşur. Bunlar titanyum yüzeyine temas eden TiO (Titanyum oksit), orta katmanda bulunan Ti₂O₃ (Titanyum (III) oksit) ve en üst

katmanda bulunan TiO_2 (Titanyumdioksit) tabakasıdır (Gemelli and Camargo, 2007).

3.2 Titanyum alaşımları

Titanyum alaşımlarının özelliklerini mikro yapılarındaki α ve β fazlarının dağılımı belirler. Hacim Merkezli Kübik (HMK) β fazı ile kıyaslandığında, Sıkı Paket Hegzagonal (SPH) α fazı yoğun paketlenmiş ve anizotropik yapıdadır. Titanyum oda sıcaklığında SPH yapıdayken 885°C , HMK β yapıya dönüşür. Bu sıcaklık değeri, titanyum için geçiş sıcaklığıdır. Geçiş sıcaklığı titanyum içine eklenen α fazını kararlı kılan çeşitli elementler ile yükseltilebilmektedir. Şekil 3.3’ de (HMK) ve (SPH) kristal yapıları görülmektedir.



Şekil 3.3 Titanyumun kristal yapıları a) Sıkı paket hegzagonal, b) Hacim merkezli kübik (Leyens and Peters, 2003).

Titanyum alaşımları yapısal özellikleri ve saflıklarına göre 4 gruba ayrılabilir.

Bunlar:

- Saf titanyum
- α fazı titanyum alaşımı
- β fazı titanyum alaşımı
- α - β fazı titanyum alaşımıdır.

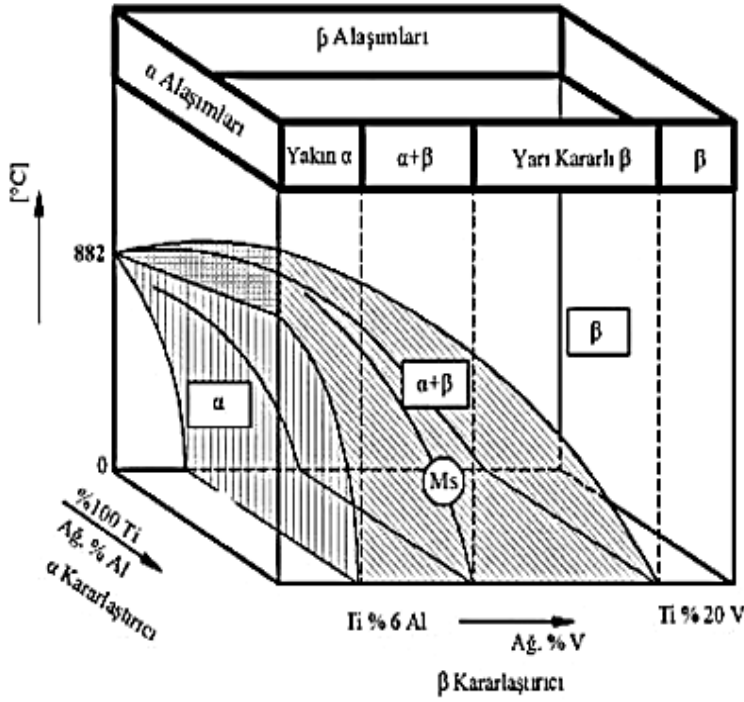
Alaşımlar üretilirken, saf titanyuma katılan her bir element α ve β fazlarının kararlılığına etkiler. Bu elementlerden (Alüminyum, Galmanyum, Azot, Karbon) α dengeleyici, (Vanadyum, Molibden, Niobyum, Demir, Krom, Nikel) ise β dengeleyici olarak görev yapar. (Kalay ve Zirkonyum) ise nötr elementlerdir. Titanyuma katılan (Al, Ga, N, C) elementleri α fazını daha yüksek sıcaklıklara genişletirken (V, Mo, Nb, Fe, Cr, Ni vb.) elementleri β fazını daha düşük sıcaklıklara çekerler. Saf titanyuma katılan her bir element, alaşımların mekanik özelliklerini kendi karakteristiği doğrultusunda değiştirmektedir.

Bu tezde kullanılacak olan Ti6Al4V alaşımında Alüminyum, α stabilizatörü, Vanadyum ise β stabilizatörü olarak kullanılmaktadır. Saf titanyuma eklenen Vanadyum sayesinde alaşım daha dayanıklı olmasını sağlarken aynı zamanda Alüminyum gibi düşük yoğunluklu elementin katılmasıyla düşük yoğunluklu bir alaşım elde edilmiştir. Böylelikle α - β fazlarında, saf titanyuma oranla daha yüksek mekanik özelliklere sahip bir alaşım elde edilmiştir. Saf titanyuma eklenen Alüminyum ve Vanadyum elementleriyle türetilen Ti6Al4V alaşımının mekanik özelliklerinin saf titanyum ile karşılaştırılması Çizelge 3.1’ de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Saf titanyum ile Ti6Al4V alaşımının mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.

Özellik	Saf Titanyum	Ti6Al4V
Yoğunluk (gr/cm ³)	4.5	4.5
Döküm sıcaklığı (°C)	1700	1700
Çekme mukavemeti (MPa)	520	1000
Elastisite Modülü (MPa)	110	85-115
Sertlik (VHN)	200	320

Şekil 3.4’ de, Ti6Al4V alaşımına ait 3 boyutlu faz diyagramı görülmektedir (Leyens and Peters, 2003). Diyagramda titanyuma eklenen % element oranlarıyla birlikte faz değişimleri görülmektedir. Faz diyagramından da anlaşılabileceği gibi % 6 Alüminyum oranına kadar alaşım α fazındadır. Daha sonra β fazı dengeleyici Vanadyum eklenmesiyle önce α - β fazına sonra Vanadyum oranının artmasıyla birlikte önce yarı kararlı β , Vanadyum oranının %20 ulaşmasıyla birlikte ise β fazına dönüşmüştür.



Şekil 3.4 Ti6Al4V alaşımının sınıflandıran 3 boyutlu faz diyagramı (Leyens and Peters, 2003).

3.2.1 Saf titanyum

Ticari saf titanyum yüksek oranda titanyum içerir. Şekil 3.4' den de görüleceği gibi %100 oranında α fazındadır. Dayanımları düşük olmasına rağmen, α fazında olan saf titanyumun, yüksek korozyon dayanımları, işlenebilirlikleri ve kaynak kabiliyetleri oldukça yüksektir.

3.2.2 α fazı titanyum alaşımları

α fazı titanyum alaşımları tek fazlı alaşımlardır. α fazı titanyum alaşımlarında en fazla kullanılan element alüminyum'dur. Alüminyum düşük yoğunluğuyla, alaşımın ağırlığını azaltırken, aynı zamanda alaşımın mukavemetini de artırır. Bu sebeple bu alaşımlara β fazı sabitleyicilerde eklenir. α fazı titanyum alaşımları yüksek kararlılığa sahip alaşımlardır. α fazı titanyum alaşımları, diğer gruplardaki alaşımlara göre, daha sert ve plastik şekil değişimine karşı daha yüksek dirençlidirler (Ezugwu et al., 2003).

3.2.3 β fazı titanyum alaşımları

β fazı titanyum alaşımları, bileşimlerinde önemli miktarda β fazını sabitleyici alaşım elementleri içerirler. Sertleştirilebilme, dövülebilme, soğuk şekillendirilebilme ve yüksek yoğunluk gibi özellikleriyle diğer titanyum alaşımlarından farklı özellikler göstermektedir. Çizelge 3.2’ de, farklı β fazı titanyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri verilmiştir (Çaydaş, 2008). Bu alaşımlar, oda sıcaklığında α - β fazı alaşımları ile aynı mukavemet değerlerine sahip olsalar da yüksek sıcaklıklarda mukavemetleri düşmektedir (Ezugwu and Wang, 1997).

β fazı titanyum alaşımları, α - β fazı titanyum alaşımlarından daha yüksek mekanik özellikler gösterirken, β fazı sabitleyici ağır elementlerin etkisiyle, α - β fazı titanyum alaşımlarından daha yüksek yoğunluktadır (Ezugwu et al., 2003).

Çizelge 3.2 β fazı titanyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri (Çaydaş, 2008).

Alaşım Tipi	% Bileşim					Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)
	Al	Sn	Zr	Mo	Diğer		
Ti-10V-2Fe-3Al	3	-	-	-	10V	1170	1100
Ti-13V-11Cr-3Al	3	-	-	-	11Cr,13V	1170	1100
Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al	3	-	-	8	8V	1170	1100
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	3	-	4	4	6Cr,8V	900	830
Ti-11Mo-6Zr-4.5Sn	-	4,5	6	11	-	690	620
Ti-15V-3Al-3Sn-3Cr	3	3	-	-	15V,3Cr	700	775
Ti-15Mo-2.7Nb-3Al-0.2Si	3	0,2	-	15	2,7Nb,0,2Si	1100	1030

3.2.3 α - β fazı titanyum alaşımları

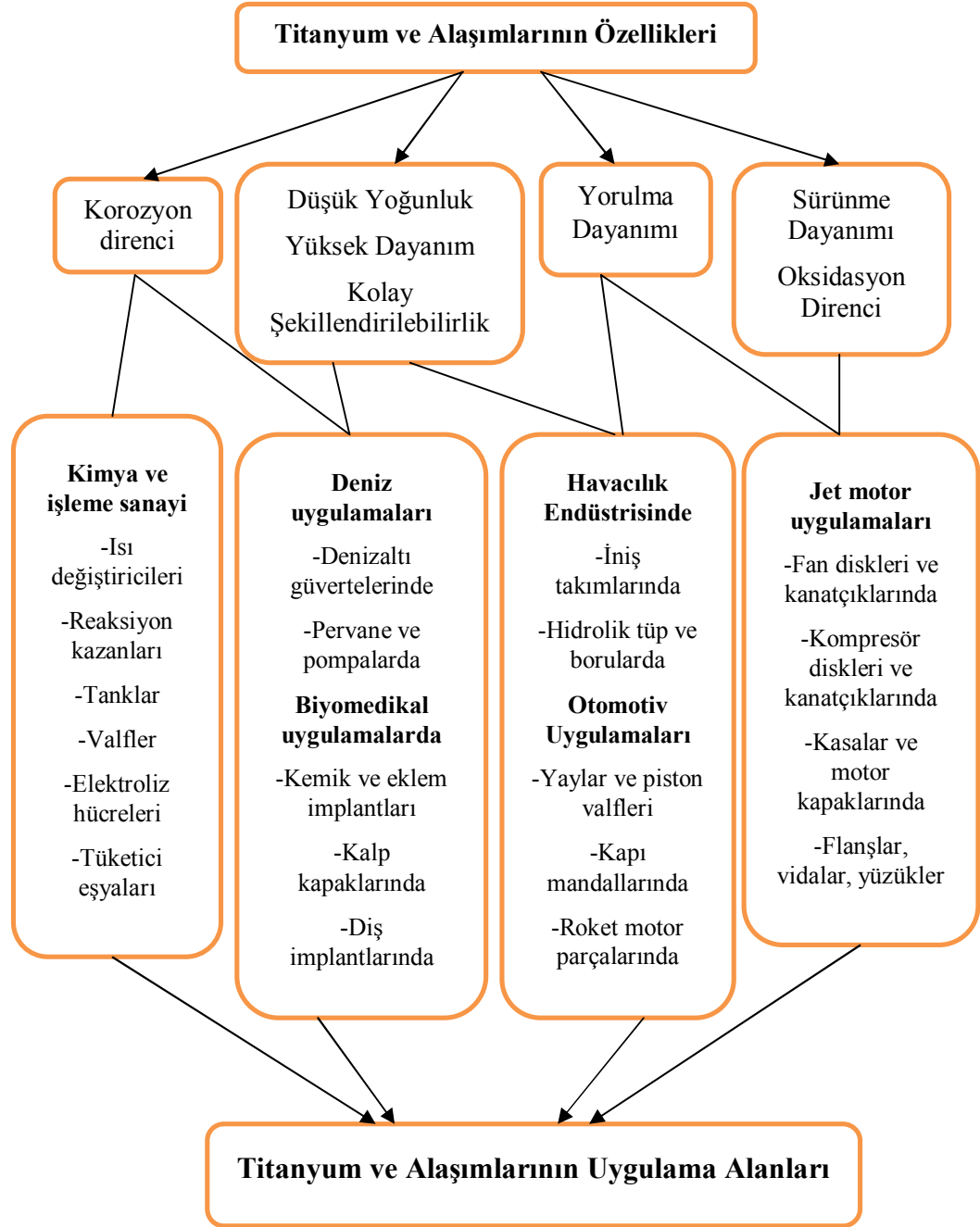
Bu alaşımlar, içlerinde bir tane veya daha fazla α ve β sabitleyici element bulunduran alaşımlardır. α - β fazı titanyum alaşımları %4-6 arasında β sabitleyici element içeren alaşımlardır (Joshi, 2006).

Yapılarındaki α ve β sayesinde yüksek dayanım, süneklik ve korozyon dayanımı gibi özelliklerin hepsini bir arada sağlar. α - β fazı titanyum alaşımları içerisinde en bilinen alaşım; Ti6Al4V alaşımıdır. Ti6Al4V alaşımı toplam titanyum üretiminin %70-85' ine denk gelmektedir (Leyens and Peters, 2003).

α - β fazı titanyum alaşımları ise Ti6Al6V-2Sn, Ti4Al4Mo-2Sn-0.5Si ve Ti6Al2Sn-4Zr-6Mo' dur. α - β fazı titanyum alaşımları α faz alaşımlarından farklı olarak ısıtılma işleme tabi tutularak özellikleri geliştirilebilir (Erdoğan, 2001). Bu alaşımlar yüksek çalışma sıcaklıklarında ve yüksek mukavemet gerektiren havacılık uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır.

3.3 Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

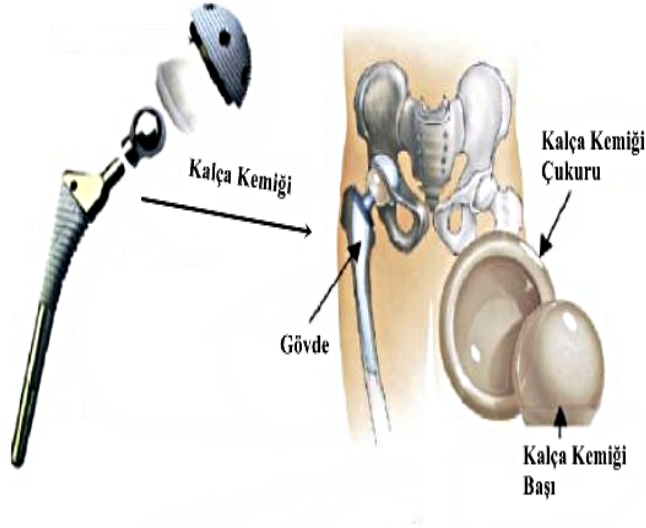
Titanyum ve titanyum alaşımlarının yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek korozyon dirençleri ve yüksek toklukları sebebiyle havacılık, kimya, otomotiv ve biyomedikal uygulamalarında geniş kullanım alanına sahiptir. Şekil 3.5' de titanyum ve alaşımlarının özelliklerine uygun kullanım alanları verilmiştir (Joshi, 2006; Subaşı ve Karataş, 2012).



Şekil 3.5 Titanyum ve alaşımlarının özelliklerine uygun kullanım alanları (Joshi, 2006; Subaşı ve Karataş, 2012).

3.3.1 Biyomedikal uygulamalar

Biyomedikal uygulamalarda kullanılan protezler, insan vücudunda hasara uğramış veya tamamen işlevini kaybetmiş organlar yerine veya onları desteklemek için kullanılırlar. Şekil 3.6' da insan vücudunda kullanılan titanyum kalça protezi görülmektedir.



Şekil 3.6 Ortopedik medikal titanyum kalça kemiği protezi (Anné, 2004; Chunxiang et al., 2011).

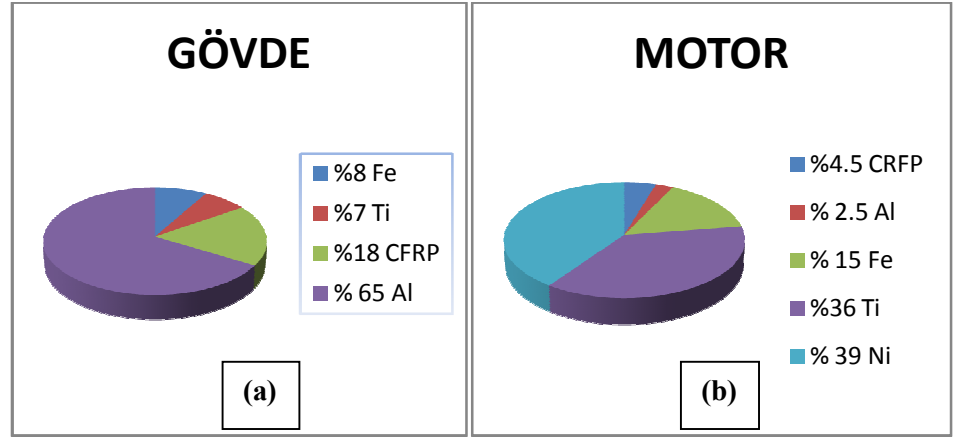
Biyomedikal uygulamalarda kullanılmayan tüm bu malzemelerin ortak özellikleri; kullanıldığı ortam koşullarına karşı dayanıklı olmalarıdır. Bu durum, titanyum gibi yüksek korozyon direncine karşılık yüksek dayanım ve düşük yoğunluğa sahip metalleri biyomedikal uygulamalar için uygun malzeme haline getirmektedir.

Titanyumun oksijen ile tepkimeye girmeye eğiliminde olması ve bu sebeple yüzeyinde sürekli bir oksit tabakanın olması nedeniyle vücut içinde doku ve hücrelerle tepkimeye girmeksizin vücut şartlarına uyum sağlayabilmektedir. Gösterdiği yüksek mekanik dayanım sayesinde vücutta desteklemek için kullanıldığı organlara kemik kadar iyi destek sağlamaktadır. Dış implantlarında, vücut iç ve dış protezlerde, korozyon dayanımı sayesinde ameliyat dikiş iğneleri gibi çok çeşitli kullanım alanı vardır.

3.3.2 Havacılık uygulamaları

Titanyum alaşımları; düşük yoğunluk, yüksek dayanım, yüksek korozyon direnci gibi özellikleri sebebiyle havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunların yanında titanyum ve alaşımlarının, havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasının bir diğer sebebi yoğunluk/çalışma sıcaklık aralığının düşük olmasıdır. Ti-10V-2Fe-3Al, Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al, Ti-

15Mo-2,8Al-3Nb-0,2Si havacılık uygulamalarında kullanılan alaşımlardır (Subaşı ve Karataş, 2012). Şekil 3.7’ de titanyum ve alaşımlarının ticari uçakların gaz türbin motorlarında ve ana gövdede kullanılan malzeme oranları verilmektedir. Gövdede %7 oranında kullanılırken, motorun %36’ sı titanyumdan oluşmaktadır (Leyens and Peters, 2003).



Şekil 3.7 Havacılık uygulamalarında titanyumun kullanım yüzdeleri a) Uçakların gövdelerinde, b) Uçak motorlarında (Leyens and Peters, 2003).

Titanyum alaşımlarının havacılık alanında ana uygulama alanı, gaz türbin motorlarıdır. Modern türbin motorlarının yaklaşık olarak üçte biri titanyumdan imal edilmektedir. Havacılık sektöründe özellikle gövde, iniş takımları ve motorda kullanılmaktadır. Bu parçalarda ihtiyaç duyulan mukavemet, korozyon dayanımı ve hafiflik her ne kadar maliyeti yükseltse de titanyum sayesinde hepsi bir arada sağlanabilmektedir (Leyens and Peters, 2003).

3.4 Titanyum ve Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler

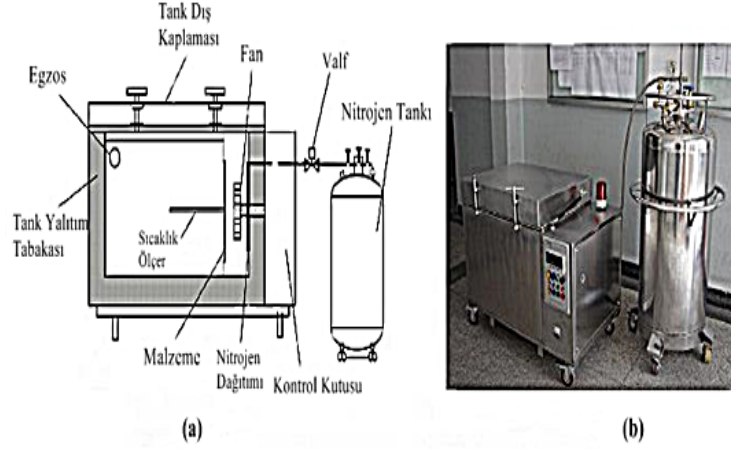
Titanyum alaşımları yüksek dayanım, düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci gibi özelliklerinin yanında düşük işlenebilirlik, düşük sürtünme ve aşınma direnci gibi özellikleri sebebiyle kullanım alanları sınırlanmaktadır. Bu sorunlar titanyum ve alaşımlarının sahip oldukları yüksek ısıl verimle giderilmeye çalışılmıştır. Yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla iyon nitrürleme ve oksidasyon işlemleri, işlenebilirliklerini iyileştirme için su verme, tavlama ve

yaşlandırma işlemleri, plastik özelliklerini geliştirmek için kriyojenik işlem uygulanmıştır (Yılmazer, 2008; Çaydaş, 2008; Gu et al., 2014).

3.4.1 Kriyojenik işlem

Kriyojenik işlem, ilk olarak kullanıldığı 1960’larda nitrojene daldırılarak yapılmaktaydı. Bu şekilde nitrojene daldırılarak yapılan kriyojenik işlemde, ani soğumayla birlikte malzemede çatlaklar oluşmaktaydı. Fakat ilerleyen yıllarda bilgisayar kontrollü olarak uygulanan kontrollü soğutma ve ısıtma işlemi sayesinde çatlaksız ve üniform özelliklere sahip üretimler yapmak mümkün hale gelmiştir. Literatürde sıklıkla yararlanılan faydaları; aşınma direncini arttırmak, yorulma ömrünü arttırmak, gerilim giderme ve boyutsal kararlılık sağlamak, iletkenlikte artış sağlamak, işlenebilme özelliğinde iyileştirmek, korozyon direncini geliştirmek şeklinde sıralanabilir (Vaccari et al., 1986; Gu et al., 2013; Prieto et al., 2014; Jiang et al., 2010).

