İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ti6Al4V TİTANYUM ALAŞIMININ İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ISIL İSLEM YARDIMIYLA ARTTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Sedat AKYOL

(503051313)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 Mayıs 2007

Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Eylül 2007

Tez Danışmanı : **Y.Doç.Dr. Mustafa BAKKAL**

Diğer Jüri Üyeleri **Y.Doç.Dr. Celalettin ERGUN (İ.T.Ü.)**

Prof.Dr. Erhan ALTAN (Y.T.Ü.)

EYLÜL 2007

ÖNSÖZ

Gün geçtikçe artan rekabet şartları firmalar için tasarım açısından fark yaratmak gereğini apaçık ortaya koymaktadır. Her alanda aynı dayanımı daha hafif yapılarla elde edebilen tasarımlar, gerek dünyamızın en büyük sorunlarından biri haline gelen küresel ısınma ve dolayısıyla enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması açısından diğer tasarımlar arasında fark yaratmaktadır. İşte bu noktada ön plana çıkan malzeme grubu titanyum ve alaşımlarıdır.

Titanyum ve alaşımlarının daha yaygın kullanılabilmesi önünde birtakım engeller bulunmaktadır. Bunların başında titanyumun pahalı bir metal olduğu olgusudur. Bunun nedenleri de çıkarılması ve işlenmesindeki yüksek maliyetlerdir. Ancak her ne kadar bu yüksek maliyetler imalatçıları bu malzemelere uzak tutsa da, iyi bir tasarım, örneğin dolu malzemeler yerine içi boş tasarımların kullanılması gibi, bu yüksek maliyetleri bir anda düşürebilecektir.

Bu tez çalışması sırasında benden bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen, her konuda içtenlikle yardımcı olmak için elinden geleni yapan, tez danışmanın Y.Doç.Dr. Mustafa BAKKAL' a; tez çalışmamda kullanılmak üzere kesici takım temininde yardımlarını esirgemeyen Y.Doç.Dr.Muzaffer ERTEN nezdinde BÖHLER Sert Maden A.Ş. firması yetkililerine; yüksek lisans çalışmam boyunca bana yeni ufuklar açan, almış olduğum derslerin hocalarına; İTÜ Makine Fakültesi Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojileri A.B.D. araştırma görevlilerinden Veli Nakşiler ve Salih Özkeseler' in nezdinde tüm araştırma görevlisi arkadaşlara ve teknisyenlere teşekkürü bir borç bilirim. Bana tüm eğitim hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmamda da maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Eylül, 2007 Sedat AKYOL

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
KISALTMALAR	**v**
TABLO LİSTESİ	**vi**
ŞEKİL LİSTESİ	**vii**
SEMBOL LİSTESİ	**x**
ÖZET	**xi**
SUMMARY	**xiii**
1. GİRİŞ	**1**
2. TİTANYUMUN TARİHİ VE ÖNEMİ	**3**
2.1. Titanyumun Bulunuşu	3
2.2. Dünyada Titanyum Endüstrisi	3
3. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ İÇYAPI ÖZELLİKLERİ	**5**
3.1. Saf Titanyum	7
3.2. Titanyum Alaşımlarının Faz Yapılarına Göre Türleri	11
3.2.1. α Alaşımları	14
3.2.2. α+β Alaşımları	15
3.2.3. β Alaşımları	16
4. TİTANYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMLERİ	**17**
4.1. Gerilim Giderme Tavlaması	20
4.2. Tavlama	22
4.3. Çözeltiye Alma ve Yaşlandırma	24
5. TALAŞLI İMALATIN MEKANİĞİ	**29**
5.1 Giriş	29
5.2. Dik Kesme Mekaniği	30
5.2.1. Birincil kayma bölgesi	34
5.2.2. İkincil kayma bölgesi	36
5.3. Takım Ömrü	38
5.4. İşlenebilirlik	38
6. TİTANYUM ALAŞIMLARININ İŞLENEBİLİRLİĞİ	**40**
6.1.Ti6Al4V Alaşımının İşlenebilirliği	40
6.1.1. Kesici takım	41
6.1.2. Kesme hızı	47
6.1.3. İlerleme	48
6.1.4. Kesme derinliği	49
6.1.5. Kesme sıvısı kullanımı	49
6.2. Sonuçlar	50

7. TİTANYUM ALAŞIMLARININ UYGULAMA ALANLARI 52
7.1. Enerji ve Kimya Sanayi 52
7.2. Uzay ve Havacılık Sanayi 54
7.3. Denizcilik Uygulamaları 55
7.4. Medikal Uygulamalar 56

8. DENEYSEL ÇALIŞMA 58
8.1. Fiziksel ve Kimyasal Özellikler 58
8.2. Isıl İşlem 61
8.3. İçyapı İncelemeleri 61
8.4. Mekanik İnceleme 62
8.5. Talaşlı İmalat 62
8.6. Pürüzlülük Ölçümleri 64

9. SONUÇLAR ve TARTIŞMA 65

10. SONRAKİ ÇALIŞMALARA TAVSİYELER 77

KAYNAKLAR 78

ÖZGEÇMİŞ 80

KISALTMALAR

CBN : Kübik Bor Nitrür (Cubic Bor Nitrur)

PCD : Çok Kristalli Elmas (Poli Crystal Diamond)

HMK : Hacim Merkezli Kübik

SDH : Sıkı Düzen Hekzagonal

HSS : Yüksek Hız Çeliği (High Speed Steel)

ABD : Amerika Birleşik Devletleri

WC : Tungsten Karbür (Wolfram Carbur)

ZSD (TTT) : Zaman Sıcaklık Dönüşüm (Time Temperature Transformation)

ELI : Ekstra Yüksek Saflık (Extra Low Impurity)

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1 **:**A.B.D‘ deki titanyum endüstrisi.....4

Tablo 3.1 **:**Ticari saflıktaki titanyum malzemelerin genel özellikleri.....7

Tablo 4.1 **:**Bazı titanyum alaşımları için önerilen gerilme giderme parametreleri.....21

Tablo 4.2 **:**Bazı titanyum alaşımları için önerilen tavlama parametreleri.....23

Tablo 4.3 **:** Bazı titanyum alaşımlarının çözeltiye alma ve yaşlandırma parametreleri.....26

Tablo 4.4 **:**α+β alaşımlara uygulanan ısıl işlemler ve oluşan mikro yapılar.....27

Tablo 6.1 **:**Titanyum ve alaşımlarının karakteristik özelliklerinin kesici takıma etkisi.....42

Tablo 6.2 **:**Titanyum alaşımlarının işlenmesinde çeşitli takımların performansı.....46

Tablo 6.3 **:**Titanyumun işlenmesinde kullanılan tipik kesme parametreleri.....48

Tablo 8.1 **:**Ti6Al4V alaşımının fiziksel özelliklerinin karşılaştırmalı özeti...58

Tablo 8.2 **:**Ti6Al4V alaşımına ait bazı mekanik özellikler.....60

Tablo 9.1 **:** Sertlik değerleri.....68

Tablo 9.2 **:**Normal kuvvet F_v, sürtünme kuvveti F_u, sürtünme katsayısı μ ve özgül kesme enerjisi u_s değerleri.....71

Tablo 9.3 **:** Ortalama yüzey pürüzlülük değerleri.....72

Tablo 9.4 **:** Gömülmüş talaş kesit fotoğrafları.....72

Tablo 9.5 **:** Talaş formları.....73

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1 **:**Çeşitli metallerin özgül mukavemet sıcaklık değişimi.....1

Şekil 3.1 **:**Kalay, Alüminyum Molibden ve Manganın Titanyum ile faz diyagramaları.....6

Şekil 3.2 **:**Eşeksenli ve iğnesel içyapı örneği.....8

Şekil 3.3 **:**HMK kafes yapısının SDH kafes yapısına dönüşümü.....9

Şekil 3.4 **:**Martenzitik α yapısı.....9

Şekil 3.5 **:**İğnesi α oluşumu (Widmanstatten yapısı oluşumu) (a), bir düzlemden (b) birçok düzlemden.....10

Şekil 3.6 **:**Widmanstatten yapısının oluşumu.....11

Şekil 3.7 **:**α ve β faz yapılarının özellikler üzerindeki etkileri.....13

Şekil 3.8 **:**α Titanyum alaşımının tavlanması(a), hızlı soğutma sonrası iğnemsi iç yapı(b), yavaş soğutma sonrası plakalı iç yapı(c).....14