Şekil 3.8’ de görüldüğü gibi kriyojenik işlem prosesi; kriyojenik işlem tankı, nitrojen tankı, fan, ısı sensörü, kontrol paneli ve en dışta yalıtımı sağlayan giydirme yapıdan oluşmuştur (Gu et al., 2014). Kriyojenik işlem, sıvı nitrojenin valfe gönderilmesiyle başlar. Sıvı halde tanka geçen nitrojen fandan geçerek buharlaşır ve gaz haline gelir. Gaz haldeki nitrojen kriyojenik işlem uygulanacak numune etrafını kaplar. Burada gaz hale gelen nitrojen numune üzerinde sıvıya daldırma işleminden daha üniform bir soğuma oluşturarak çatlaksız ve her noktasında aynı özellikleri gösteren bir yapı oluşturmaktadır. Bundan sonraki işlemde numune dakikada 1°C olmak üzere kriyojenik işlem sıcaklığına soğutulmaya başlanır. Daha sonra numune bu sıcaklıkta çevrim süresinin gerektirdiği kadar tutulur ve tekrar oda sıcaklığına ısıtılmaya başlanır. Böylece kriyojenik işlem tam bir çevrim tamamlanmış olur.



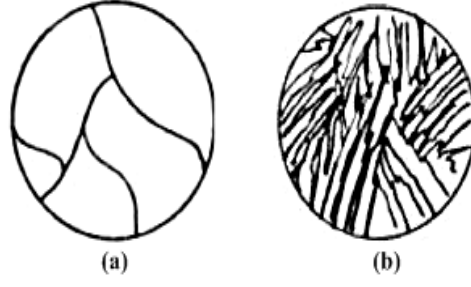
Şekil 3.8 Kriyojenik işlem prosedürü a) Kriyojenik işlemin şematik gösterimi, b) Kriyojenik işlem ünitesi (Gu et al., 2014).

Kriyojenik işlem, parçalardaki artık gerilimleri gidermek malzemenin mekanik özelliklerini, aşınma direncini, tokluğunu arttırmak için uygulanan bir sıfırlatı işlemidir. Kriyojenik işlem, malzemeye bir kez uygulanan kalıcı bir ısıl işlemidir.

İşlem sıcaklıklarına göre 2 alt gruba ayrılmaktadır. Bunlar; sıg ve derin kriyojenik işlemidir. Sıg kriyojenik işlem, $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ gerçekleştirilmektedir. Derin kriyojenik işlem ise $-125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' nin altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Derin kriyojenik işlem sıg kriyojenik işlem ile kıyaslandığında daha yüksek aşınma direnci sağlamaktadır.

Kriyojenik işlem sayesinde malzeme içerisindeki kalıntı östenitin martensite dönüşmesi sağlanırken, ince karbür çökeltilerinin oluşumu ve homojen karbür dağılımı sağlanmaktadır. Kriyojenik işlem öncesi östenit yapı ve kriyojenik işlem sonrası martenzit yapı Şekil 3.9'da görülmektedir (Sandhi et al., 2014). Böylece malzemelerin sertlik ve korozyon direnci gibi mekanik özelliklerinde iyileşmeler görülmektedir.

Önceleri spesifik uygulamalarda kullanılan kriyojenik işlem günümüzde kolay uygulama, verimli sonuçlar ve düşük maliyetli olmaları sebebiyle kullanımı yaygınlaşmıştır.



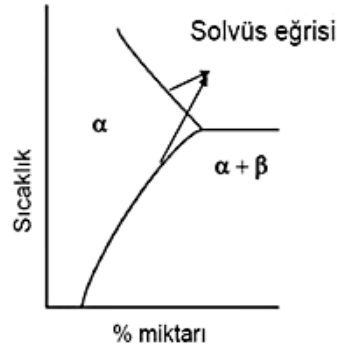
Şekil 3.9 Kriyojenik işlem döngüsünde oluşan malzeme mikro yapılar a) Östenit, b) Martenzit (Sandhi et al., 2014).

Kriyojenik işlem döngüsü;

- a) Ortam sıcaklığından soğuyarak kriyojenik işlem sıcaklığına kadar geçen süre,
- b) Kriyojenik işlem sıcaklığında tutulma süresi,
- c) Kriyojenik işlem sıcaklığından ortam sıcaklığına getirilmesi sırasında geçen süreden oluşmaktadır (Vaccari et al., 1986).

3.4.2 Yaşlandırma işlemi

Yaşlandırma işlemi demir dışı metallerin mekaniksel özelliklerini geliştirmek amacıyla kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Yaşlandırma işlemi mukavemet ve sertliği arttırmak için faz diyagramında solvüs eğrisi olan alaşımlara uygulanır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Solvüs eğrisi.

Yaşlandırma işlemi, işlemin uygulandığı sıcaklığa göre iki gruba ayrılır. Bunlardan oda sıcaklığında normal ortam koşullarında yapılan yaşlandırma işlemine doğal yaşlandırma işlemi, oda sıcaklığından daha yüksek sıcaklarda yapılan ise yapay yaşlandırma işlemi denilmektedir.

Yaşlandırma işlem sıcaklığı, malzeme cinsine ve malzeme kesitine göre farklılıklar göstermektedir.

Yaşlandırma işlemi β ve α - β titanyum alaşımlarına yüksek mukavemet kazandırabilmektedir. Yaşlandırma işlemiyle birlikte, malzeme içindeki β fazlarının çözünmesi sağlanabilmekte ve böylece yüksek süneklik, yüksek mukavemet ve mikro yapıda kararlılık elde edilebilmektedir (Donachie, 2000). Çizelge 3.3’ de farklı titanyum alaşımlarının yaşlandırma işlem sıcaklıkları ve süreleri verilmiştir (Gilbert and Richard, 2004).

Çizelge 3.3 Farklı Titanyum alaşımları için yaşlandırma sıcaklık ve süreleri (Gilbert and Richard, 2004).

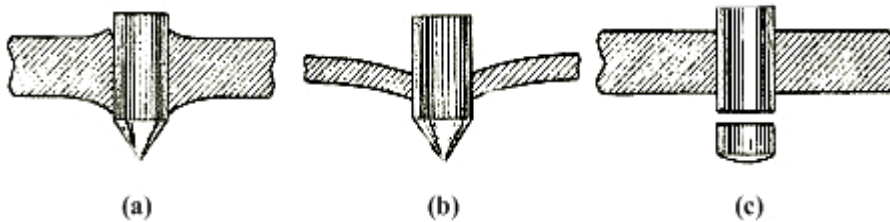
Titanyum Alaşımının		Parça Şekli	Yaşlandırma	
İç Yapısı	Kimyasal Bileşimi		Sıcaklık (° C)	Süre (Saat)
α	Ti-8Al-1Mo-1V	Sac	565-620	7-9
α - β	Ti-2Fe-2Cr-2Mo	Sac, Çubuk	480-510	2-8
	Ti-4Al-4Mn	Dövme Çubuk	480-540	4-8
	Ti-4Al-3Mo-1V	Sac	480-565	4-12
	Ti-6Al-4V	Sac	480-540	3-5
	Ti-6Al-4V	Dövme Çubuk	510-595	2-8
	Ti-7Al-4Mo	Dövme Çubuk	540-620	4-8
β	Ti-13V-11Cr-3Al	Çubuk	425-510	24-100

4. DARBE DENEYİ

Darbe mekaniği hesaplamaları, otomotiv sanayi (araçların çarpışma dayanımının geliştirilmesi), savunma sanayi (kurşungeçirmez kıyafetler, patlama tankları) ve havacılık gibi birçok alandaki çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Darbe kaynaklı hasarlar, üretimin her aşamasında ortaya çıkabilmektedir. Bu durumdaki darbelerin hızları küçük dahi olsa, malzemede büyük deformasyonlara sebep olmaktadır. Bu şekilde oluşan ani darbelere karşı dayanımı yüksek olan malzeme seçimi için, malzemenin kopmaya karşı olan direnci darbe testleri ile tayin edilerek, elde edilen sonuçlara göre, malzeme seçimi yapılmaktadır. Darbe dayanımı malzemenin mekanik özelliklerinden, tokluk ile alakalıdır. Tokluk bir malzemeyi delebilmek için gerekli enerji miktarı olarak tanımlanabilir. Darbe deneyinde amaç darbe süresince malzeme tarafından absorbe edilen enerjiyi ölçerek, malzemenin darbe direnci hakkında bilgi sahibi olmaktır.

Metal malzemelerde, darbe sırasındaki hasar oluşumu, genellikle üç farklı şekilde gerçekleşmektedir. Bunlar; sünek malzemelerde görülen sünek veya darbe ucuna sıvanarak meydana gelen delinme, ikincisi; malzemede çukur oluşturarak delinme ve üçüncüsü; zımba etkisiyle malzemenin bütüncül yani darbeye uğrayan bölgenin tümünden çıkmasıyla oluşan darbedir. Hasar mekanizmaları Şekil 4.1’ de görülmektedir (Woodward, 1977).



Şekil 4.1 Metaller için darbe sırasındaki hasar oluşumu a) Konik vurucu uç geometrisi sünek delinme, b) Konik vurucu uç geometrisi malzemeyi esneterek delme, c) Düz vurucu uç geometrisi gevrek delinme (Woodward, 1977).

Uygulama yerine ve kullanım amacına göre, malzemenin maruz kalabileceği darbeler, çok farklı şekillerde oluşabilir. Elde edilen bu veriler ile, malzemenin kullanım yer ve şartlarına uygunluğu değerlendirilir. Malzemelerin darbe altındaki davranışlarını önceden tayin edebilmek ve tasarıma en uygun malzemenin seçilebilmesi için malzemeye çeşitli hız ve büyüklükte yüklemelerin uygulandığı bu testlere darbe testleri denir. Darbe sırasında oluşan hasar malzeme çeşidine ve yapısına göre farklılık göstermektedir.

Darbe testleri darbenin oluştuğu hız aralığına göre düşük hızlı veya yüksek hızlı olarak sınıflandırılırlar. Düşük hızlı darbeler; çarpışma temas anında malzeme içyapısında deformasyon oluşturan darbelerdir. Bazen, düşük hızlı darbe; düşük enerjili darbe olarak da tanımlanır. Düşük enerjili darbe sırasında malzeme içyapısı darbeye karşılık verebilecek süreye sahiptir. Bu nedenle hedef cevap oluşturabilir. Yüksek hızlı darbeye ise düşük enerjili darbeden farklı olarak malzeme üzerine darbe dalgası hızla yayılır ve malzeme darbeye cevap verebilecek süreyi bulamaz.

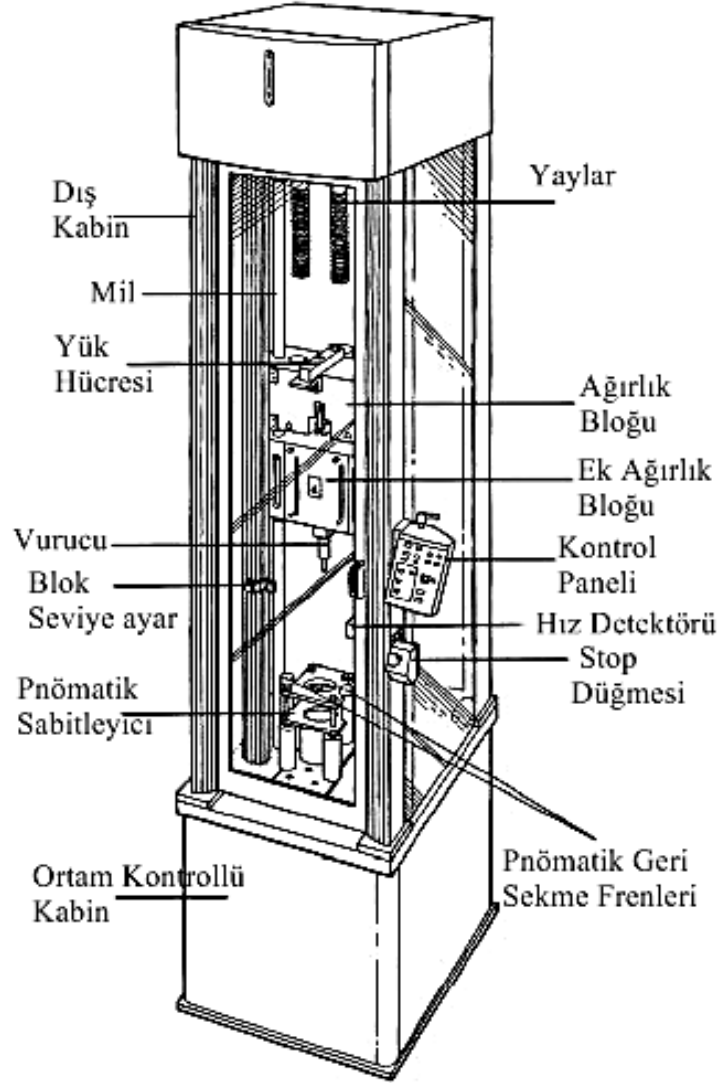
4.1 Düşük Enerjili Darbe Testleri

Mühendislik uygulamalarında, özellikle imalat, montaj ve kullanım aşamasında, dışarıdan gelebilecek herhangi bir darbeye karşı, beklenmedik sonuçlar ortaya çıkabilir. Bu gibi durumları engellemek için, malzemede meydana gelebilecek hasarın önceden bilinmesi istenir. Bu sebeple, meydana gelebilecek bu tür yüklemeleri ve sonuçlarını önceden tahmin edebilmek için düşük enerjili darbe testleri uygulanır. Düşük enerjili darbe test metodları İzod-Charpy ve Ağırlık düşürmeli darbe test metodlarıdır.

4.1.1 İzod-Charpy darbe test metodu

İzod-Charpy test metodları; düşük hızda darbe dayanımını belirlemek için kullanılan temel darbe testleridir (Şekil 4.2). Her iki deneyde sünek/gevrek geçiş sıcaklığı ve darbe karşısında malzemelerin absorbe edebileceği enerji miktarını belirlemek için uygulanır. Bu iki deneyin birbirinden farkı sarkaç tipleri, numunelerin desteklenme şekilleri ve numune üzerinde açılan çentiğin şeklidir. Bu testlerde, numune üzerinde U ve V şeklinde çentikler açılır.

bloğu, kontrol paneli, hız detektörü, stop düğmesi ve geri sekme frenleridir (Sayer, 2009).



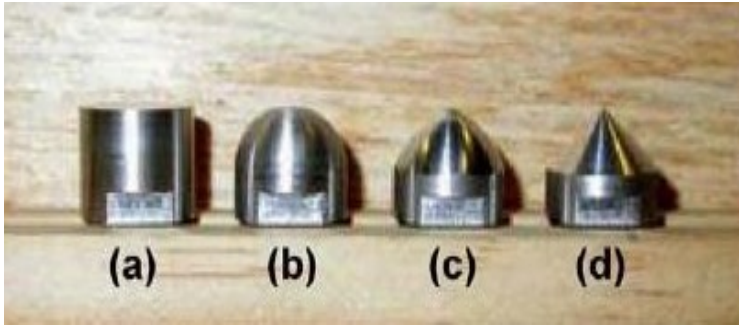
Şekil 4.3 Ağırlık düşürmeli darbe test cihazı (Sayer, 2009).

Düşük enerjili darbe test cihazında, vurucu uç, ağırlık kutusu veya daha yüksek enerji seviyelerinde yaylar yardımıyla kazandığı potansiyel enerjiyle harekete geçer. Hızlanarak numuneye çarpan vurucu uç, üç şekilde deformasyon oluşturabilir. Vurucu ucun hız değişimi, hız detektörleri yardımıyla saptanır. Bunlar geri sekme, saplanma ve delinme şeklindedir. Geri sekme durumlarında, daha doğru sonuç alabilmek için, darbe test cihazının üzerinde bulunan pnömatik frenler, darbe ucunun numunelere çarpmasından sonra geri sekmesini engeller.

Darbe testleri cihazının alt bölümünde bulunan ortam kontrollü kabin sayesinde ortam etkisinin darbe deformasyon davranışlarına etkisi incelenebilir.

4.2 Yüksek Enerjili Darbe Testleri

Malzemenin yüksek hızlı darbe davranışında, malzemede yüksek hızda darbe etkisiyle oluşan gerilme dalgaları etkilidir. Bu durumda malzeme, darbeye karşı cevap verebilecek yeterli zamanı bulamaz, küçük bir bölgede hasar oluşur. Yüksek hızda darbe testi, özellikle balistik deneyler sırasında kullanılan bir darbe test türüdür. Yüksek enerjili darbe testleri, basınçlı hava ile darbe testi ve Split-Hopkinson darbe testidir. Şekil 4.4' de darbe testlerinde yaygın olarak kullanılan düz, yarı küresel, ogival ve konik vurucu uç geometrileri görülmektedir (Mitrevski et al., 2006).

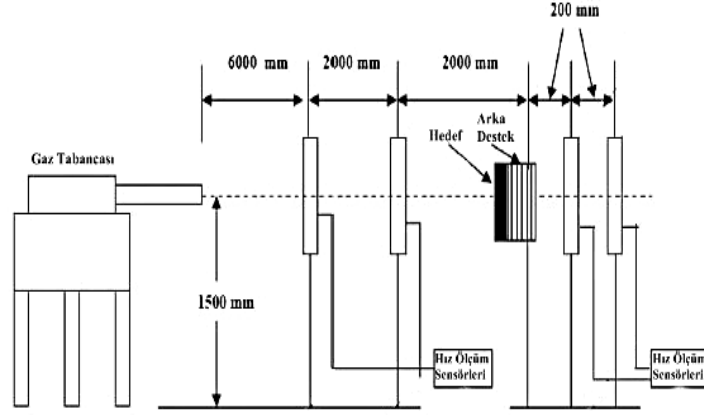


Şekil 4.4 Yüksek enerjili darbe testlerinde kullanılan vurucu uç geometrileri **a)** Düz, **b)** Yarı küresel, **c)** Ogival, **d)** Konik (Mitrevski et al., 2006).

4.2.1 Basınçlı hava ile darbe testi

Basınçlı hava ile darbe test metodu; küçük kütleli vurucular için kullanılan yüksek hızlı darbe test metodudur. Sistem hava filtresi, basınç regülatörü, hava tankı, selenoid valfi, hız sensörü ve test edilecek numuneden oluşur. Sistemin çalışma prensibi ise; filtreden temizlenerek geçen hava, basınç regülatörüne gelir, buradan basınç ayarı yapılarak, hava tankının içine gönderilir. Selenoid valfi basınçlı hava yardımıyla vurucu parçayı tetikler. Harekete geçen vurucu uç, basınçlı hava ile darbe testini gerçekleştirir. Şekil 4.5' de basınçlı hava darbe test düzeneğinin şematik bir resmi verilmiştir (Mondal, 2011). Test düzeneğinde,

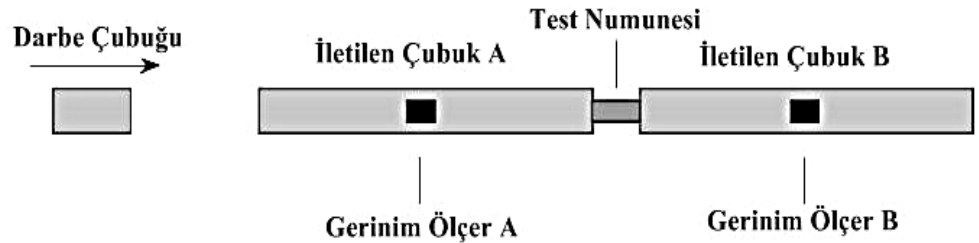
merminin iki sensörlü perdeden geçiş zamanı tespit edildikten sonra, perdeler arası mesafe dikkate alınarak, ortalama hız bulunmaktadır.



Şekil 4.5 Basınçlı hava ile darbe test düzeneği (Mondal, 2011).

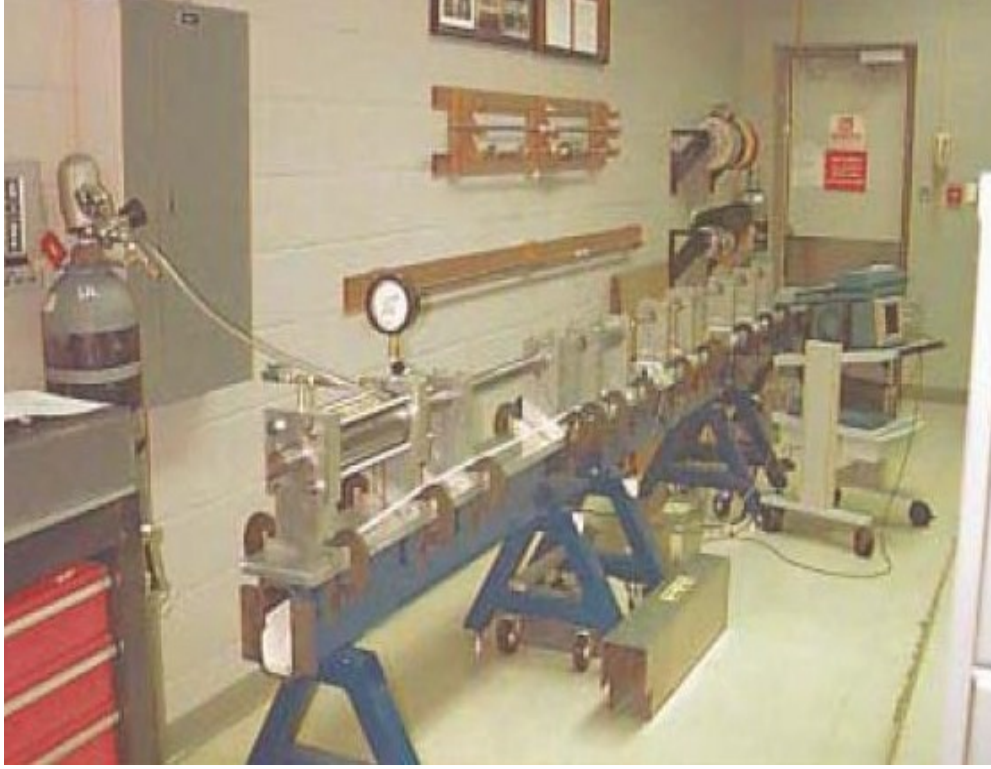
4.2.2 Split-Hopkinson darbe testi

Split-Hopkins darbe test düzeneği; malzemelerin yüksek hızlardaki darbe davranışlarını belirlemek için yapılır. Split-Hopkinson darbe test düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 4.6' da görüldüğü gibidir. Test düzeneği darbe ucu (vurucu), 2 adet gerinim ölçer ve numuneden oluşmaktadır. Burada, diğer darbe testlerinden farklı olarak, yüksek hızlarda şekil değişimi incelenebilmektedir. Numune ve vurucu uç çubuk şeklinde hazırlanır. Yüksek basınç ile tetiklenen vurucu uç, darbe kuvvetini oluşturur. Split-Hopkinson darbe test cihazında 12,7 mm çapında vurucu uç kullanılmaktadır.