Şekil 3.9 **:**α+β titanyum alaşımının tavlanması (a), yavaş soğutma sonrası eşeksenli iç yapı (b), hızlı soğutma sonrası iç yapı (c).....15

Şekil 4.1 **:**Ti6Al4V alaşımı için temsili faz diyagramı.....18

Şekil 4.2 **:**Ti6Al4V nin havada soğutularak elde edilen yapısı.....18

Şekil 4.3 **:**Ti6Al4V alaşımına su verilerek martenzit yapı oluşumu(a), yaşlandırma sonrası yapı(b).....19

Şekil 4.4 **:**Sıcak işlenmiş ve tavlanmış Ti6Al4V alaşımı.....19

Şekil 4.5 **:**Ti6Al4V alaşımına ait Zaman-Sıcaklık- Dönüşüm diyagramı.....28

Şekil 5.1 **:** Tornalama geometrisi.....29

Şekil 5.2 **:** Dik ve Eğik kesme geometrileri.....30

Şekil 5.3 **:** Deformasyon bölgeleri ve talaş kenarında dağılımı.....31

Şekil 5.4 **:** Talaş oluşum evresinin başlangıcında ve sonunda talaş durumu ve mikroyapı fotoğrafları.....32

Şekil 5.5 **:** Dik kesme mekaniği 33

Şekil 6.1 **:**Parçalı talaş oluşumuna ait evreler.....43

Şekil 6.2 **:**Sürekli/testere dişli talaş oluşumu evreleri.....43

Şekil 6.3 **:**Sürekli/testere dişli talaşın profili.....44

Şekil 6.4 **:**Ti6Al4V için kesme hızı kesme kuvveti ilişkisi.....44

Şekil 6.5 **:**Titanyumun işlenmesinde baskın olan aşınma tipleri.....45

Şekil 6.6 **:**Serbest yüzey aşınması (a), Takım örü (b).....45

Şekil 6.7 **:**Kesme hızı-ilerleme-takım ömrü ilişkisi.....47

Şekil 6.8 **:**Sıvı azotun sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi.....50

Şekil 7.1 **:**Tabaka tipi ısı değiştirici.....52

Şekil 7.2 **:**Buhar türbini bıçakları.....53

Şekil 7.3 **:**Enerji tesisleri için kondanser.....53

Şekil 7.4 **:**Kimya sanayi için ısı değiştirici.....53

Şekil 7.5 **:**V2500 turbofan motoru.....54

Şekil 7.6 **:**Buhar türbini bıçakları.....54

Şekil 7.7 **:**Roketlerde kullanılan yakıt tankı 55

Şekil 7.8 **:**Denizaltı araçların basınca dayanıklı dış kabukları.....55

Şekil 7.9 **:**Balık çiftlikleri.....56

Şekil 7.10 **:**Deniz kenarı korkuluklarında.....56

Şekil 7.11 **:**Çeşitli protez parçaları.....57

Şekil 8.1 **:** Ti6Al4V alaşımına ait Zaman-Sıcaklık- Dönüşüm diyagramı....59

Şekil 8.2 **:** Ti-6Al-4V alaşımına ait mikro yapı fotoğrafı.....60

Şekil 8.3 **:** Kesme deneylerinde kullanılan CNC Torna.....62

Şekil 8.4 **:** Deney düzeneği.....63

Şekil 8.5 **:**Takım tutucuya ait bilgiler.....64

Şekil 9.1 **:** 750 ºC de 4 saat tutulduktan sonra fırın ortamında 25 ºC ye

dek soğutulmuş deney numunesi (a), [4] nolu kaynaktan alınan ve 750 ºC de 4 saat tutulduktan sonra fırın ortamında 25 ºC ye dek soğutulmuş Ti-6Al-4V mikro yapısı (b).....65

Şekil 9.2 **:** 955 ºC 'de 1 saat tutulduktan sonra suda su verilmiş deney numunesi (a), [4] nolu kaynaktan alınan ve 955 ºC de 1 saat tutulduktan sonra suda su verilmiş Ti-6Al-4V mikro yapısı (b).....66

Şekil 9.3 **:** 955ºC den su verilmiş yapının 550ºC de 4 saat süre ile yaşlandırılması sonucu oluşan mikro yapısı.....66

Şekil 9.4 **:** Belirli sıcaklıklardan su verilmiş Ti-6Al-4V alaşımının yaşlandırma süresi (540 ºC 'de) ile sertlik ilişkisi grafiği.....67

Şekil 9.5 **:** Teğetsel kuvvetlerin kesme parametreleri ve ısıl işlemler etkisi ile değişimleri.....69

Şekil 9.6 **:** İlerleme kuvvetlerinin kesme parametreleri ve ısıl işlemler etkisi ile değişimleri. 70

Şekil 9.7 **:** Talaş formlarının sınıflandırılması.....74

Şekil 9.8 **:** Talaş SEM fotoğrafları (a) Tavlanmış numuneden alınan talaş, (b) Su verilmiş numuneden alınan talaş, (c)Su verilmiş ve yaşlandırılmış numuneden alınan talaş.....75

Şekil 9.9 **:** Takım uçlarına ait SEM fotoğrafları (a) kullanılmamış takım, (b) Tavlanmış Ti6Al4V işlenmesinde kullanılan takım, (c) Su verilmiş ve yaşlandırılmış Ti6Al4V işlenmesinde kullanılan takım.....76

SEMBOL LİSTESİ

α, β **:** Faz yapıları
F_t **:** Teğetsel kuvvet
F_f **:** İlerleme kuvveti
F_r **:** Radyal kuvvet
i **:** Eğim açısı
τ_s **:** Kayma gerilmesi
σ_s **:** Normal gerilme
φ_c **:** Kayma açısı
β_a **:** Ortalama sürtünme açısı
α_r **:** Talaş açısı
R_a **:** Yüzey pürüzlülüğünün aritmetik ortalaması

Ti6Al4V TİTANYUM ALAŞIMININ İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ISIL İŞLEM YARDIMIYLA ARTTIRILMASI

ÖZET

Enerji tüketiminin artıp, çevre bilincinin arttığı günümüzde, modern dünyanın tasarım mühendislerinden beklentileri de bu yöndeki ihtiyaçlara cevap verebilen ürünler yönünde olmaktadır. Günümüz araçlarının daha az yakıt tüketmesi ve çevreye duyarlı olması amacıyla geliştirilen yeni üretim tekniklerinin yanında kullanılan malzemenin uygun seçimi de kritik bir öneme sahiptir. Titanyum ve alaşımları sahip oldukları yüksek dayanım ve düşük yoğunluk değerleriyle günümüz imalat teknolojisinin en yoğun kullandığı malzeme gruplarından biri olmuştur. Titanyum alaşımlarının aynı zamanda yüksek korozyona dayanımı, düşük ısı iletimi ve insan vücuduyla uyumlu yapısı bu malzemeyi daha da cazip hale getirmektedir. Metalin yüksek özgül dayanımı ve yüksek sıcaklıklardaki özellikleri de diğer metallere karşı üstünlük göstermektedir. Bu da jet motorları, uçak gövdesi ve füzeler gibi uçak- uzay uygulamalarında ve yüksek sıcaklıklarda çalışan sistemlerde titanyumu tercih nedeni kılmaktadır.

Titanyum allotropik özellik gösteren bir malzeme olduğundan, iç yapısında farklı sıcaklıklarda farklı kristal yapıları elde edilebilmektedir. Alfa adı verilen faz sıkı düzen hekzagonal yapıda olup beta adı verilen diğer faz hacim merkezli kübik yapıdadır. Saf titanyum 885^{o} C 'ye kadar kararlı alfa fazına sahiptir ve bunun üzerindeki sıcaklıklarda beta fazına dönüşüm başlamaktadır. Titanyum alaşımlarının bir türü olan alfa-beta alaşımları ısıl işleme ve kaynaklı imalata yatkındır. Ancak titanyumdan yüzey kalitesi yüksek parçalar üretebilmek için kullanılan talaşlı imalatla üretiminde bazı zorluklar yaşanmaktadır. Bunların en başında malzemenin çok düşük (17 W/m-°K) olan ısı iletim katsayısı, reaktifliği ve düşük elastiklik modülü (116 GPa) yer almaktadır. Özelikle düşük ısı iletkenliği titanyumun kesme sırasında yumuşayarak kesici takıma sıvanmasına, takım talaş yüzeyindeki ısının 900°C' nin üzerine çıkmasına neden olmaktadır. Bunun sonucu olarak aşınan takım, üzerinde biriken gerilmeyi taşıyamaz ve ani olarak kırılır.