Şekil 4.6 Split-Hopkinson darbe test düzeneğinin şematik gösterimi (Evcı, 2009).

Darbe çubuğunun hızlanarak çubuk A' ya çarpmasıyla birlikte çubuk A' da elastik şekil değişimi görülür. Bu şekil değişiminin bir kısmı B çubuğuna iletilirken diğer bir kısmı ise geri yansır. Şekil 4.7' de Split-Hopkinson yüksek hızda darbe test düzeneğinin bir resmi verilmiştir (Evcı, 2009). Bu deney düzeneği sayesinde balistik, kaza gibi yüksek hızda gerçekleşen darbe türleri simüle edilebilmektedir.



Şekil 4.7 Split-Hopkinson yüksek hızda darbe test düzeneği (Evcı, 2009).

5. METARYAL VE METOD

5.1 Çalışma Yönteminin Belirlenmesi

Bu çalışmada tavllanmış olarak temin elden Ti6Al4V alaşımının düşük enerjili seviyelerindeki darbe yüklemeleri neticesinde deformasyon davranışı araştırılmıştır. Bu amaçla mekanik özelliklerini ve tokluğunu arttırmak amacıyla titanyum alaşımına kriyojenik işlem ve yaşlandırma işlemi uygulanmıştır.

Ti6Al4V alaşımı için yaşlandırma işlem sıcaklığı 400°C–650°C arasındadır. Daha önceki yapılan çalışmalar incelendiğinde optimum mekanik özelliklerin 550°C’ de elde edilebildiği görülmüştür (Gu et al., 2013).

Kriyojenik işlem ise, derin kriyojenik işlem sıcaklığı olan -140°C’ de 6 saat uygulanmıştır. Literatürde genellikle kriyojenik işlem ardından uygulanan yaşlandırma işlemiyle, malzemenin mekanik özelliklerinden ödün vermeden, tokluğu arttırılabilmektedir (Gu et al., 2013). Bu nedenle bir grup numuneye kriyojenik işlem ardından 550°C’ de yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Uygulanan ısıt işlemler sonrasında dört farklı malzeme grubu elde edilmiştir (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1 Ti6Al4V alaşımına uygulanan ısıt işlem süresi ve türü.

Numune	Kriyojenik İşlem Öncesi	Kriyojenik İşlem	Kriyojenik İşlem Sonrası
T (Isıt işlemsiz)	Tavlı	-	-
CT (Kriyojenik İşlem)	Tavlı	-140°C-6 Saat	-
AT (Yaşlandırma İşlemi)	Tavlı	-	550°C-3 Saat
ACT (Kriyojenik+Yaşlandırmaİşlemi)	Tavlı	-140°C-6 Saat	550°C-3 Saat

Vurucu uç geometrisinin etkisini değerlendirebilmek için yarıküresel, konik 60° ve 90° vurucu uç geometrileri üretilerek farklı enerji seviyelerinde düşük enerjili darbe testi uygulanmıştır. Düşük enerjili darbe testleri sonrasında deformasyon bölgelerinden tel erezyon ile numune alınarak deformasyon bölgelerindeki enine kesitte meydana gelen mikro yapı değişimleri incelenmiştir.

5.2 Ti6Al4V Alaşımının Mekanik Özellikleri

Kullanılan Ti6Al4V alaşımı AKYAY Metal ile ithal edilmiştir. 2×2 m boyutlarında 2 mm kalınlığındadır. Alaşımın literatürdeki mekanik özellikleri Çizelge 5.2’ de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Kullanılan Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri.

Malzeme Özellikleri	Ti6Al4V Alaşımı
Yoğunluk (gr/cm ³)	4,42
Elastisite Modülü (GPa)	110
Çekme Mukavemeti (MPa)	982,7
Akma Mukavemeti (MPa)	978,3
% Uzama	10,11

5.3 Darbe Testi Uygulanacak Numunelerin Hazırlanması

Ti6Al4V alaşımına yaşlandırma, kriyojenik ve kriyojenik işlem ardından uygulanan yaşlandırma işlemleri uygulanarak Çizelge 5.1’ de görüldüğü gibi 4 farklı numune grubu hazırlanmıştır.

5.3.1 Yaşlandırma işleminin uygulanması

Yaşlandırma işlemi Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Isıl İşlem laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1’ de yaşlandırma işleminin uygulandığı Protherm marka rezistanslı ısı kontrollü fırın gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Yaşlandırma işleminin uygulandığı rezistanslı fırın.

Fırın oda sıcaklığından 550 °C' ye 30 dakikada çıkmaktadır. Ti6Al4V alaşımına yaşlandırma ısıtma işlemi 6,3 L/dak debide argon ortamında 550 °C' de 3 saat uygulanmıştır.

5.3.2 Kriyojenik işlemin uygulanması

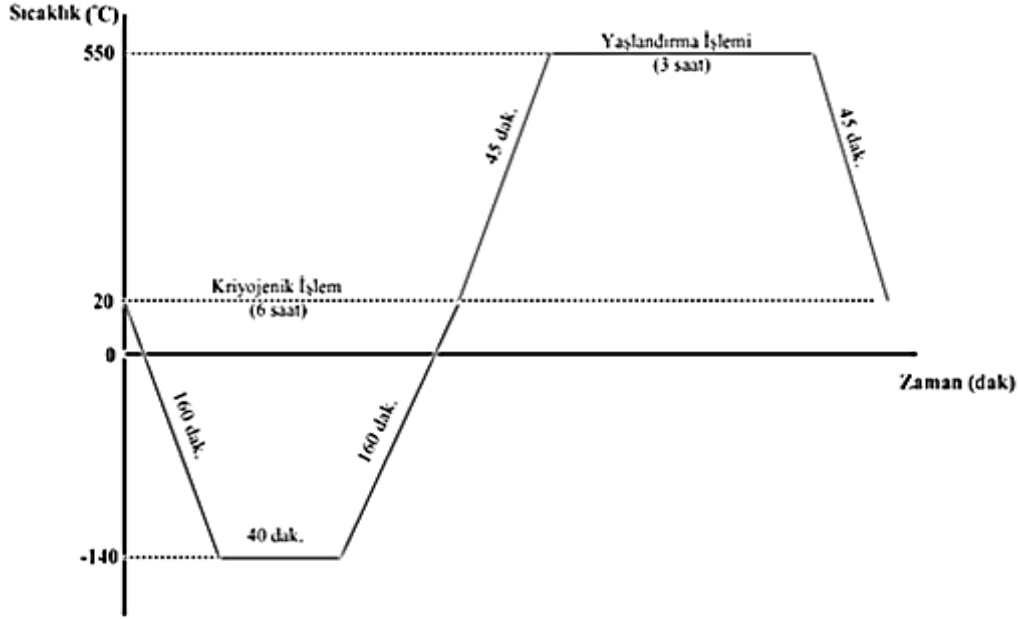
Kriyojenik işlem, Alper Isıl İşlem San. ve Tic. A.Ş. firmasında sıcaklık kontrollü kriyojenik işlem tanklarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.2). Kriyojenik işlem kontrol panosu yardımıyla -140 °C' ye kademeli olarak 1 °C/dak hızda soğutulmuş, bu sıcaklıkta 40 dakika tutularak tekrar 20 °C' ye ısıtılmıştır.



Şekil 5.2 Kriyojenik işlem tankı.

5.3.3 Kriyojenik işlem sonrası yaşlandırma işleminin uygulanması

-140 °C’ de 6 saat kriyojenik işlem uygulanarak hazırlanan numunelere ardından 6,3 L/dak debide argon atmosferinde 550 °C’ de 3 saat yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Kriyojenik işlem ardından yaşlandırma işlemi uygulanan malzemelerin ısıtım işlem şeması Şekil 5.3’ te gösterilmiştir.



Şekil 5.3 ACT numunelerinin ısıtım işlem prosedürü.

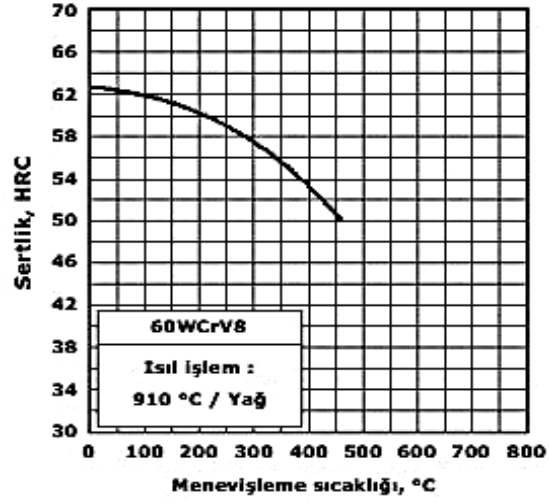
5.4 Vurucu Uç Geometrilerinin Tasarlanması

Vurucu uç malzemesi olarak yüksek tokluğa sahip, darbe çeliği olarak da bilinen DIN 1.2550 soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır. Çizelge 5.3’ te DIN 1.2550 soğuk iş takım çeliğinin ısıtım işlem özellikleri verilmiştir (Öz Çelik Ticaret, 2014).

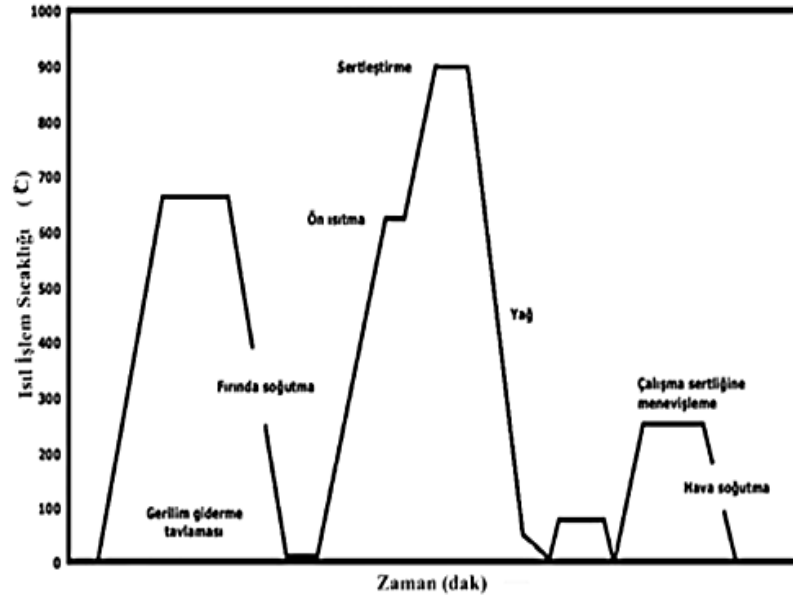
Çizelge 5.3 DIN 1.2550 soğuk iş takım çeliğinin ısıtım işlem özellikleri (Öz Çelik Ticaret, 2014).

Isıtım işlem	Sıcaklık aralığı
Yumuşatma tavlama	710-750 °C
Gerilme giderme tavlama	650 °C
Sertleştirme	870-910 °C

Yüksek darbe dayanımına sahip olması sebebiyle tercih edilen malzeme sahip olduğu yüksek ısı verim sayesinde istenen sertlik değerine getirilmiştir. DIN 1.2550 soğuk iş takım çeliğinin menevişleme diyagramı ve ısı işlem şeması Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’ de verilmiştir (Öz Çelik Ticaret, 2014).



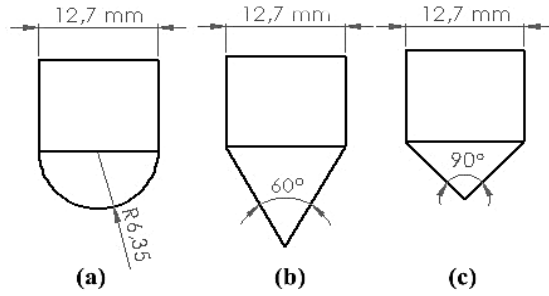
Şekil 5.4 DIN 1.2550 soğuk iş takım çeliğinin menevişleme diyagramı (Öz Çelik Ticaret, 2014).



Şekil 5.5 DIN 1.2550 soğuk iş takım çeliğinin ısı işlem şeması (Öz Çelik Ticaret, 2014).

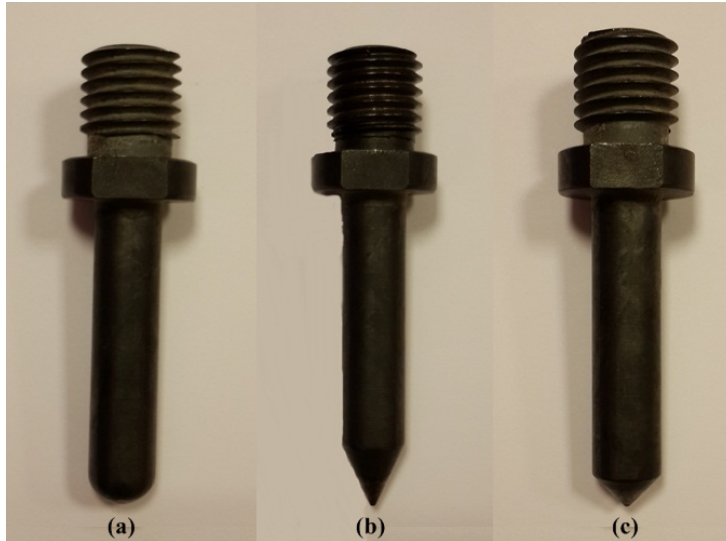
Literatür incelendiğinde, çok farklı vurucu uç geometrilerine rastlanabilmektedir. Uç geometrileri içinde en çok kullanılan vurucu uç geometrileri ise yarı küresel ve konik vurucu uç geometrileridir. Bu nedenle bu

çalışmada biri küresel diğer ikisi konik olmak üzere üç farklı vurucu uç geometrisi üretilmiştir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 Düşük hızda darbe testleri için tasarlanan darbe uç geometrileri a) Yarı küresel uç, b) 60° konik, c) 90°konik uç.

Vurucu uçlar 30 mm çapındaki çelik çekme çubuktan CNC torna ile Şekil 5.7’ de gösterildiği gibi işlenmiştir. Üretimden sonra vurucu uçlara, Tam Çelik Isıl İşlem Ltd. Şti. sertleştirme ısıl işlem uygulanmıştır. Vurucu uçlar tuz banyosunda 910 °C’ de bekletildikten sonra yağda soğutulmuştur. Sertleştirme işleminden sonra, vurucu uçlara 350 °C’ de 45 dakika menevişleme işlemi yapılarak, toklukları arttırılmıştır. Isıl işlemler neticesinde vurucu uçların sertlikleri 58 HRC olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.7 Düşük hızda darbe testleri için tasarlanan darbe uçları a) Yarı küresel uç, b) 60° konik uç, c) 90° konik uç.

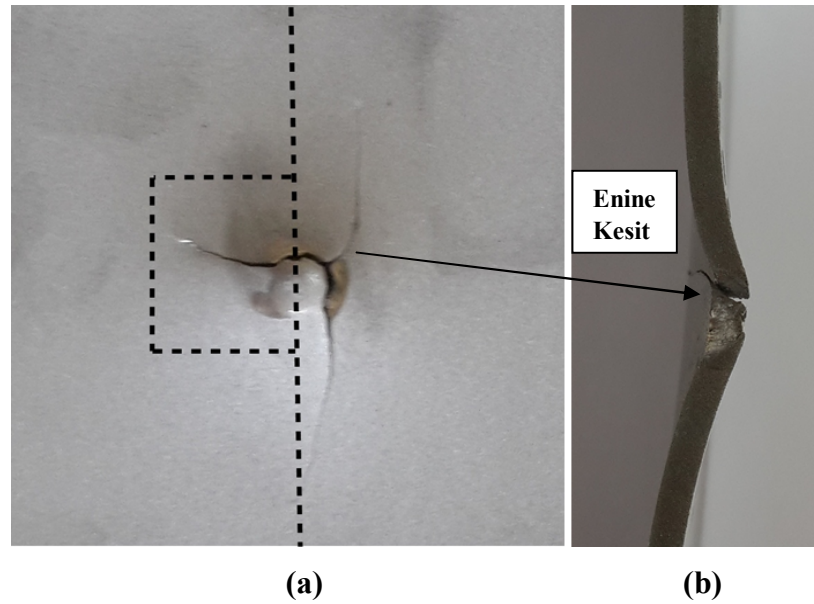
Tez çalışmasında elde edilen sonuçların kolay yorumlanabilmesi için kodlama sitemine başvurulmuştur (Çizelge 5.4).

Çizelge 5.4 Üretilen vurucu uç geometrileri ve kısa kodlamaları.

Vurucu Uç	Kod
Yarı küresel geometri	D12,7
90° konik geometri	A90
60° konik geometri	A60

5.5 Numunelerin mikro yapı incelemeleri

Uygulanan ısıt işlemlerin malzemenin mikro yapısında meydana getireceği değişimleri incelemek için optik mikroskop analizleri gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra deformasyona uğrayan numunelerin, delinen veya ezilen bölgeleri için de deformasyon bölgelerindeki mikro yapı değişimleri incelenmiştir. Bunun için hasara uğrayan bölgenin orta kısmından numune kesilerek bakalite alınmıştır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 Deformasyona uğramış bölgeden mikro yapı incelemesi a) Üst görünüş, b) Enine kesit.

Numunelerin kalıba alınması, zımparalanması, parlatılması, dağlanması ve mikroskop altında incelemeye hazır hale getirilmesinde, metalografik inceleme teknikleri kullanılmıştır. Numunelerin hazırlanmasında ilk işlem olan kalıplama işlemleri, malzeme yapısına göre sıcak veya soğuk kalıplama olarak uygulanabilmektedir. Fakat ısı işlem uygulanmış numunelerin, sıcak kalıplama sırasında basınç ve sıcaklık değişiminden etkilenmemesi için soğuk kalıplama yöntemi tercih edilmiştir. Deformasyona uğramış plakalardan mikroskobik inceleme için kalıba alınmış numuneler Şekil 5.9’ da gösterilmiştir.



Şekil 5.9 Hasarlı bölgenin kalıba alınmış hali.

Kalıplama işleminin ardından zımparalama işlemi, malzeme cinsi ve numune yüzey kalitesi dikkate alınarak, 400, 800 ve 1200 numara zımparalarla yapılmıştır. Şekil 5.10a’ da zımparalama yapılan tezgâh görülmektedir. Zımparalama işleminin son basamağında (0,01-1 μ m) (Al_2O_3) alümina ile yüzey parlatılmıştır. Bu işlemin ardından, Ti6Al4V alaşımının, mikro yapısını görünür hale getirebilmek için dağlama işlemi yapılmıştır. Dağlama süresi ve cinsi, malzeme cinsine bağlı olarak Kroll çözeltisinde (% 5 HF, %10 HNO_3 ve %85 saf su) daldırılarak 40 saniye olarak uygulanmıştır. Dağlama işleminden sonra, numunelerin mikro yapıları optik mikroskopta incelenmiştir (Şekil 5.10b).



(a)



(b)

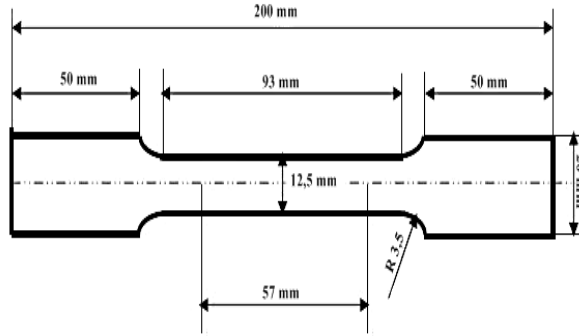
Şekil 5.10 Metalografik numunelerin hazırlanmasında kullanılan cihazlar a) Parlatma cihazı, b) Optik mikroskop.

5.6 Mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Uygulanan ısıl işlemlerin malzemenin mekanik özellikleri üzerine etkilerini belirleyebilmek için tek eksenli çekme testi ve sertlik ölçümü yapılmıştır.

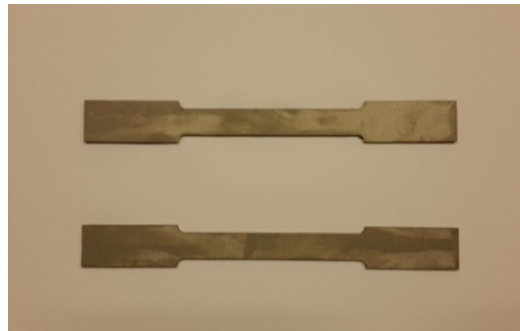
5.6.1 Çekme testi

Isıl işlem uygulanmış numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için numunelere çekme testleri uygulanmıştır. ASTM (Amerikan Test ve Malzeme Enstitüsü) standartlarına göre hazırlanan çekme numunelerinin ölçüleri Şekil 5.11’ de görülmektedir.



Şekil 5.11 ASTM E8M-04 Standartlarına göre hazırlanan numune ölçüleri.

Çekme numuneleri su jetiyle kesilerek hazırlanmıştır (Şekil 5.12). Çekme testleri, Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Mekanik Laboratuarında Shimadzu marka çekme test cihazında, 2 mm/dak çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Her numune grubu için testler üç defa tekrarlanmış ve ortalama değerler alınmıştır.



Şekil 5.12 Su jetiyle kesilen çekme testi numuneleri.

5.6.2 Sertlik ölçümü

Elde edilen tüm numune gruplarının sertlikleri Digital Rockwell sertlik ölçüm cihazıyla 1471 N kuvvet uygulanarak ölçülmüştür. Ölçümler beş farklı noktadan yapılarak, ortalamaları alınmıştır. Ölçümlerde kullanılan sertlik ölçüm cihazı Şekil 5.13’ te verilmiştir.

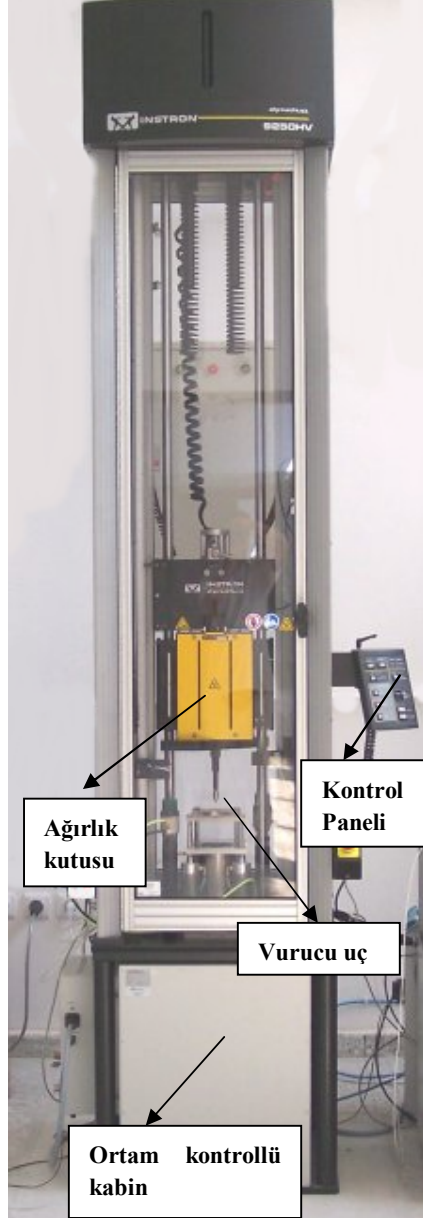


Şekil 5.13 Deneylerde kullanılan sertlik ölçüm cihazı.

5.7 Düşük Enerjili Darbe Testleri

Düşük enerjili darbe testleri, Instron DYNATUP 9250HV marka darbe test cihazıyla, ODTÜ Merkezi Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.14). Darbe testleri 4 farklı numune grubuna, tasarlanan üç farklı vurucu uç geometrisiyle ve artan enerji seviyelerinde uygulanmıştır.

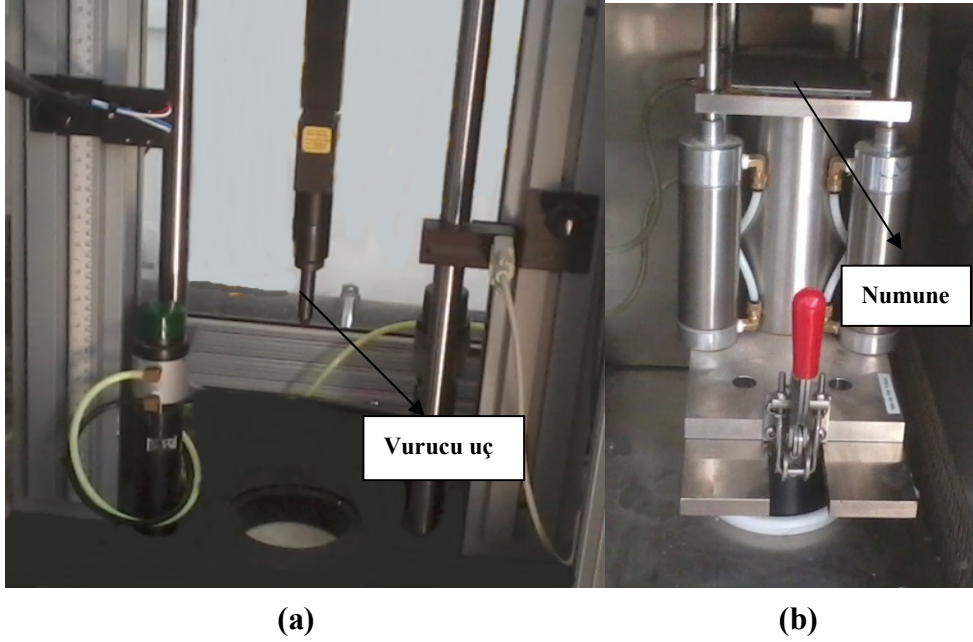
Daha doğru değerler alabilmek için her deney iki defa tekrarlanmıştır. Toplamda 60 test yapılmıştır. Darbe testleri oda sıcaklığında ve numunenin tüm kenarları sabit tutularak uygulanmıştır.



Şekil 5.14 Instron DYNATUP 9250HV düşük hızda darbe test cihazı.

Düşük hızda darbe test cihazı, ağırlık düşürmeli darbe test metoduna göre çalışan, darbe şiddetinin hız, enerji ve yükseklik değerleriyle kontrol edilebilmesine imkân sağlamaktadır. Deney cihazı, yay destekli hızlandırıcı sayesinde 20 m/s hızına kadar darbe testi uygulanabilmektedir. Darbe cihazının üzerinde bulunan ağırlık kutusunun yanında, ilave ağırlık kutusu ile kapasitesi arttırılabilmektedir. Darbe test cihazının izin verdiği maksimum düşürme yüksekliği 1,25 m iken yay destekleri ile bu yükseklik 20,4 m çıkabilmektedir.

Düşük hızda darbe test cihazı dört ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar; numunelere darbeyi ileten vurucu uç, vurucu uca istenilen enerji değerinin yüklenmesine kullanılan ağırlık kutusu, kontrol paneli ve darbe testi uygulanacak numunelerin bulunduğu ortam kontrollü kabindir. Şekil 5.15’ de vurucu uç ve ortam kontrollü kabin içerisine pnömatik numune sabitleyiciler görülmektedir.



Şekil 5.15 Düşük hızda darbe test cihazı a) Vurucu uç, b) Pnömatik numune sabitleyici.

Düşük enerjili darbe test cihazında, darbe uygulandıktan sonra vurucu ucun numuneye çarpmasıyla oluşan yük sinyalleri, veri toplama kartında toplanır. Daha sonra, bu veriler bilgisayara aktarılır.

5.7.1 Darbe testi sonuçlarının yorumlanması

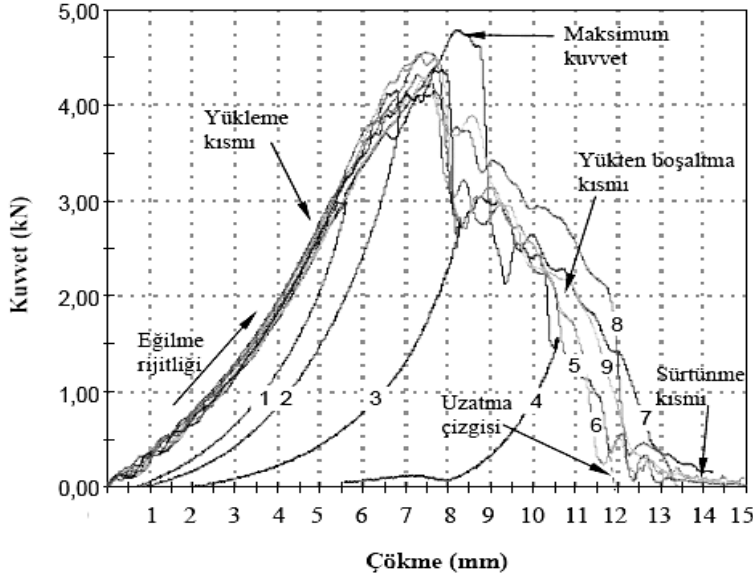
Ti6Al4V alaşımının darbe karakteristiğinin araştırmak için düşük enerji seviyelerinde, üç farklı vurucu uç geometrisiyle darbe testleri uygulanmıştır. Uygulanan darbe testleriyle birlikte, malzemenin düşük hızlarda deformasyon davranışının anlaşılabilmesi için, çıktı olarak kuvvet-çökme, kuvvet-zaman ve hız-zaman grafiklerinden kullanılmıştır. Aynı zamanda deformasyon bölgeleri makro olarak değerlendirilerek deformasyon alanlarının enerji seviyesine ve vurucu uç geometrisine bağlı değişimi tespit edilmiştir.

5.7.1.1 Kuvvet-çökme grafikleri

Kuvvet-çökme eğrileri; darbenin uygulanması ve malzemenin darbe karşısındaki davranışları hakkında bilgi veren en önemli grafiklerdendir. Eğri, kuvvetin yüklenmesiyle başlayan artış eğrisi, ulaşılan maksimum kuvvet noktası ve son olarak yükün numune üzerine yüklenmesiyle oluşan boşalma eğrisinden oluşur. Düşük hızda darbe testi geri sekme, saplanma ve delinme durumlarına ait kuvvet-çökme grafikleri Şekil 5.16' da verilmiştir (Sayer, 2009). Darbe enerjisinin numuneye uygulanmasıyla birlikte numune üzerinde elastik şekil değişimi (Δd) ve plastik şekil değişimi (d_{net}) oluşur. Darbe yüklerinin kaldırılmasıyla birlikte oluşan Δd ortadan kalkarak oluşan çökme d_{net} kalıcı deformasyon olarak kalır.

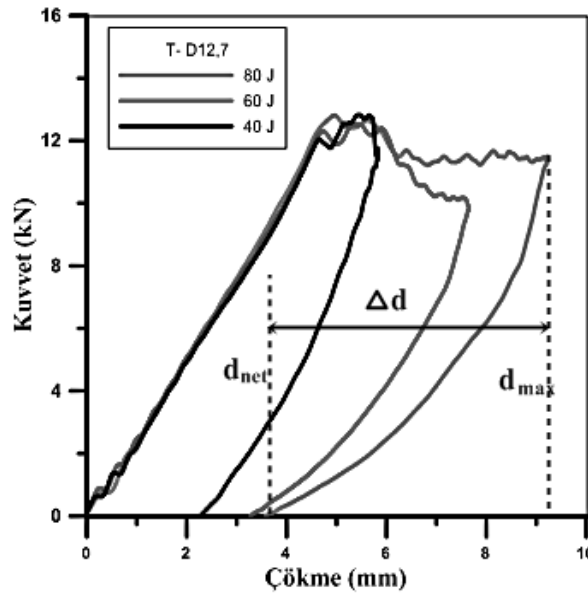
Darbe testleri sırasında absorbe edilen enerji, kuvvet-çökme grafiklerinin altındaki alanın hesaplanmasıyla bulunur. Kuvvet eğrileri, deformasyonun oluşumuna bağlı olarak farklılıklar gösterir. Deformasyon oluşumunda nüfuziyet görünmüşse, eğri açık, rebounding (geri sekme) görünmüş ise kapalı, eğri şeklinde oluşur. Açık tip eğride, vurucu uç, numuneye saplanmıştır. Numunede darbe testi sonucu görülen geri sekme, saplanma ve delinme durumları malzeme tokluğunun bir sonucu olarak ortaya çıkar. Malzemeye yüklenen darbe enerjisinin bir kısmı malzeme tarafından absorbe edilirken, kalan kısmı vurucu uç ile birlikte geri iletilir. Bu duruma geri sekme denir. Darbe enerjisinin arttırılmasıyla birlikte kuvvet-çökme eğrisi genişler, enerjinin geri iletilen kısmı azalır ve vurucu uç numuneyi delerek saplanır. Darbe enerjisi, saplanmanın görüldüğü enerji seviyesinden daha yüksek enerji seviyelerine arttırılması durumunda, vurucu uç malzeme boyunca ilerler ve malzemeyi en kesit boyunca deler ve arka yüzeyinden çıkar. Bu duruma delinme denir.

Tüm bu durumlar için elde edilen eğriler birbirinden farklıdır. Şekil 5.16' da görülen 1-4 eğrileri geri sekmenin görüldüğü darbe test sonucu eğrileridir. 5. Eğri saplanma eğrisi ve 6-9 eğrileri ise delinme eğrileridir.



Şekil 5.16 Düşük hızda yapılan bir darbe testinde kuvvet-çökme grafiği (Sayer, 2009).

Geri sekme görülen darbe testlerinde, maksimum kuvvete karşılık maksimum çökme oluşur. Maksimum kuvvetten sonra kuvvetin azalmasıyla birlikte, numune üzerinde meydana gelen elastik şekil değişimi azalarak, numune üzerinde sadece plastik şekil değişimi meydana gelir. Darbe durumunda, malzeme üzerinde oluşan elastik şekil değişimi (Δd) maksimum çökme (d_{max}) değerinden son durumdaki çökme değeri (d_{net}) çıkarılmasıyla elde edilir (Şekil 5.17).



Şekil 5.17 Geri sekme kuvvet-çökme grafiğinde net çökme miktarının bulunması.

5.7.1.2 Kuvvet-zaman grafikleri

Kuvvet-zaman grafikleri, darbe testinde uygulanan kuvvetin zamana bağlı olarak değişimini göstermektedir. Kuvvet-zaman eğrilerinde, darbe enerjisinin artmasıyla birlikte kuvvet artmakta enerjinin maksimum olduğu noktada kuvvet maksimuma ulaşmaktadır. Deformasyonun oluşmasıyla birlikte kuvvet azalmakta, delinmenin gerçekleşmesiyle birlikte kuvvet sıfıra doğru azalarak bir süre sonra sabit kalmaktadır.

Kuvvet-zaman eğrileri kuvvet-çökme eğrilerine benzerdir. Geri sekme durumları için kuvvet-zaman eğrileri kuvvet-çökme eğrilerinde olduğu gibi kapalı eğri, saplanma ve delinme durumlarında ise açık eğri şeklindedirler.

5.7.1.3 Hız-zaman grafikleri

Hız-zaman grafikleri, vurucu ucun numuneye saplanması, delinmesi ve geri sekmesi durumlarında farklılıklar gösterir. Vurucu uç, geri sekme durumunda negatif yönde hızlanır. Saplanma durumunda ise, ilk olarak belli bir hıza sahip olan vurucu uç numuneye saplanmasıyla birlikte, numune ve vurucu ucun arasındaki sürtünme kuvvetinden dolayı yavaşlar sıfır olur. Delinme durumunda ise, vurucu uç numuneyi delene kadar yavaşlayacak kesit boyunca numuneyi delmesiyle birlikte sabit hıza ulaşacaktır.

5.7.1.4 Enerji-zaman grafikleri

Enerji-zaman grafiği darbe testi sırasında uygulanan enerjinin zamana bağlı değişimi ve absorbe edilen enerji hakkında bilgi verir. Darbe testleri sırasında darbe enerjisi, vurucu ucun belirli bir yüksekliğe çıkarılarak potansiyel enerji kazandırılmasıyla sağlanır.

Darbe testi sırasında vurucu ucun sahip olduğu darbe enerjisi (E_{top}), vurucu ucun bulunduğu yükseklikten dolayı sahip olduğu potansiyel enerji (mgh) ve malzemede meydana gelen maksimum çökme (d_{max}) ile oluşan potansiyel

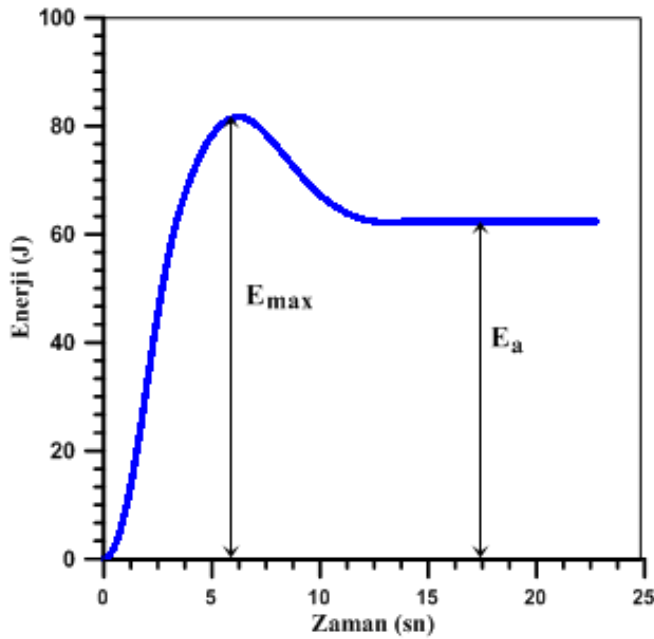
enerjinin toplamıdır. Bu enerji vurucu ucun düşürülmesiyle birlikte, kinetik enerjiye (E_k) dönüşür.

$$E_{top} = mgh + mgd_{max} \quad (5.1)$$

$$E_k = \frac{1}{2} m V^2 \quad (5.2)$$

$$E_{top} = E_k \quad (5.3)$$

Burada m : kütle, g : yerçekimi ivmesi ve h : vurucu ucun bulunduğu yüksekliktir. Şekil 5.18’ de geri sekme durumu için enerji-zaman grafiği verilmiştir. Enerji-zaman grafiğindeki en yüksek enerji değeri (E_{top}), numune tarafından absorbe edilen enerji (E_a) bu iki değer arasındaki fark ise elastik şekil değiştirme enerjisidir.

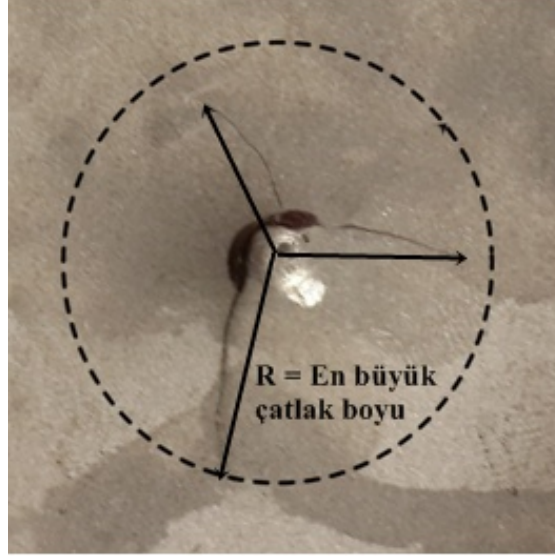


Şekil 5.18 Enerji-zaman grafiği.

5.7.2 Hasar alanlarının hesaplanması

Uygulanan ısı işlemlerin ve vurucu uç geometrisi hasar oluşumuna etkilerini inceleyebilmek için, plakalarda meydana gelen hasar alanları hesaplanmıştır. Hasarın meydana geldiği bölgenin alanını hesaplayabilmek için

maksimum çatlak boyu dikkate alınmıştır. Bu şekilde maksimum çatlak boyunu yarıçap kabul eden daire çizilerek alanı hesaplanmıştır. Bu alana karşı gelen alan hasar alanı olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.19 Hasar alanın tespit edilmesi.

6. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

6.1 Mekanik Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Uygulanan ısıtma işlemlerin malzemenin mekanik özelliklerine etkilerini araştırmak için çekme testleri ve sertlik ölçümleri yapılmıştır.

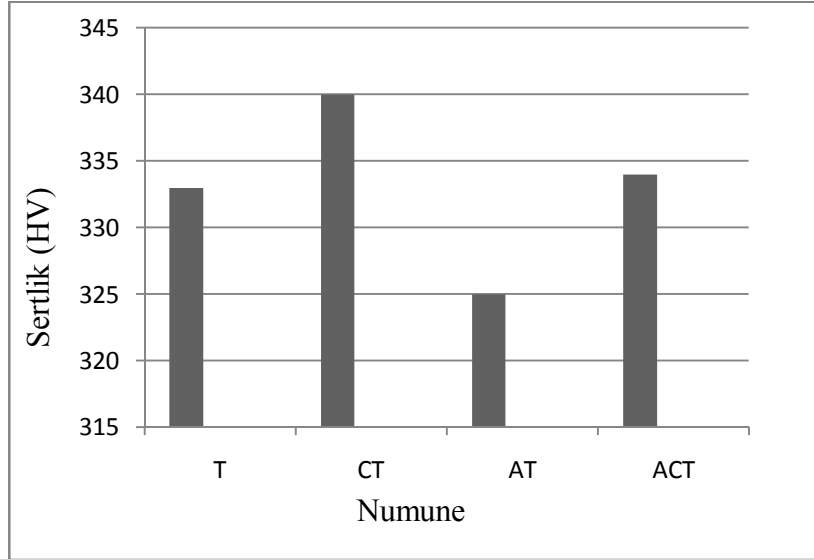
6.1.1 Sertlik ölçüm sonuçları

Yapılan literatür araştırmasından da bilindiği gibi yaşlandırma işlemi malzemenin sertliğinin bir miktar düşmesine sebep olurken, kriyojenik işlem malzemenin sertliğini arttırmaktadır. Bu çalışmada da elde edilen sonuçlar bu bilgileri doğrular niteliktedir.

Şekil 6.1 incelendiğinde, kriyojenik işlemle birlikte malzemenin sertliğinin %2,25 oranında artışı görülmüştür. Burada sertliğin artma sebebi olarak uygulanan ısıtma işlem neticesinde malzemenin dislokasyon yoğunluğunun artması gösterilebilir. α ve β fazlarının farklı termal genleşme katsayısına sahip olması, yapı içerisinde yüksek gerilmelerin oluşmasına sebep olduğu bilinmektedir (Gu et al., 2014; Amine et al., 2012). Bu gerilmeler dislokasyonların hareketini kolaylaştırmaktadır. Bu durum dislokasyon yoğunluğu arttırmakta ve malzeme sertlik kazanmaktadır.

Yaşlandırma işlemi uygulanmış numunede ise sertlik yaklaşık olarak %2 oranında azalmıştır. Yaşlandırma işleminin malzemenin faz dağılımına etkisi değerlendirildiğinde, β fazının artmasına neden olduğu görülmektedir (Gu et al., 2013). β fazlarındaki bu artış, malzemenin sertliğinin azalmasına sebep olmuştur.

Bunun yanında kriyojenik işlem ardından yaşlandırma işlemi uygulanan numunede ise kriyojenik işlemle azalan β fazları, yaşlandırma işlemiyle birlikte artmış, malzemenin sertliğinde çok büyük değişiklik olmamıştır. Bu nedenle ısıtma işlem uygulanmamış ve kriyojenik işlem ardından yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelerin sertlikleri birbirine yakın değerler olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.1 Sertlik ölçüm sonuçları.