Gün geçtikçe kullanımı artan titanyum ve alaşımlarının talaşlı işlenebilirliğinin araştırıldığı bu çalışmada, en geniş kullanım alanına sahip titanyum alaşımı olan Ti6Al4V alaşımının işlenebilirliğinin değişik ısıl işlemler kullanılarak arttırılması hedeflenmiştir. Bu alaşıma ait 16 mm çapındaki çubuk şeklindeki malzemeler tavlama, su verme ve yaşlandırma olmak üzere 3 değişik ısıl işleme tabi tutulmuş ve böylece 3 farklı iç yapı elde edilmiştir. Bu 3 farklı iç yapının herbiri tornalama yöntemi ile aynı kesme parametreleri kullanılarak kuru kesme şartlarında işlenmiş ve işlenebilirliğin belirleyicisi olan kesme kuvvetleri, talaş formu, takım ömrü ve yüzey kalitesi parametreleri ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler literatürle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak tavlanmış numuneye ait işlenebilirlik kriterleri ile yaşlandırılmış numuneye ait kriterler iç yapılarının tamamen farklı olmasına rağmen birbirine oldukça yakın çıkmıştır.

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON MACHINABILITY OF Ti6Al4V ALLOY

SUMMARY

The properties and characteristics which are important to design engineers are; excellent corrosion resistance, superior erosion resistance, heat transfer efficiency, superior strength-to-weight ratios. The combination of high strength and low density results in favorable strength-to-weight ratios for titanium based alloys. These ratios and ability to withstand extremes of temperature for titanium based alloys are superior to almost all other metals. This is why titanium alloys have priority in material selection for aerospace applications and high temperature applications such as airframes, jet engine parts, missiles. Titanium can exist in two crystal forms. The first is alpha which has a hexagonal close- packed crystal structure. In alloyed titanium, the alpha phase is stable at all temperatures up to 885^{o} C where it transforms to the beta phase. Alpha-Beta allloys are heat treatable and most are weldable.

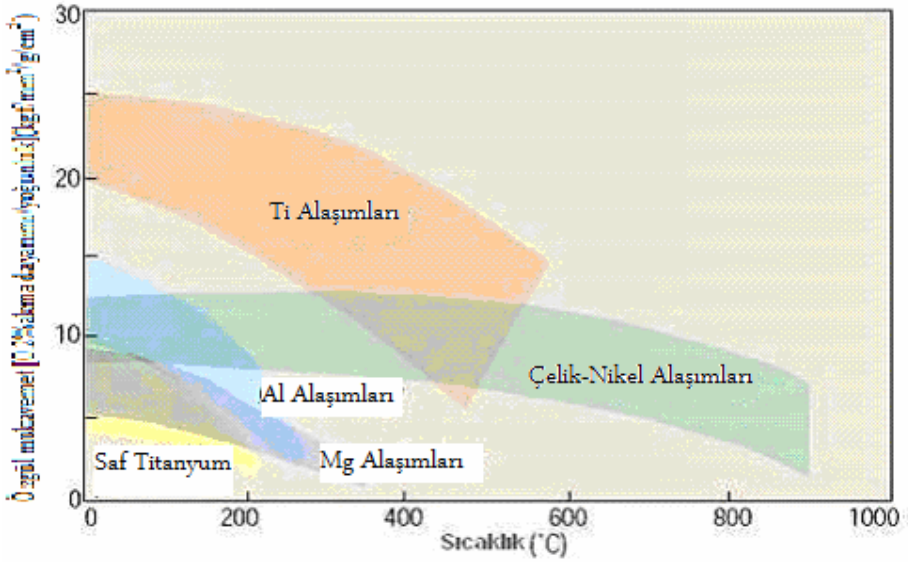
Despite these features, the utilisation of titanium alloys is still limited due to their poor machinability. In fact, the titanium low thermal conductivity hinders the evacuation of the heat generated during the cutting process resulting in a temperature rise of the work-piece. Furthermore the high chemical reactivity increases with temperature and produces an early damage of the cutting tool affecting the surface quality and increasing production costs.