6.1.2 Çekme testi sonuçları

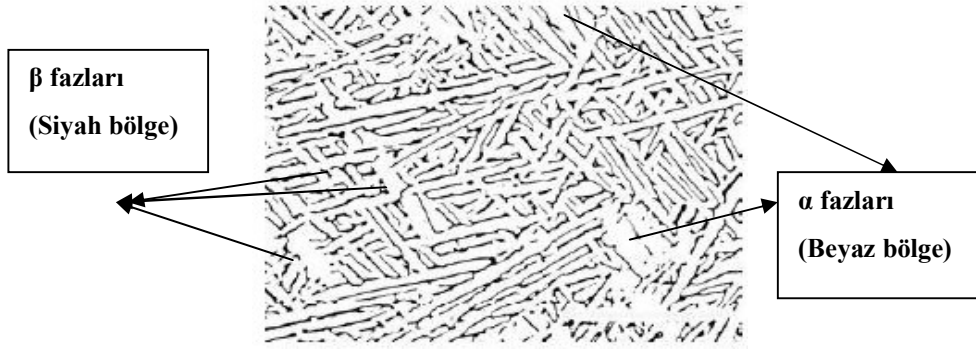
Isıl işlemler prosesi sonrasında elde edilen çekme testi sonuçları Çizelge 6.1’ de verilmiştir. Çizelge 6.1’ de dikkat çeken en önemli unsur ısıtıl işlem sonrasında elde edilen akma ve çekme dayanımlarının ısıtıl işlem uygulanmamış numuneye göre daha düşük olmasıdır. T numunesiyle kıyaslandığında akma ve çekme dayanımlarındaki en büyük düşüş, AT ve ACT numunelerinde gerçekleşmiştir. Bunun yanında ısıtıl işlem görmüş numunelerin % uzamalarında da bir miktar azalma görülmüştür. Bu azalma AT ve CT numunelerinde çok düşük bir miktar olmakla birlikte, ACT numunelerinde % 3 civarındadır.

Çizelge 6.1 Çekme testi sonuçları.

Numune	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	% Uzama
T	982,7	978,3	10,21
AT	963,58	951,1	9,95
CT	979,62	969,9	9,15
ACT	961,35	947,9	7,11

6.1.3 Isıl işlem uygulanmış numunelerin mikro yapılarının incelenmesi

Ti6Al4V alaşımı bir α - β alaşımı olup, optik mikroskopla çekilen Şekil 6.2’de, beyaz bölgeler α fazları, siyah bölgeler ise β fazlarıdır (Charles, 2008). Uygulanan kriyojenik ve yaşlandırma işlemlerinden sonra malzemenin tanecik boyutunda ve mikro yapısında belirgin bir değişim görülmemiştir. Uygulanan ısıl işlemlerle birlikte malzemenin β faz oranı değişim göstermiştir.



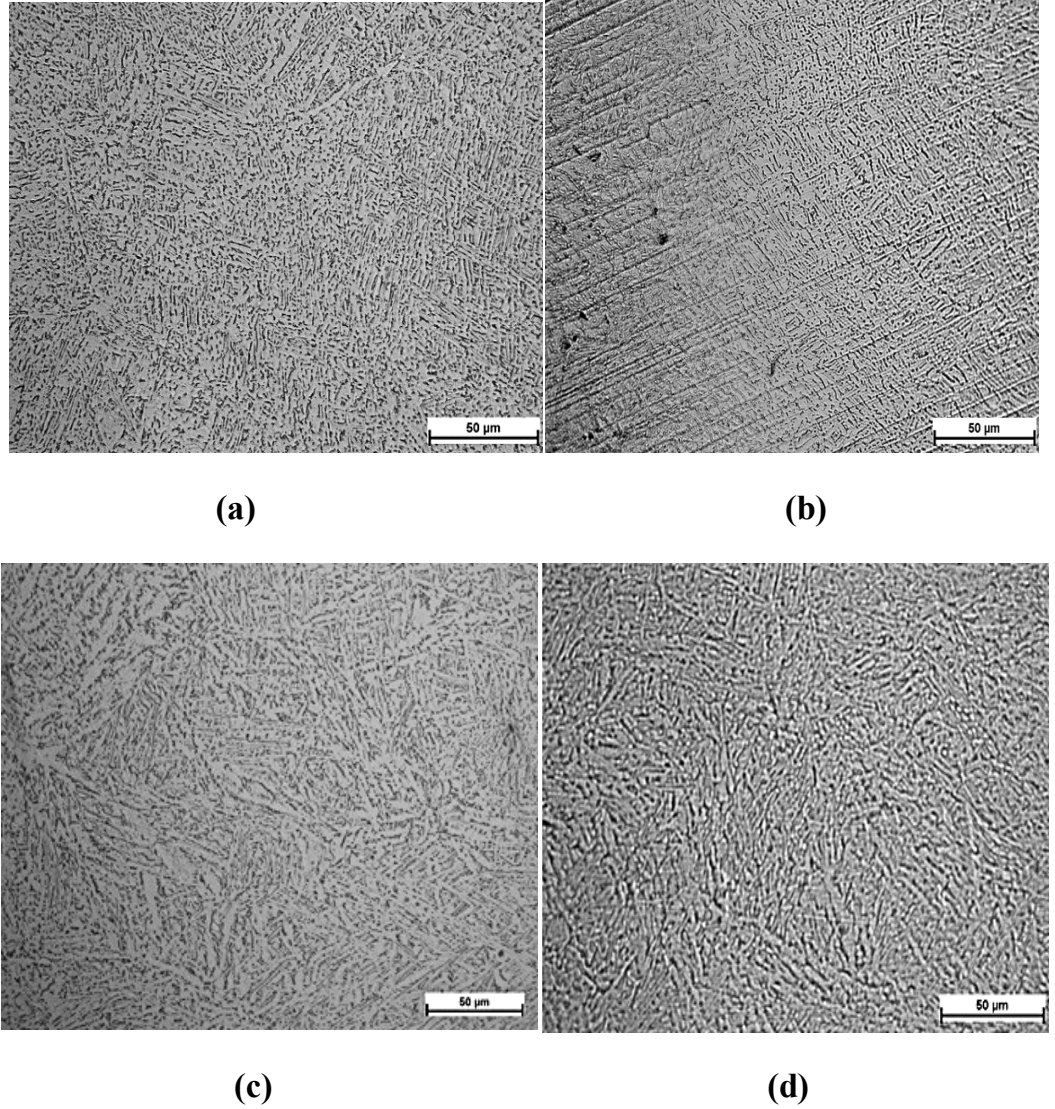
Şekil 6.2 Ti6Al4V alaşımının faz dağılımı (Charles, 2008).

Ti6Al4V alaşımının uygulanan ısıl işlemler ile birlikte değişen mikro yapı görüntüleri Şekil 6.3’de verilmiştir. Şekil 6.3a’da ısıl işlem uygulanmamış numunelerin mikro yapı görüntüsünde β ve α fazlarının dağılımları net olarak görülmektedir.

Ti6Al4V alaşımının kriyojenik işlemle birlikte β fazlarının, meta-stabil β fazlarına dönüştüğü bilinmektedir (Gu et al., 2013). Şekil 6.3b’de kriyojenik işlem uygulanmış numunenin faz dağılımı incelendiğinde β fazlarında belirgin şekilde azalma olduğu, bununla birlikte α fazlarının daha belirgin bir hal aldığı görülmektedir.

Yaşlandırma işlemi ise malzemenin tokluğunu artırırken, malzemenin mukavemetinde bir miktar düşüşe sebep olmuştur. Şekil 6.3c’de yaşlandırma işlemi ardından β ve α fazlarının dağılımı görülmektedir. Görüldüğü gibi, uygulanan yaşlandırma işlemiyle birlikte malzemenin β fazları genişlemiş ve belirgin hale gelmiştir.

Yaşlandırma işlemi uygulanmış ve kriyojenik işlem sonrası yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelerin mikro yapı değişimleri incelendiğinde β fazlarının arttığı, mikro yapıda belirgin bir hal aldığı görülmektedir. Fakat kriyojenik işlem sonrası yaşlandırma işlemi uygulanan numunede β faz oluşumları daha düşük seviyededir (Şekil 6.3d). Bu durum malzemenin % uzaması azalmasına sebep olmuştur (Çizelge 6.1).

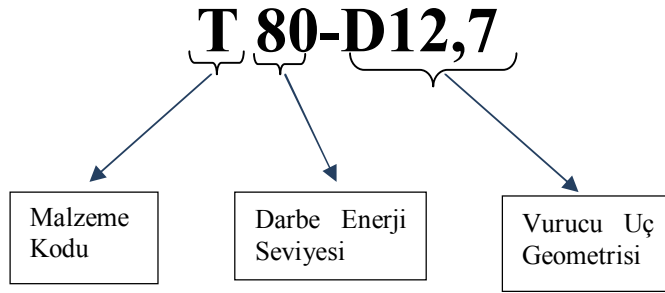


Şekil 6.3 Isıl işlem uygulanmış Ti6Al4V alaşımının mikro yapıları görüntüleri a) T 500x, b) CT 500x, c) AT 500x, d) ACT 500x.

6.2 Düşük Enerjili Darbe Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Darbe testleri sırasında malzemenin darbe davranışlarına, malzemelere uygulanan ısıl işlemlerin, vurucu uç geometrisinin ve enerji seviyelerinin etkili

olduğu görülmüştür. Bu faktörlerinin etkilerini incelemek için bu çalışmada ısıtılma işlemi uygulanmış numunelere, yarı küresel ve konik uç geometrileriyle, artan enerji seviyelerinde testler uygulanmıştır. Düşük enerjili darbe testleri sonucunda, deney sonuçlarının değerlendirilmesinde, kuvvet-çökme, kuvvet-zaman, enerji-zaman ve hız zaman grafikleri kullanılmıştır. Grafiklerin isimlendirilmesinde Şekil 6.4’ de verilen kodlama sistemi kullanılmıştır. Kodlamalar yapılırken tüm numuneler için değişken tutulan değer kodlama sisteminde verilmemiştir.



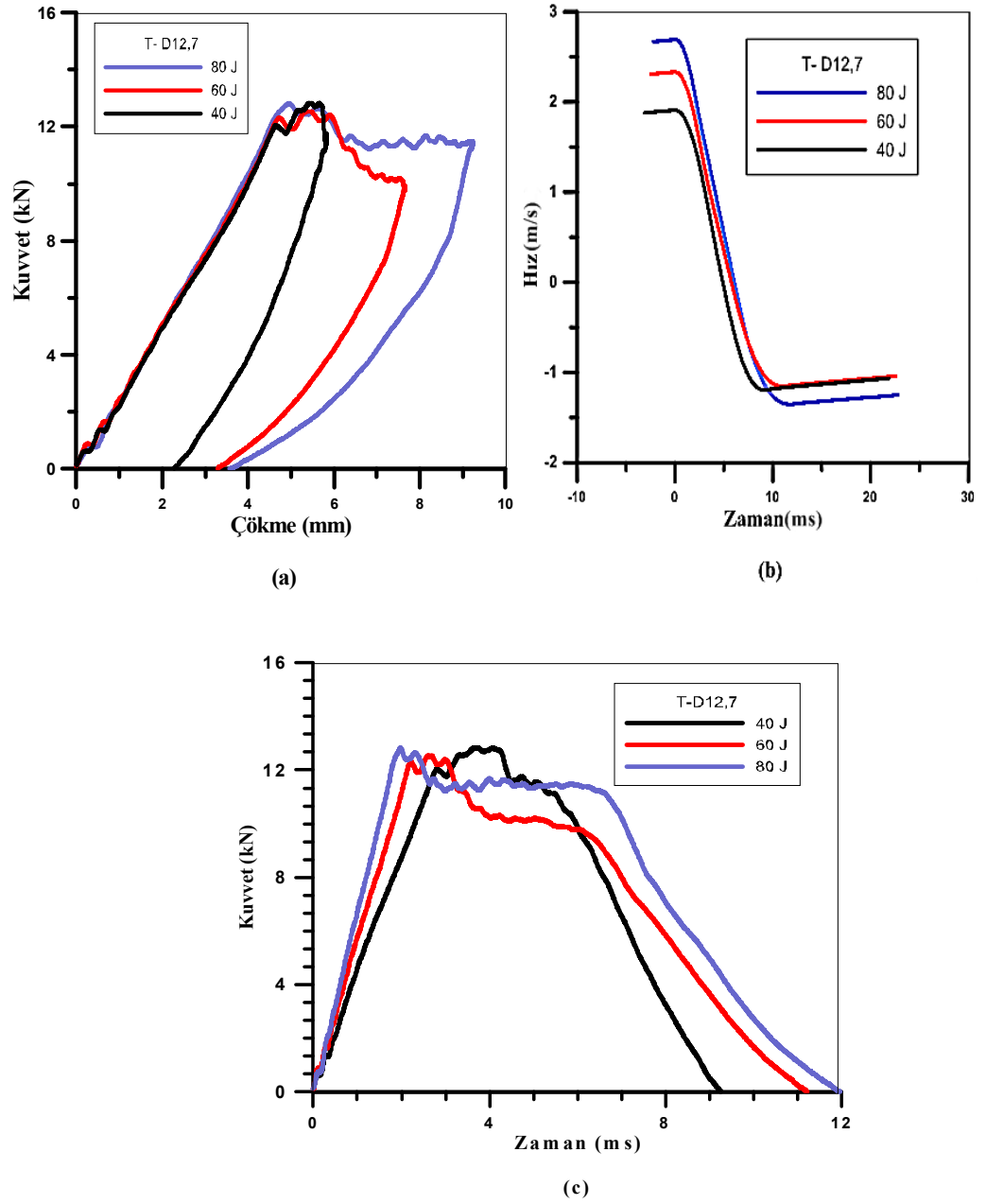
Şekil 6.4 Grafiklerin sınıflandırılmasında kullanılan kodlama sistemi.

6.2.1 Isıl işlem uygulanmamış numunelerin darbe testi sonuçları

Isıl işlem uygulanmamış numunelere yarı küresel uç geometrisiyle uygulanan darbe testi kuvvet-çökme, hız-zaman ve kuvvet-zaman eğrileri Şekil 6.5’ de verilmiştir.

Şekil 6.5a’ da kuvvet-çökme grafikleri incelendiğinde, eğrilerin kapalı eğriler olduğu ve darbe testleri sırasında geri sekme olduğu görülmektedir. Aynı zamanda kuvvet-çökme grafiklerinde artan darbe enerjisiyle birlikte net çökme değerinin de (d_{net}) arttığı görülmektedir. Hız-zaman eğrileri incelendiğinde, 40 J enerji seviyesindeki 1,19 m/s olan geri sekme hızı, 60 J enerji seviyesinde absorbe edilen enerjinin artmasıyla birlikte 1,15 m/s olarak ölçülmüştür. Fakat 80 J enerji seviyesinde, deformasyon bölgesinde pekleşme oluşması sebebiyle geri sekme hızı 1,35 m/s ye yükselmiştir. Kuvvet-zaman grafiğinde, F_{max} değerleri 40 J enerji seviyesinde 12,8 kN iken, 60 J seviyesinde 12,54 kN, 80 J’ de 12,8 kN’ dur. F_{maks} değerleri tüm enerji seviyeleri için görüldüğü gibi numune üzerinde tam bir delinme olmaması sebebiyle çok yakın değerler olarak ölçülmüştür. Grafikte farklılık arz eden nokta ilk temas anından sonra kuvvetin izlediği seyirdir. 40 J için

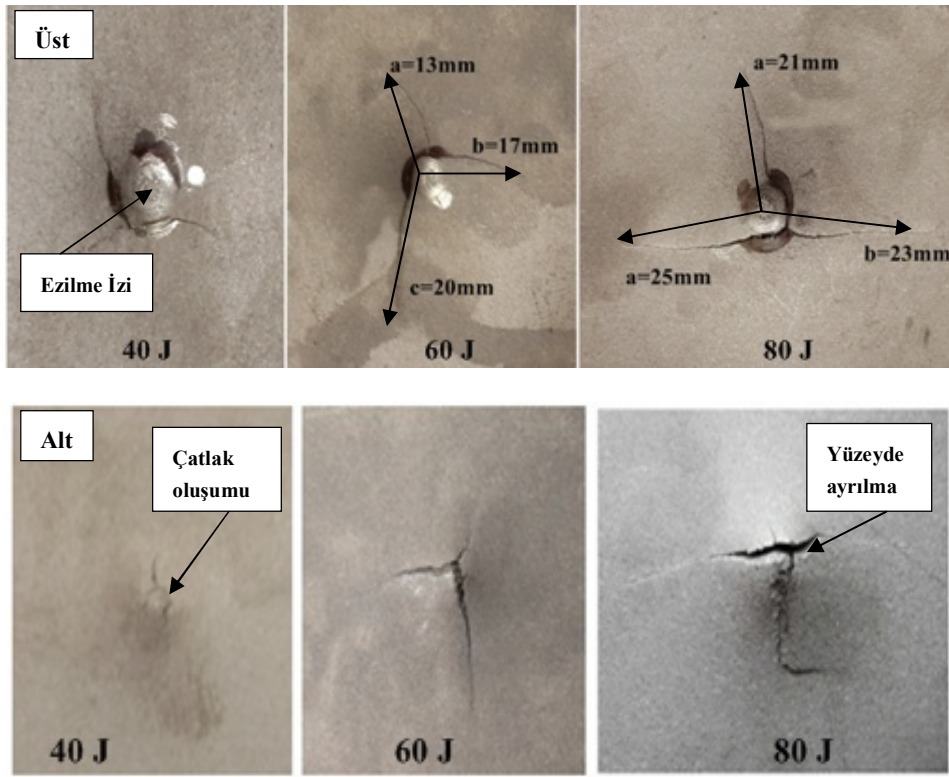
elde edilen eğride, $F_{\max}$ meydana geldiği 4 s den sonraki kuvvet değeri yaklaşık 11,3 kN iken bu değer 60 J için 10 kN iken, 80 J için ise 11,3 kN dur. İkinci basamaktaki kuvvetin sabit kaldığı süre artan joule değerleriyle artmıştır. Aynı zamana artan joule değerlerinde, çökmenin artmasıyla birlikte temas süresi artmış, buna bağlı olarak da kuvvet-zaman grafiklerinin altında kalan alan genişlemiştir. Aynı zamanda artan enerji seviyelerinde ikinci basamağın uzunluğu da çökme miktarının artmasıyla birlikte artmıştır.



Şekil 6.5 Yarı küresel uç geometrisi için elde edilen darbe testi sonuçları a) Kuvvet-çökme, b) Hız-zaman, c) Kuvvet-zaman eğrileri.

Oluşan hasar alanları incelendiğinde 40 J enerji seviyesindeki darbe sonrası numunenin üst yüzeyinde ezilme ve küçük miktarda çatlak oluşumu gözlemlenirken, alt yüzeyinde ise çatlak oluşumu başlangıcı görülmektedir (Şekil 6.6).

60 J ve 80 J seviyelerinde uygulanan darbe testleri sonrası, Şekil 6.5a' da görülen kuvvet-çökme eğrileri genişlemiş, absorbe edilen enerji artmış ve buna bağlı olarak numunede iki yönde geniş çatlak oluşumları gözlemlenmiştir. Üç enerji seviyesinde de numune üzerinde delinme görülmemiştir.



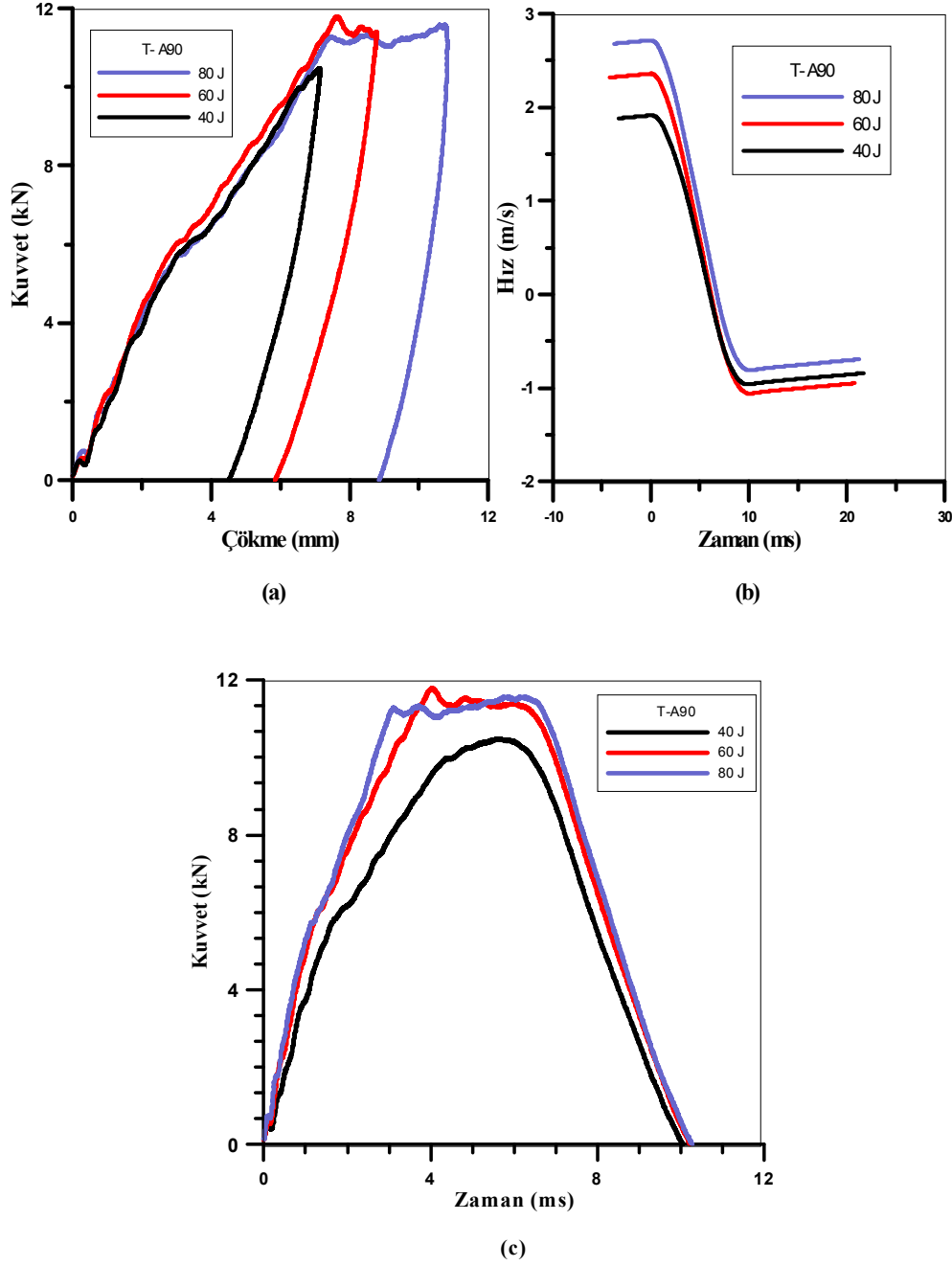
Şekil 6.6 Yarı küresel uç geometrisiyle meydana gelen hasar şekilleri.

Isıl işlemsiz numunelere 90° konik vurucu uç geometrisiyle uygulanan darbe test sonuçları, yarı küresel vurucu uç geometrisiyle kıyaslandığında, azalan uç açısıyla birlikte, kuvvet-çökme eğrilerinin genişlediği, absorbe edilen enerjinin ve çökme miktarlarının arttığı görülmüştür (Şekil 6.7a). Ayrıca kuvvet-çökme grafiklerindeki Δd (elastik şekil değişimi) değeri yarı küresel uç geometrisiyle kıyaslandığında, absorbe edilen enerjinin artmasına bağlı olarak azalmıştır (Şekil 6.7).

Şekil 6.7b' den de görüldüğü üzere geri sekme hız değerinde yarı küresel uç geometrisine kıyasla daha düşüktür. Aynı zamanda artan joule geri sekme hız değerleri de azalmaktadır. Bunun da nedeni, 90° konik vurucu uç geometrisinin, temas bölgesinde yırtılma veya delinme türü hasara sebep olmasıdır.

40 J değerinde $F_{\max}$ 10,48 kN iken bu değer enerji seviyesinin artması sebebiyle 60 J değerinde 11,78 kN, 80 J değerinde 11,57 kN olarak ölçülmüştür. Aynı zamanda kuvvetin sabit kaldığı bir zaman aralığı söz konusudur ve artan joule ile artmaktadır. Ayrıca maksimum kuvvet değeri, yarı küresel uç geometrisine kıyaslandığında, tüm enerji seviyelerinde numune üzerinde delinme görülmesi sebebiyle, düştüğü görülmektedir.

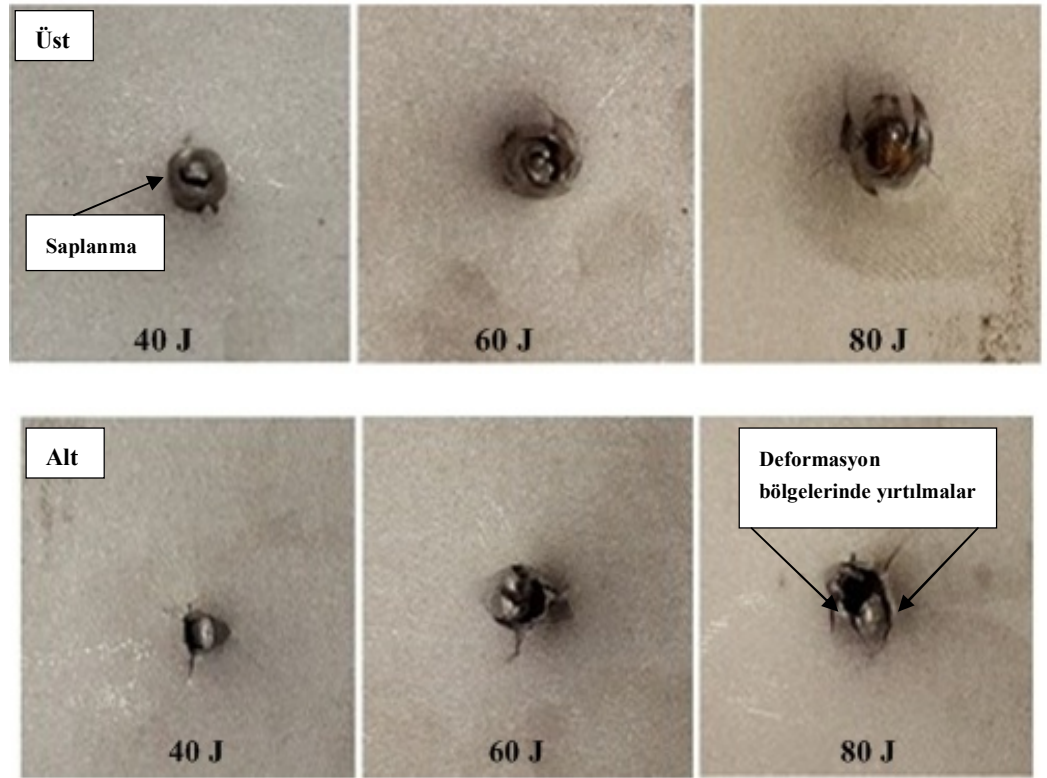
Şekil 6.7c' de dikkat çeken diğer bir durum ise maksimum kuvvetin meydana geldiği zaman aralığı artan joule değeri ile artmaktadır. 40 J için böyle bir aralıktan bahsetmek mümkün olmasa da, çökme miktarının ve enerji miktarının artmasıyla birlikte 60 J ve 80 J değerinde bu zaman artmaktadır.



Şekil 6.7 90° vurucu uç geometrisiyle darbe testi sonuçları a) Kuvvet-çökme, b) Hız-zaman, c) Kuvvet-zaman eğrileri.

90° vurucu uç geometrisiyle uygulanan darbe testleri sonrası, hasar alanları incelendiğinde en düşük enerji seviyesinde konik geometrinin daha rahat şekilde plakaya batması sebebiyle çatlak ve çökme hasarının yerine delinme şeklinde hasar ortaya çıkmıştır. Aynı zamanda yarı küresel uç geometrisinden farklı olarak numunelerde oluşan hasar alanları daha küçük bir alanla sınırlı kalmıştır (Şekil 6.8). Deformasyon bölgeleri incelendiğinde 40 J enerji seviyesinde kesilme

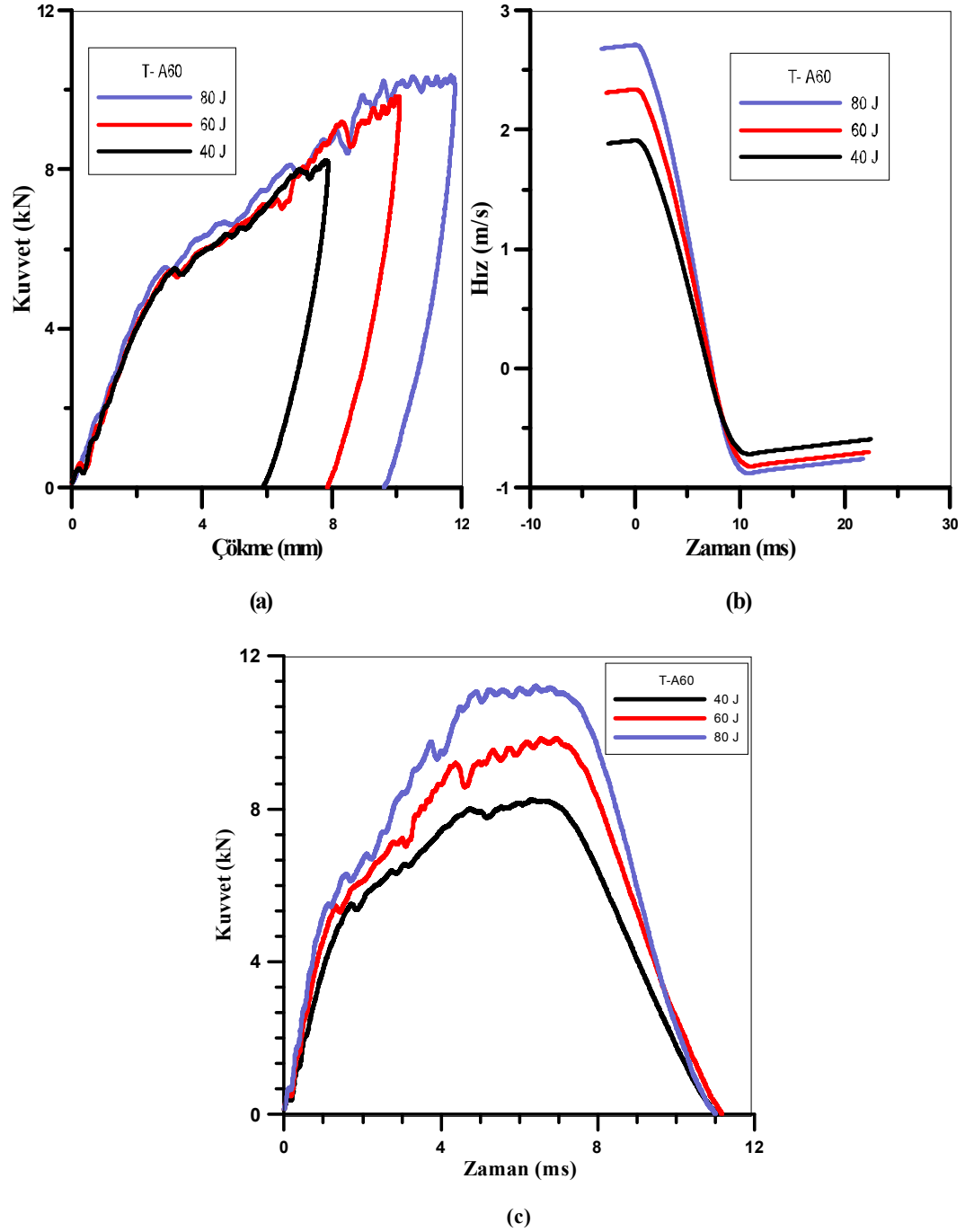
oluşmuş, üst yüzeyinde çatlak oluşumu görülmemiştir. Üst yüzeydeki hasar alanı 8mm çapında dar bir alanla sınırlı kalmıştır. Arka yüzeyde ise çökmenin etkisiyle çatlak oluşumu başlamıştır. 60 J ve 80 J enerji seviyelerinde üst yüzeyde ise enerji miktarının artmasıyla birlikte kesilme yerine yırtılmalar oluşurken arka yüzeyinde çanaksı yapı oluşumu belirgin hale gelmiştir. 60 J enerji seviyesinde numunelerin üst kısmında 16 mm genişliğinde dairesel deformasyon alanı oluşmuştur. 80 J enerji seviyesinde deformasyon alanı enerji seviyesinin artmasıyla birlikte 20 mm çapına genişlemiştir.



Şekil 6.8 90° vurucu uç geometrisiyle darbe testi sonrası hasar oluşumları.

60° vurucu uç geometrisiyle darbe testi kuvvet-çökme eğrileri 90° vurucu uç geometrisiyle benzer karakteristik göstermektedir. 90° vurucu uç geometrisine benzer olarak kuvvet-çökme eğrileri yarı küresel uç geometrisinden daha geniştir (Şekil 6.9a). Elastik şekil değişimi oldukça azalmıştır. Yarı küresel ve 90° vurucu uç geometrisi için elde edilen kuvvet-çökme eğrisi 60° vurucu uç geometrisi ile kıyaslandığında, 60° vurucu uç geometrisi için elde edilen eğrilerde kuvvetin sabit kaldığı bir zaman aralığı gözlemlenmiştir.

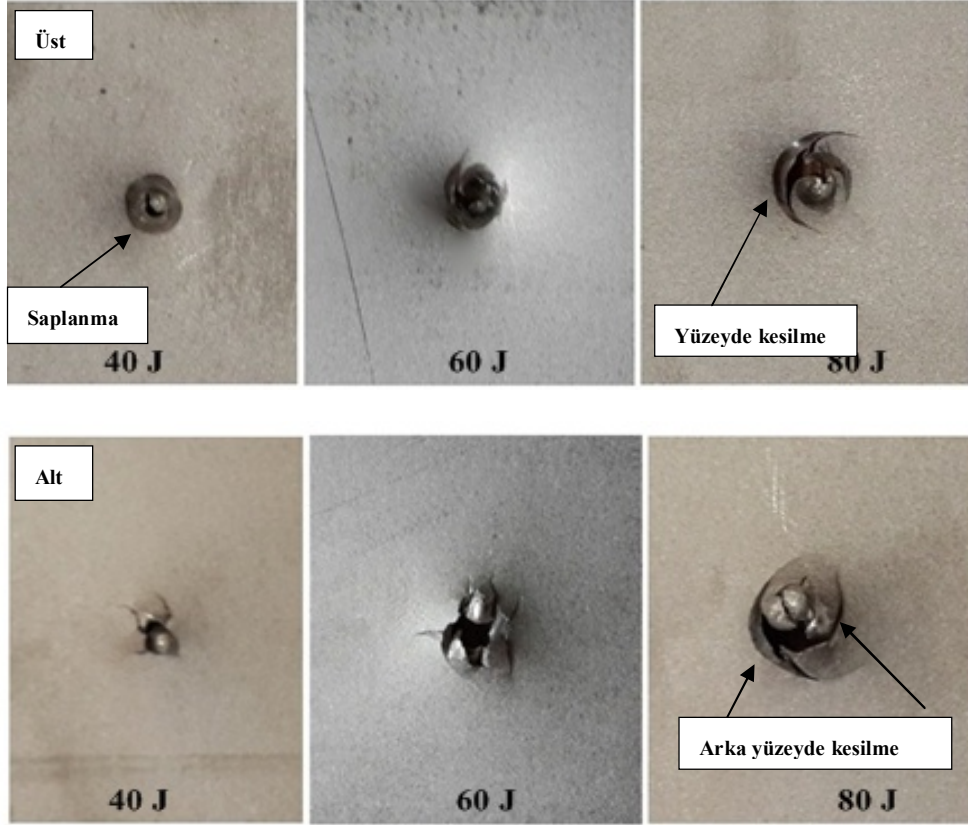
Kuvvet-zaman grafikleri incelendiğinde, maksimum kuvvet miktarının, yarı küresel ve 90° vurucu uç geometrisiyle kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Yarı küresel geometri için elde edilen maksimum kuvvet değeri 12 kN' ın üzerindeyken, 60° vurucu uç geometrisiyle birlikte 10 kN' a düşmüştür. Şekil 6.9c' de enerji seviyelerinin etkisi daha net olarak görülmektedir. Şekil 6.7c' de verilen hız-zaman grafiği diğer uç geometrileriyle kıyaslandığında, geri sekme hızının 1 m/s' den daha küçük olduğu görülmektedir. Şekil 6.5b' de verilen bu değer yarı küresel uç geometrisinde bu değer 1,35 m/s' dir. Buradan çıkartılacak genel sonuç ise vurucu uç geometrisi plakaya ne kadar kolay batıyorsa geri sekme hızı da azalmaktadır. Çünkü uç plakayı delerek hasar vermekte ve dolayısıyla geri esneme miktarı da azalmaktadır.



Şekil 6.9 60° konik vurucu uç geometrisiyle uygulanan darbe testi sonuçları a) Kuvvet-çökme, b) Hız-zaman, c) Kuvvet-zaman eğrileri.

Vurucu uç açısının azalmasıyla birlikte deformasyon bölgesi daralmış ve darbe enerjisi dar bir alana etki etmiştir. Şekil 6.10' da görüldüğü gibi, vurucu uç numuneyi keserek deformasyona uğratmıştır. 60° vurucu uç geometrisinde numunelerin üst yüzeyinde kesilmeler ve alt yüzeylerinde küçük miktarda çatlak oluşumu görülmüştür. Numunelerin alt yüzeylerinde çanak oluşumu

belirginleşmiştir. 40 J enerji seviyesinde numunede delinme görülmüş, hasar alanının çapı 6 mm ile sınırlı kalmıştır. 60 J ve 80 J enerji seviyelerinde deformasyon bölgelerinin çapları enerji miktarının artmasıyla birlikte artmış 12 mm ve 16 mm' ye çıkmıştır.

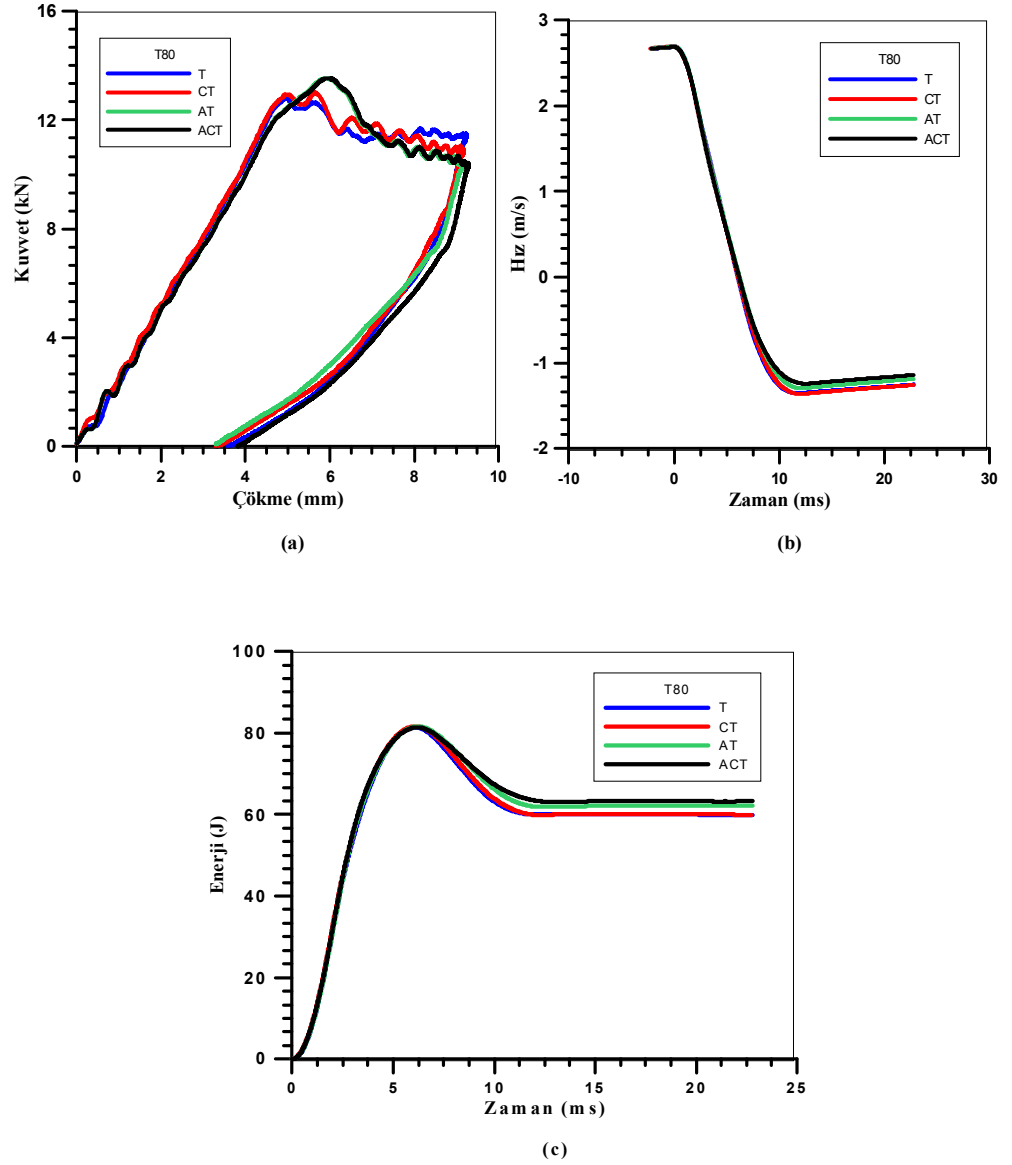


Şekil 6.10 60° konik vurucu uç geometrisiyle darbe testi sonucu hasar oluşumu.

6.2.2 Isıl işlemin darbe dayanımına etkisi

Ti6Al4V alaşımına uygulanan farklı ısıtım proseslerinin, darbe davranışlarını nasıl etkilediğini görmek adına, sabit enerji seviyesinde ve yarı küresel uç geometrisi kullanılarak darbe testleri uygulanmıştır. Şekil 6.11' de elde edilen kuvvet-çökme, hız-zaman ve enerji-zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 6.11a' da elde edilen kuvvet-çökme eğrileri incelendiğinde, maksimum kuvvetin AT ve ACT numunelerinde elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte maksimum çökme (d_{max}) ve elastik şekil değişimi (Δd) ve net çökme değerinin (d_{net}) değerlerinin çokta değişmediği görülmüştür. Şekil 6.11b' de hız zaman grafiğinde de CT numunesinde geri sekme hızının çok az bir miktar daha büyük

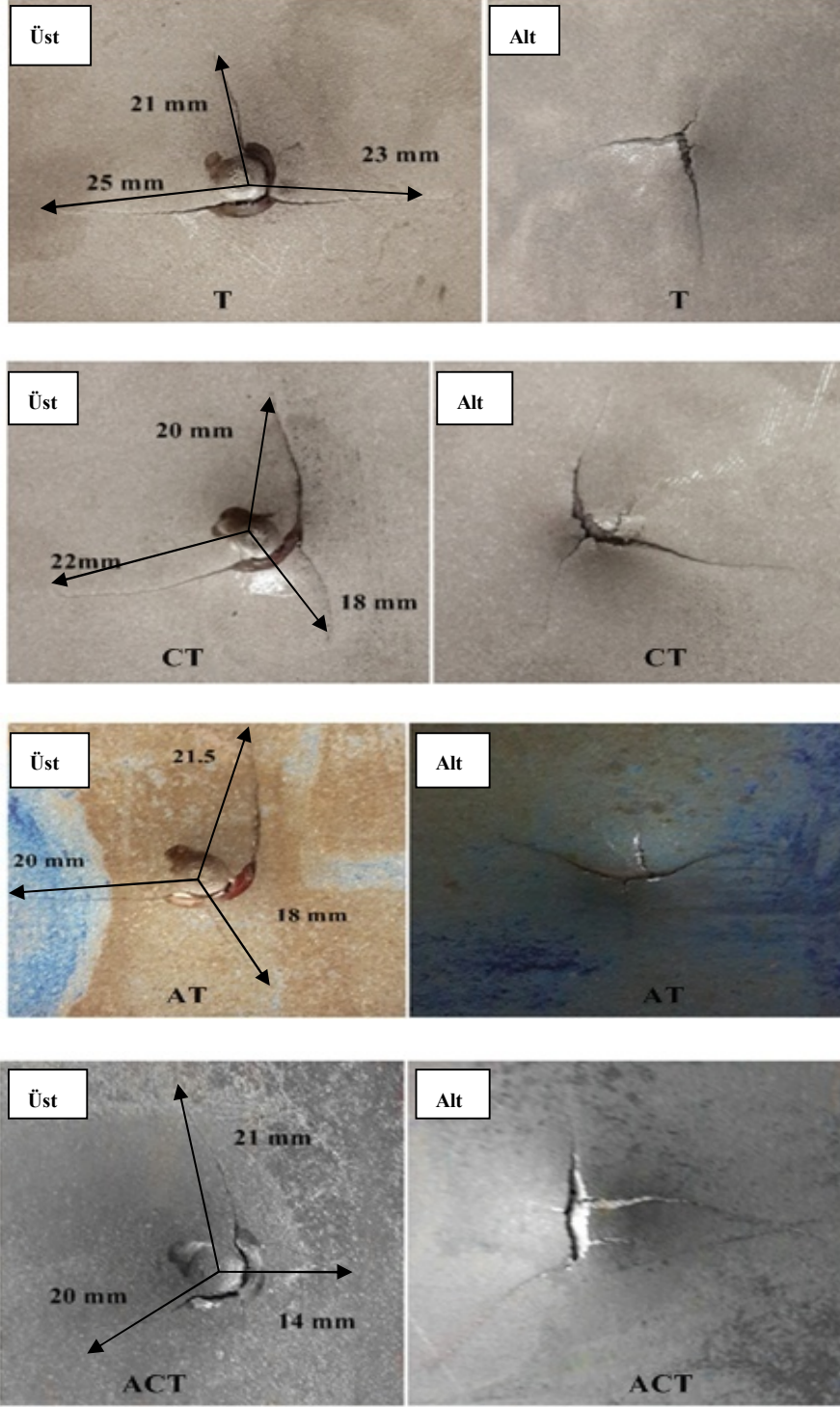
olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, kriyojenik işlem sonrasında numune sertliğinin bir miktar artmış olmasıdır. Şekil 6.11c’ de enerji-zaman grafiklerinde elastik enerji değeri en büyük numuneler CT ve T numuneleridir. Darbe testleri sırasında 80 J enerjinin % 75’ i CT ve T numuneleri tarafından absorbe edilebilirken, % 78’ i AT numunesi, % 81’ i ACT numunesi tarafından absorbe edilebilmektedir.



Şekil 6.11 Farklı ısıt işlem uygulanmış numunelerin 80 J enerji seviyesinde darbe testi sonuçları a) Kuvvet-çökme eğrileri, b) Hız-zaman, c) Enerji-zaman eğrileri.

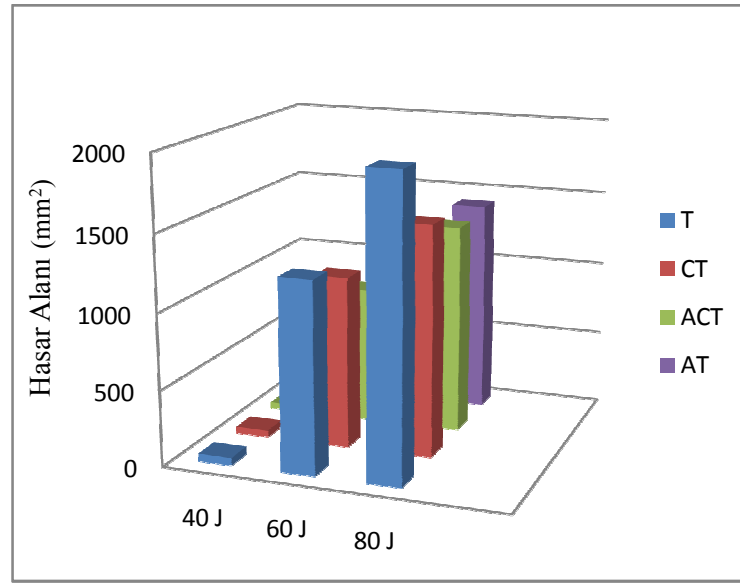
Darbe enerjisi, numunede meydana gelen elastik ve plastik deformasyon tarafından absorbe edilebilir. Bununla birlikte temasın meydana geldiği noktadaki

çatlak ve yırtılmalar bu absorbe edilen değere katkıda bulunur. Buradan hareketle en küçük hasar yarıçapı 21 mm olan ACT numunesinde, en büyük hasar alanı ise 25 mm ile T numunede meydana geldiği söylenebilir. Fakat yinede numuneler arasındaki farkın çok büyük olmadığını belirtmekte fayda vardır.



Şekil 6.12 80 J enerji seviyesinde yarı küresel uç geometrisiyle yapılan darbe testlerinde deformasyon oluşumları.

Hasar alanları ısıtıl işlem uygulanmamış numune ile karşılaştırıldığında, uygulanan kriyojenik işlemle birlikte hasar alanının yaklaşık % 22, yaşlandırma işlemi uygulanmış numunede hasar alanı % 26 ve kriyojenik işlem ardından yaşlandırma uygulanmış numunede % 30 oranında azalmıştır (Şekil 6.13). Hasar alanları incelendiğinde, uygulanan ısıtıl işlemler numunelerin çekme dayanımlarının % 1 oranında düşürürken, hasar alanlarının % 22 ile % 30 arasında azaltmıştır.

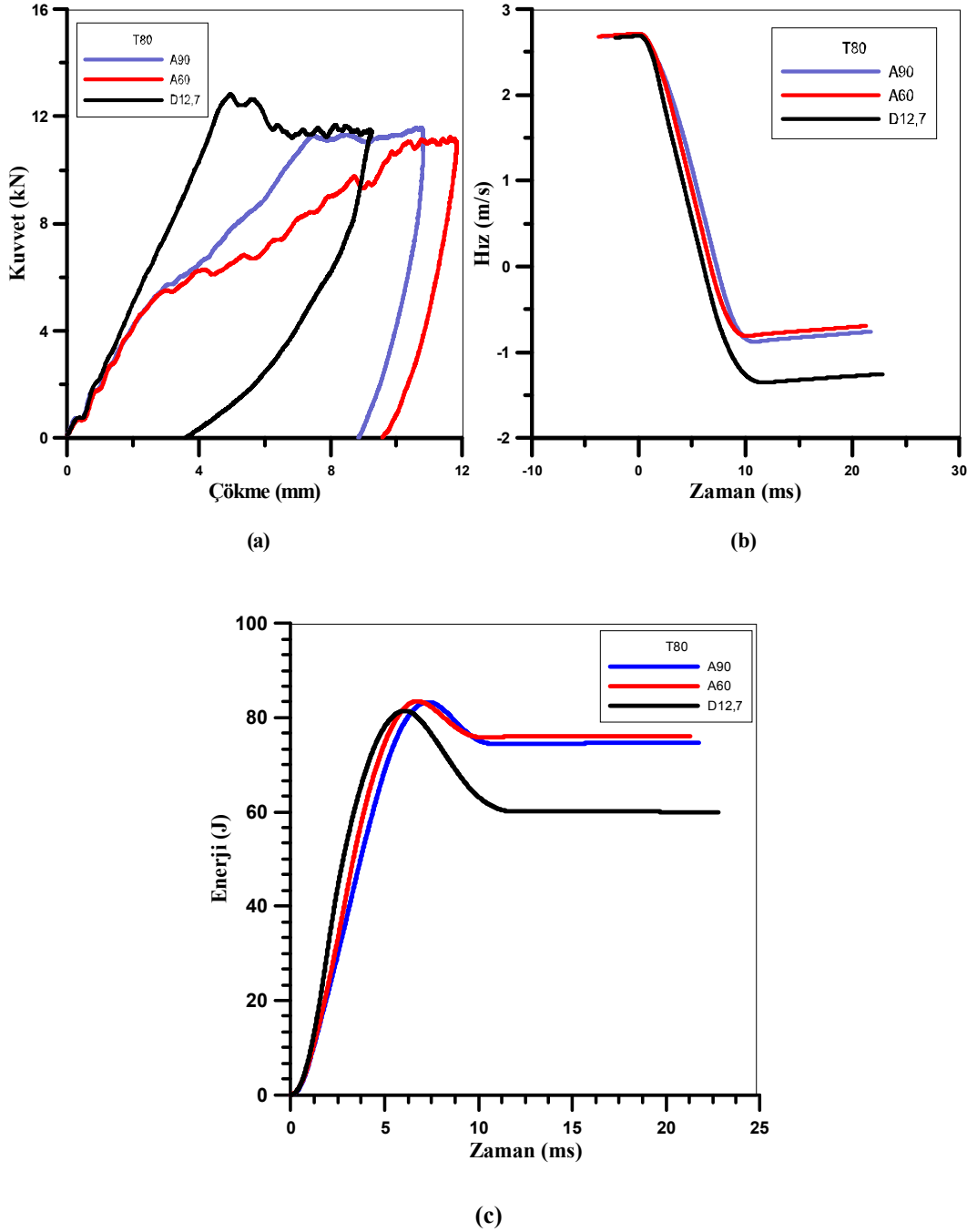


Şekil 6.13 Isıl işlem prosesinin ve enerji seviyesinin hasar alanı üzerine etkisi.

6.2.3 Vurucu uç geometrisinin darbe davranışı üzerine etkisi

Vurucu uç geometrisinin darbe davranışı üzerindeki etkisini ortaya koyabilmek için farklı vurucu uç geometrileriyle testler yapılmıştır. Şekil 6.14' de kuvvet-çökme eğrileri, vurucu uç açısının daralmasıyla, yatay yönde genişlediği ve geri sekmelerin azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda vurucu uç açısının daralmasıyla birlikte maksimum kuvvet azalmış, maksimum çökme artmıştır. Yarı küresel uç için geri sekme hızı 1,35 m/s iken konik geometrilerde geri sekmenin azalmasıyla birlikte bu değer A90 için 0,87 m/s ve A60 vurucu uç için 0,81 m/s' ye düşmüştür. Enerji absorpsiyonları karşılaştırıldığında, yarı küresel uç en düşük enerji emilimine sahipken, vurucu uç açısının daralmasıyla birlikte, enerji emilimi (E_a) artmıştır. Yarı küresel uç geometrisinde 80 J darbe enerjisinin % 78' i, 90°

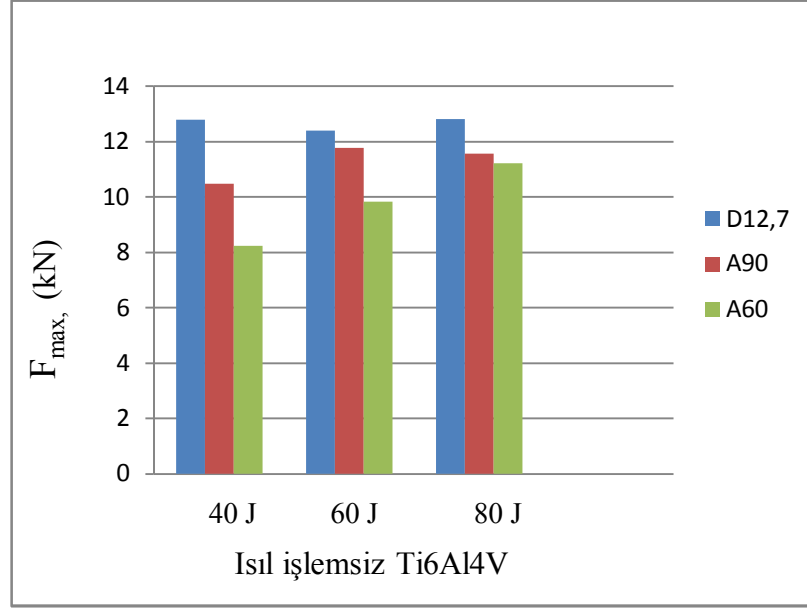
konik uç ile yaklaşık % 91'i, 90° konik uç ile % 92' si absorbe edilebilmektedir. (Şekil 6.14c).



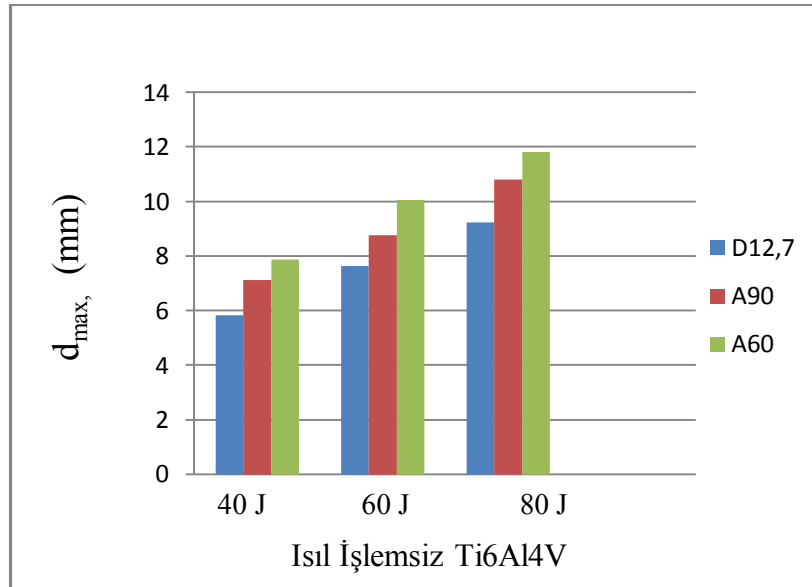
Şekil 6.14 Vurucu uç geometrilerinin darbe dayanımı üzerine etkisi a) Kuvvet-çökme, b) Hız-zaman, c) Enerji-zaman eğrileri.

Malzemenin deformasyon karakteristiği hakkında bilgi veren diğer veriler F_{max} ve d_{maks} değerleri Şekil 6.15' de verilmiştir. Yarı küresel uç geometrisinde numune üzerine tam olarak batma gerçekleşmediği için F_{max} değeri, diğer iki uç

geometrisinden daha büyük olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte vurucu uç geometrisinin daralmasıyla, geri sekme azalmış, absorbe edilen enerji artmış ve bunun sonucu olarak maksimum çökme değeri artmıştır. Şekil 6.15b' den de görüldüğü gibi d_{maks} değeri konik geometrilerde tüm enerji seviyelerinde daha yüksektir.



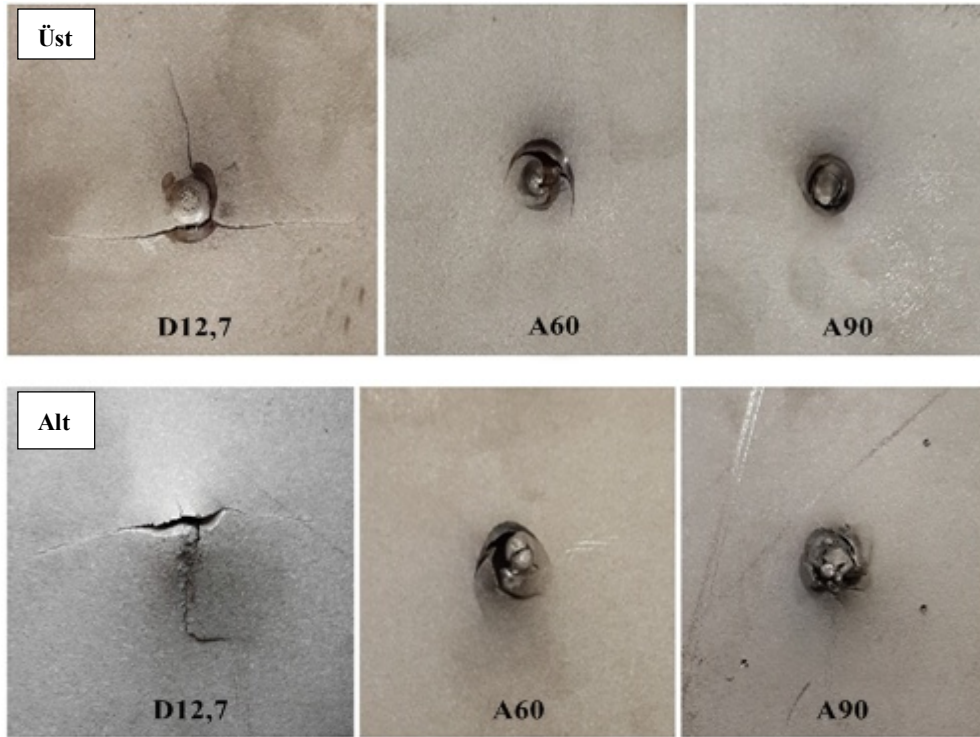
(a)



(b)

Şekil 6.15 Farklı uç geometrilerinin ve enerji etkisi a) Maksimum kuvvet-darbe enerjisi, b) Maksimum çökme-darbe enerjisi.

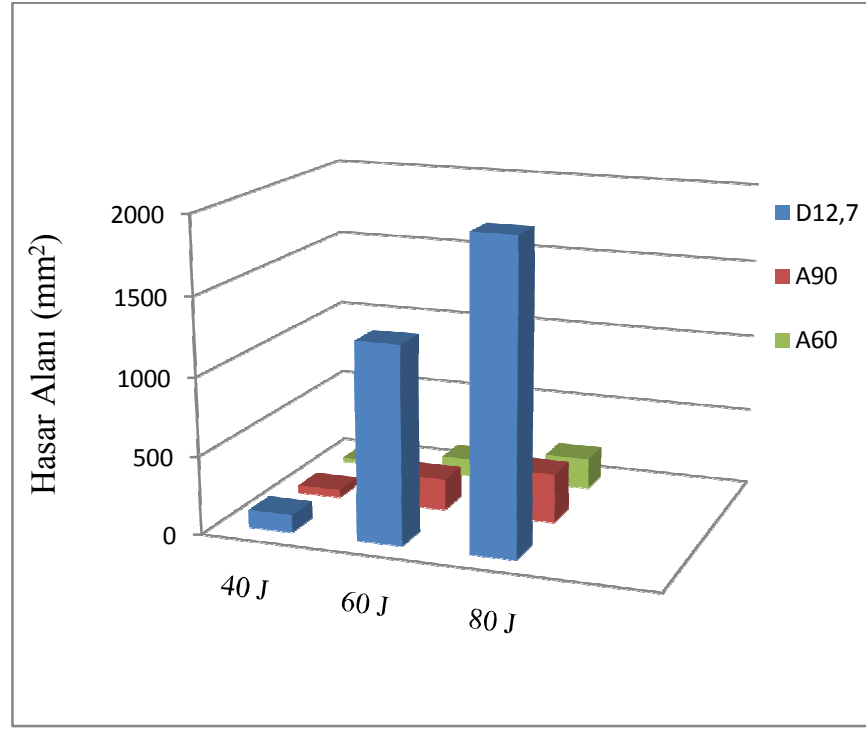
Hasar alanları makro düzeyde değerlendirildiğinde, vurucu uç geometrisinin deformasyon oluşumuna doğrudan etki ettiği görülmektedir. Şekil 6.16’ da üç farklı vurucu uç geometrisiyle 80 J enerji seviyesinde uygulanan darbe testi sonunda oluşan hasar bölgeleri görülmektedir. Üst yüzeydeki hasar alanları yarı küresel uç geometrisinde geniş çatlaklardan oluşurken, A90 ve A60 vurucu uç geometrilerinde ise daralan uç geometrisinin etkisiyle birlikte yüzeydeki kesilmelerden ve küçük çatlaklardan oluşmaktadır. Alt yüzeydeki deformasyon oluşumu incelendiğinde, yarı küresel geometride alt yüzeyde çökme ve kırılmalar görülürken, A90 ve A60 vurucu uç geometrilerinde çanak oluşumu görülmüştür. Buradan hareketle yarı küresel uç geometrisiyle uygulanan darbe testlerinde geniş hasar alanları ve küçük miktarlarda çökme olduğu, konik vurucu uç geometrilerinde ise dar hasar alanlarıyla büyük miktarda çökme olduğu söylenebilir.



Şekil 6.16 Isıl işlem uygulanmamış numunelerde 80 J enerji seviyesinde vurucu uç geometrisinin hasar oluşumuna etkisi.

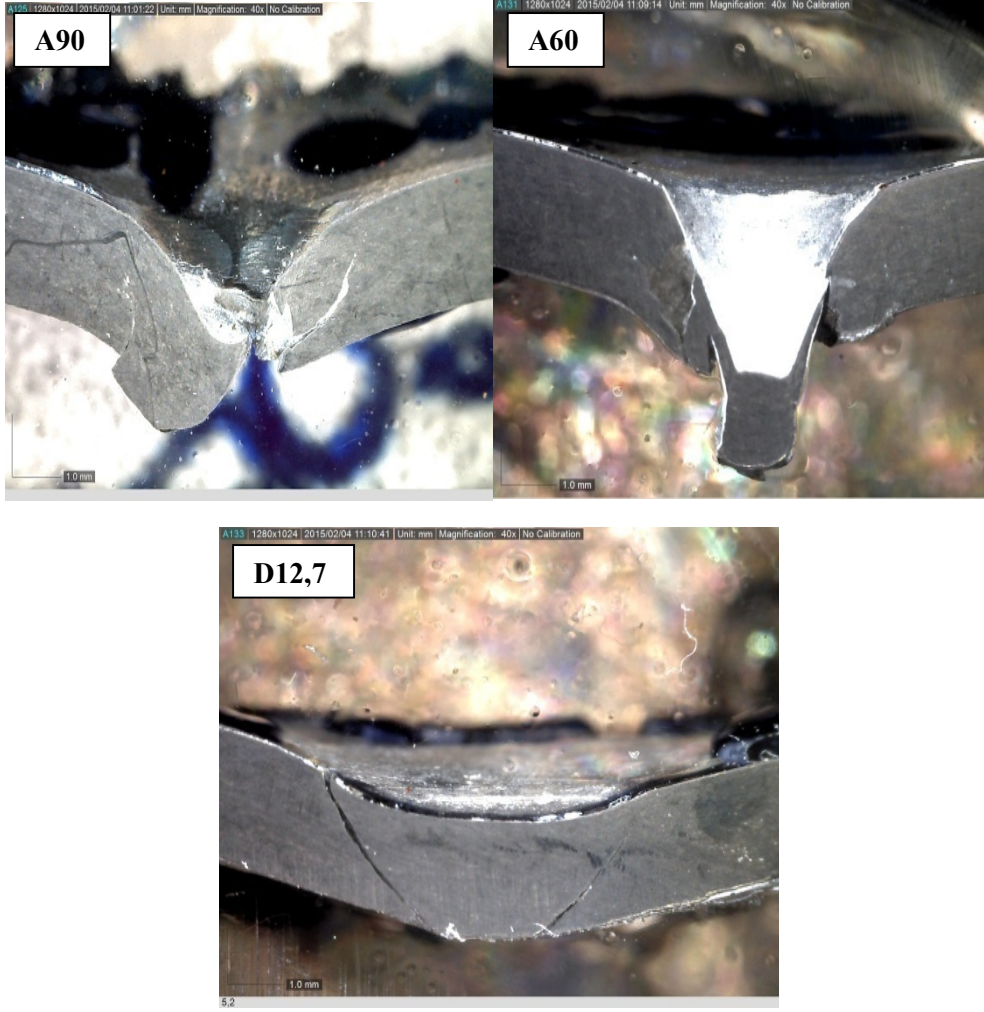
Şekil 6.17’ de farklı vurucu uç geometrileriyle 40 J, 60 J ve 80 J enerji seviyesinde darbe testi uygulanmış numunelerin hasar alanları tespit edilmiştir. Yarı küresel uç geometrisinde malzemede delinme görülmesi dahi çatlak oluşumu

ve yüzeyde görülen kırılmalar geniş bir alana yayılarak deformasyon alanını genişletmiştir (Şekil 6.16). 90° ve 60° konik vurucu uç geometrilerinde ise hasar alanı daha dar bir alanda gerçekleşmiştir. Görüldüğü gibi en büyük hasar alanı yarı küresel uç geometrisine aittir. En küçük hasar alanı ise 60° vurucu uç geometrisine aittir.



Şekil 6.17 Isıl işlem uygulanmamış numunelerde, farklı uç geometrisinin ve darbe enerjisinin hasar üzerindeki etkisi.

Şekil 6.18’ de farklı uç geometrileriyle 40 J enerji seviyesinde darbe testi uygulanmış ısıtılmış ısıtılmamış numunelerin hasar alanlarının en kesitlerinin optik resimleri görülmektedir. Farklı geometrilerle uygulanan darbe testleri plakaların üst ve alt yüzeylerinde farklı deformasyonlar oluşturmalarının yanında, en kesit boyunca da farklı deformasyonlar oluşturmaları. Yarı küresel uç geometrisiyle plakaların kesitinde oluşan hasar, darbe yönüne dik yönde kırılmalar şeklinde oluşmuştur. A90 vurucu uç geometrisinde çökme ve deformasyon bölgesindeki yüzeyde ayrılmalar oluşmuştur. A60 konik vurucu uç geometrisinde ise vurucu uç en kesit boyunca ilerlemiş, çökme en yüksek seviyeye ulaşmıştır.

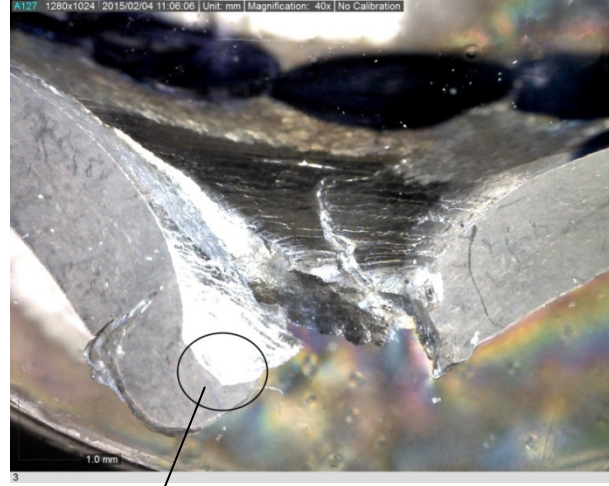


Şekil 6.18 Farklı vurucu uç geometrilerinin 40 J enerji seviyesindeki hasar alanlarının incelenmesi

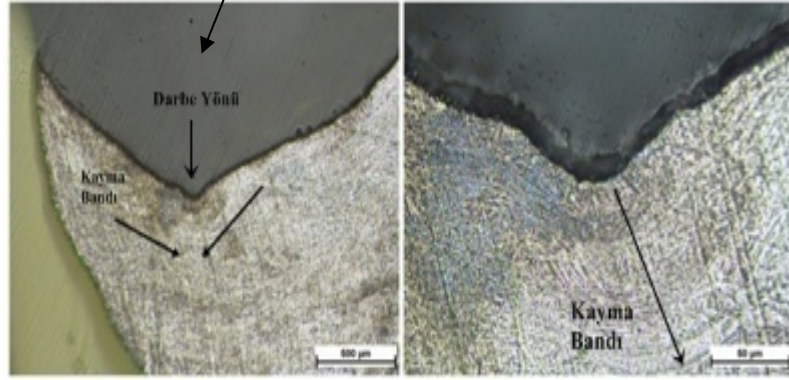
6.2.4 Deformasyona uğramış bölgelerin mikro yapı incelemeleri

Ti6Al4V plakalara uygulanan düşük enerjili darbe testleri sırasında, vurucu uç geometrisinin ve uygulanan darbe enerji seviyesinin darbe karakteristiğine etkileri araştırılmıştır.

Şekil 6.19’ da 80 J enerji seviyesinde 90° konik vurucu uç geometrisiyle darbe testi uygulanmış numunelerin deformasyon bölgelerinin mikro yapı değişimleri görülmektedir. Darbe testlerinde artan enerji seviyeleriyle birlikte numune üzerinde oluşan çökme miktarı artmış, artan çökme miktarıyla birlikte mikro yapıda oluşan kayma bandı genişliği artmıştır (Şekil 6.19).



(a)

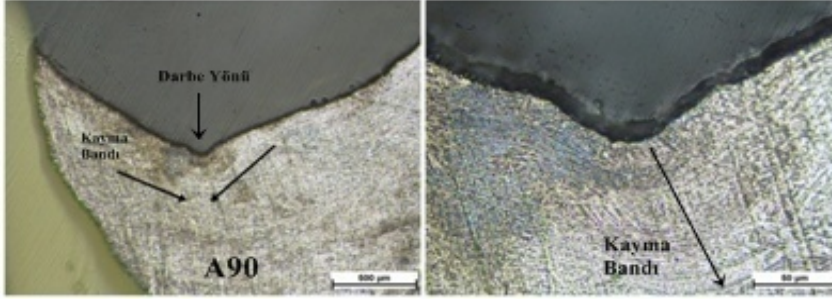


(b)

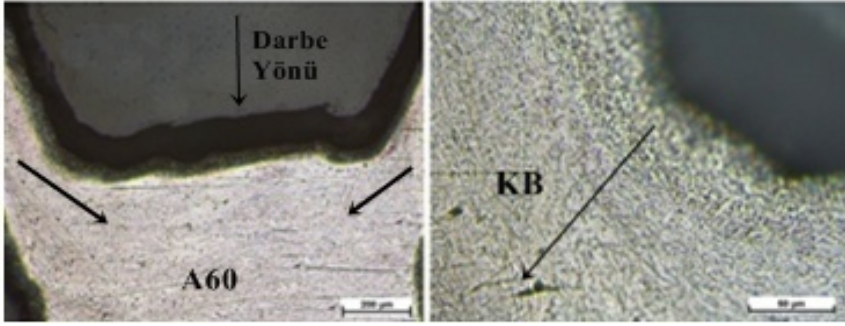
(c)

Şekil 6.19 80 J enerji seviyesinde 90° konik vurucu uç geometrisiyle oluşan hasar bölgesinin incelenmesi, a) Deformasyon bölgesinin kesiti, b) Mikro yapı görüntüsü 50x, c) 500x.

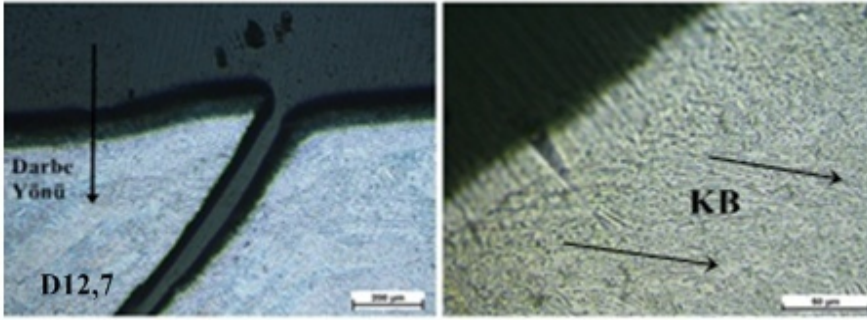
Darbe testleri sırasında, vurucu uç geometrisinin deformasyon oluşumuna etkisi makro ölçekte değerlendirilmişti, mikro boyutta incelemeleri ise Şekil 6.20’ de verilmiştir. Vurucu uç geometrisinin etkisini göstermek için yapılan incelemelerde, yarı küresel uç geometrisinde en düşük enerji emilimi olması sebebiyle malzemede en az hasar meydana geldiği görülmüştür. 60° konik vurucu uç geometrisinde ise enerji emiliminin artması sebebiyle çökme miktarı artmış malzemede oluşan kayma bant oluşumu belirginleşmiştir. 60° ve 90° konik vurucu uç geometrisinde deformasyon bölgelerinde darbeye bağlı yüzeyde kesilmeler ve çökme görülürken, yarı küresel uç geometrisinde mikro kırıklar oluşmuştur.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.20 40 J enerjisi seviyesinde ısıtılmış numunelerin farklı vurucu uç geometrileri mikro yapı değişimleri.

7. SONUÇ

Ti6Al4V alaşımının darbe deformasyon davranışlarının araştırılabilmesi için, yapılan tez çalışmasında Ti6Al4V alaşımlı plakalara kriyojenik işlem, yaşlandırma işlemi ve kriyojenik işlem sonrası yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Isıl işlem uygulanan plakalar artan enerji seviyelerinde ve üç farklı vurucu uç geometrisiyle darbe testi uygulanarak farklı darbe koşullarındaki deformasyon davranışları incelenmiştir.

Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar ise;

- Uygulanan kriyojenik işlemle birlikte malzemenin sertliğinin arttığı, yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelerin sertliğinin azaldığı görülmüştür. Tüm ısıl işlem uygulanmış numune gruplarında çekme mukavemetinde küçük miktarda azalma görülmüştür.
- Uygulanan kriyojenik işlemle birlikte malzemenin β fazlarının azaldığı, yaşlandırma işlemiyle β fazlarının daha belirgin bir hal aldığı görülmüştür. Kriyojenik işlem ardından yaşlandırma işlemi uygulanan numunede ise, yaşlandırma işleminin etkisiyle β fazları belirginleşmiştir.
- Numunelere uygulanan ısıl işlemler sonunda en yüksek tokluk yaşlandırma işlemi ve kriyojenik işlem sonucunda yaşlandırma işlemi uygulanan numunelerde görülmüştür. Aynı zaman en küçük hasar alanı ve en küçük çökme değeri ACT ve AT numunelerinde görülmüştür.
- Yarı küresel uç geometrisiyle gerçekleştirilen darbe testlerinde en geniş hasar alanı ısıl işlemsiz numunede görülürken, en küçük hasar alanı kriyojenik işlem sonrası yaşlandırma işlemi uygulanmış numunede görülmüştür.
- Vurucu uç geometrisinin hasar alanına etkileri değerlendirildiğinde, 80 J enerji seviyesinde D12,7 vurucu uç geometrisiyle, A60 vurucu

uç geometrisinin hasar alanları kıyaslandığında, yarıküresel uç geometrisiyle oluşan hasar alanının 9 kat daha geniş olduğu görülmüştür

- Vurucu uç geometrisinin darbe dayanımına etkisi incelendiğinde, en büyük elastik şekil değişimi ve geri sekmenin yarı küresel uç geometrisinde olduğu görülmüştür.
- Geri sekme hızları A90 ve A60 vurucu uç geometrilerinde yaklaşık 0,81 m/s iken, yarı küresel uç geometrisinde 1,35 m/s olarak elde edilmiştir.
- Enerji absorpsiyonları karşılaştırıldığında, yarı küresel uç geometrisi en düşük enerji emilimine sahipken, vurucu uç açısının daralmasıyla birlikte, enerji emilimi (E_a) artmıştır.
- En büyük maksimum kuvvet değeri D12,7 vurucu uç geometrisinde ölçülmüştür. Aynı zamanda maksimum kuvvet değerinde, vurucu uç açısının daralmasıyla birlikte azalma, maksimum çökme değerlerinde ise artma görülmüştür.
- Deformasyon bölgelerinin artan enerji seviyelerindeki mikro yapı değişimleri incelendiğinde, enerji seviyesinin makro seviyede çökme miktarını arttırdığı ve bunun sonucu olarak, mikro yapıda oluşan kayma bant genişliğini arttırdığı görülmektedir.
- Farklı vurucu uç geometrileriyle uygulanan darbe testlerinde, deformasyon bölgelerindeki mikro yapı değişimleri incelendiğinde, en geniş kayma bandı A60 vurucu uç geometrisinde, en ince kayma bandı ise yarı küresel vurucu uç geometrisinde görülmüştür.
- Deformasyon bölgelerinin mikro yapı incelemelerinde, yarı küresel uç ile oluşan deformasyon bölgelerinde konik vurucu uç geometrilerinden farklı olarak mikro kırık oluşumu gözlemlenmiştir.

• 7.1 Gelecekteki Çalışmalar İçin Öneriler

Yapılan bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlarla birlikte, aşağıda verilen çalışmalarında yapılabileceği görülmüştür.

- Yaşlandırma işlem sıcaklığının, malzemenin mekanik özellikleri üzerine etkilerini araştırabilmek için farklı sıcaklıklarda yaşlandırma işlemi uygulanması faydalı olacaktır.
- Kriyojenik işlem süresi arttırılarak malzemenin mekanik özelliklerine etkileri incelenebilir.
- Yüksek hızlarda darbe testleri uygulanarak malzemenin, yüksek enerjilerdeki darbe davranışları araştırılabilir.
- Farklı çaplarda vurucu uç geometrileri tasarlanarak deformasyon oluşumuna etkileri araştırılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Amini, K., Akhbarizadeh, A. and Javadpour, S.,** 2012, Investigating the effect of holding duration on the microstructure of 1.2080 tool steel during the deep cryogenic heat treatment, *Vacuum*, 86:1534-1540 pp.
- Anné, G., Vanmeensel, K., Vleugels, J. and Biest, O.V.D.,** 2004, Electrophoretic deposition as a novel near net shaping technique for functionally graded biomaterials, *The 8th International Symposium on Multifunctional and Functionally Graded Materials*, 213-218 pp.
- Arslan, Y. ve Özdemir, A.,** 2013, Farklı sürelerde kriyojenik işlem uygulanmış AISI D3 soğuk iş takım çeliği zımbalarda aşınma davranışları ve takım ömrü, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2(3):87-99 pp.
- ASTM E 8M –04,** 2004, Standart test methods for tension testing of metallic.
- Borvik, T., Langseth, M., Hopperstad, O.S. and Malo, K.A.,** 2002, Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses Part I: Experimental Study, *International Journal of Impact Engineering*, 27:19–35 pp.
- Burkins M.S., Hansen, J.S., Paige, J.I. and Turner P.C.,** 2000, The effect of thermo mechanical processing on the ballistic limit velocity of extra low interstitial titanium alloy Ti–6Al–4V, *Army Research Laboratory, ARL-MR-486*, 1:69 pp.
- Charles, C.,** 2008, Modelling microstructure evolution of weld deposited Ti6Al4V, Lulea University of Technology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, 59p.
- Chunxiang, C., BaoMin, H., Lichen, Z. and Shuangjin, L.,** 2011, Titanium alloy production technology, market prospects and industry development, *Materials and Design*, 32: 1684–1691 pp.
- Çaydaş, U.,** 2008, Ti6Al4V alaşımlarının elektro erozyon ve elektro kimyasal işleme yöntemleriyle işlenebilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 195s.
- Donachie, M.J.,** 2000, Titanium a Technical Guide, The Material Information Society, Second Edition, USA.
- Erdoğan, M.,** 2001, Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri Cilt 2, Nobel Yayınevi, 602s.
- Evcı, C.,** 2009, Seramik kompozit zırh sistemlerinin darbe ve balistik özelliklerinin belirlenmesi, Doktora Tezi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 271s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ezugwu, E.O. and Wang, Z.M.**, 1997, Titanium alloys and their machinability, *Journal of Materials Processing Technology*, 68(3):262-274 pp.
- Ezugwu, E.O., Bonney, J. and Yamane, Y.**, 2003, An overview of the machinability of aero-engine alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 134: 233- 253 pp.
- Gemelli, E. and Camargo, N. H. A.**, 2007, Oxidation kinetics of commercially pure titanium, *Revista Materia*, 12:525-531 pp.
- Gilbert, R., and Richard S.**, 2004, Heat treating of titanium and titanium alloys ASM handbook 9,. Edition, *Heat Treating, ASM International*, 4:2043-2971 pp.
- Gu, K. X., Wang, J. J., Yuan, Z., Zhang, H., Li, Z. Q. and Zhao, B.**, 2013, Effect of cryogenic treatment and aging treatment on the tensile Properties and microstructure of Ti-6Al-4V alloy, *Materials Science Engineering*, 584:170–176 pp.
- Gu, K. X., Wang, J. J., Yuan, Z., Zhang, H., Li, Z. Q. and Zhao, B.**, 2014, Effect of cryogenic treatment on the plastic property of Ti-6Al-4V titanium alloy, *Advances in Cryogenic Engineering*, 1574, 42-47 pp.
- Gu, K., Wanga, J. and Zhou, Y.**, 2014, Effect of cryogenic treatment on wear resistance of Ti-6Al-4V alloy for biomedical applications, *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 30:131–139 pp.
- Gupta, N.K., Iqbal, M.A. and Sekhon, G.S.**, 2006, Experimental and numerical studies on the behavior of thin aluminum plates subjected to impact by blunt and hemispherical-nosed projectiles, *International Journal of Impact Engineering*, 32:1921–1944 pp.
- Gupta, N.K., Iqbal, M.A. and Sekhon, G.S.**, 2007, Effect of projectile noseshape, impact velocity and target thickness on deformation behavior of aluminum plates, *International Journal of Solids and Structures*, 44:3411–3439 pp.
- Gupta, N.K., Iqbal, M.A. and Sekhon, G.S.**, 2008, Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on the deformation behavior of layered plates, *International Journal of Impact Engineering*, 35: 37–60 pp.
- Güneş, İ., Çiçek, A., Aslantaş, K. ve Kara, F.**, 2014, Effect of deep cryogenic treatment on wear resistance of AISI 52100 bearing steel, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, (in press).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Jackson, J. M., and Ahmed, W.,** 2007, Surface engineered surgical tools and medical devices, Springer, 581p.
- Jena, P.K., Mishra, B., Kumar, S. K. and Bhat, T.B.,** 2010, An experimental study on the ballistic impact behavior of some metallic armou rmetarials against 7.62 mm deformable projectile, *Materials and Design*, 31:3308–3316 pp.
- Jiang, Y., Chen, D., Chen, Z. and Liu, J.,** 2010, Effect of cryogenic treatment on the microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy, *Materials and Manufacturing Processes*, 25:837–841 pp.
- Joshi, V. A.,** 2006, Titanium Alloys, Boca Raton CRC/Taylor Francis, 227 p.
- Leyens, C. and Peters, M.,** 2003, Titanium and titanium alloys, WILEY-VCH, 513 p.
- Mitreviski, T., Marshall, I.H. and Thomson, R.,** 2006, The influence of impactor shape on the damage to composite laminates, *Composite Structures*, 76:116-122 pp.
- Mondal, C., Mishra, B., Jena, P.K., Kumar, K.S. and Bhat, T.B.,** 2011, Effect of heat treatment on the behavior of an AA7055 aluminum alloy during ballistic impact, *International Journal of Impact Engineering*, 38:745-754 pp.
- Öz Çelik Ticaret Ltd.Şti.,** DIN 1.2550 soğuk iş takım çeliklerinin ısııl işlem şeması, i <http://ozct.com.tr/tr/urunler.asp?sno=7> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2014).
- Prieto, G., Perez Ipiña, J.E., and Tuckart, W.R.,** 2014, Cryogenic treatments on AISI 420 stainless steel Microstructure and mechanical properties, *Materials Science & Engineering*, 605:236–243 pp.
- Sandhi, D., M., Davis, R., Masih, A., Hemrom, R.D., Samual, A. and Chand, N.,** 2014, A Comparative study of the effect of thermal treatments on the mechanical behavior of tool steels, *International Journal of Current Engineering and Technology*, 4(3):1643-1648 pp.
- Sayer, M.,** 2009, Hibrit kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, PamukkaleÜniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 118s.
- Senthil, K. and Iqbal, M.A.,** 2013, Effect of projectile diameter on ballistic resistance and failure mechanism of single and layered aluminum plates, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 66-67:53-64 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Smith, W.F.**, 2001. Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri, (Çev. M., Erdoğan) Nobel Yayın Dağıtım, 2: 446-497 pp.
- Subaşı, M. ve Karataş, Ç.**, 2012. Titanyum ve titanyum alaşımlarından yapılan implantlar üzerine inceleme, *Journal of Polytechnic*, 15(2): 87-103 pp.
- Vaccari, J. A.**, 1986, Deep freeze improves products, *American Machinist Automated Manufacturing*, 130(3): 90-92 pp.
- Woodward., R. L.**, 1977, A rational basis for the selection of armour materials, *The Journal of Australian Institute of Metals*, 22:167-170 pp.
- Yıldız, Y. ve Nalbant, M.**, 2008, A review of cryogenic cooling in machining processes, *International Journal of Machine Tools Manufacture*, 48:947–964 pp.
- Yılmaz, H.**, 2008, Titanyum ve titanyum alaşımlarının yüzey özelliklerinin plazma (iyon) nitrürleme ile geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 67s.