Machinability of Ti6Al4V titanium alloy, which has an increasing application field in industry day-by-day, was investigated by applying different heat treatments to alloys. 16 mm diameter bar shaped specimens were used to anneal, solution treatening and solution treatening and aging applications. After heat treatment operations we had 3 different micro structures. These 3 different micro structural specimens were turned at the same parameters on dry cutting conditions. Cutting forces, chip morhpology, tool life and surface roughness were collected as machinability criterias and compared with literatures. As a result, annealed alloy and aged alloy machinability criterias were very similar despite the micro structures were completely different.

1. GİRİŞ

Sanayide 1950'lerden bu yana kullanılan titanyumun yoğunluğu demirin yoğunluğunun yaklaşık yarısı (4.54 g/cm^3), ısıl iletkenliği demirinkinin yaklaşık beşte biri (15.7 W/m.K), ergime sıcaklığı demirinkinden yaklaşık 130 ^oC yüksektir (1668 ^oC). Titanyum, özellikle karbon ve oksijene olmak üzere, birçok elemente karşı yüksek reaksiyon eğilimi olan bir malzemedir. Bu sebeple, karbona maruz kalması sonucu titanyumun kolayca gevrekleşeceği; ısının yükseldiği ve oksijence zengin bir ortamda titanyum talaşlarının kolayca tutuşabileceği ve iş parçasının neredeyse tüm takım malzemeleri ile reaksiyona girerek kimyasal tabanlı aşınmalara yol açacağı söylenebilir. Bu özellikleri titanyumun işlenebilirlik yönünü dikkate alanlar için önem kazanmaktadır[9].

Titanyumun ilk olarak ve en çok kullanıldığı uçak endüstrisinde, malzemenin yukarıda bahsedilen özellikleri sayesinde kritik bölgelerde ağırlık, mukavemetten ödün verilmeden, korozyon direnci de sağlanacak şekilde azaltılabilmektedir. Sonuçta yakıt tüketimi azaltılmakta, dolayısıyla menzil arttırılmaktadır. Bu da işletme maliyetlerini azaltıcı bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 1.1 'de yaygın kullanılan bazı metallerin özgül mukavemet değerlerinin sıcaklık karşısındaki değişimi gösterilmektedir[4].



Şekil 1.1 Çeşitli metallerin özgül mukavemet sıcaklık değişimi[15].

Titanyumun çeşitli kimyasal maddelerin korozif etkilerine karşı dayanımı, işletme maliyetleri açısından kazanç sağlamaktadır. Örneğin, titanyumun petro-kimya tesislerinde kullanılması, içerisinde yüksek miktarda hidrojen-sülfür bulunan ham petrolün daha düşük bakım maliyetleri ile işlenmesine olanak vermektedir. Buna benzer çoğu uygulamada ağır, onarımı daha güç ve maliyeti yüksek malzemelerin yerini titanyum ve alaşımları almıştır[2].

Sonuç olarak titanyum ve alaşımları, mühendislik uygulamalarında gün geçtikçe artan bir kullanım alanına ulaşırken diğer yandan da günlük hayatımıza da çeşitli şekillerde son ürün olarak girmiş bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında önemi ve kullanım alanı gittikçe artan titanyum alaşımlarının genel özelliklerinden bahsedilmiş, bunların içinde en büyük kullanım alanına sahip olan Ti6Al4V titanyum alaşımının özellikleri vurgulanarak işlenebilirliği üzerinde durulmuştur. Deneysel çalışma sonuçları değerlendirilmiş ve literatürle karşılaştırılmıştır.

2. TİTANYUMUN TARİHİ VE ÖNEMİ

2.1. Titanyumun Bulunuşu

1791 yılında İngiliz araştırmacı ve mineralojist William Gregor titanyumu keşfetti. Şimdi ilmenit olarak bilinen ve titanyum metalinin elementi olan, kara tuz olarak adlandırdığı maddeyi Helford bölgesindeki bir nehirden elde etmeyi başardı. Bu tuzu manyetik etki altında demirden ayrıştırmayı ve HCL ile dağlayarak yeni bir elementin oksidini elde etmeyi başaran Gregor, buna mekanit ismini verdi. Bundan 4 yıl sonra, Alman kimyager Martin Heinrich Klaproth, titanyum oksidi rutil adı verilen bir mineralden tamamen bağımsız hale getirmiş ve adını Yunan Mitolojisi' nden esinlenerek Titanyum koymuştur. [2]

Titanyumun eriyik halde oksijen ve azota olan ilgisi nedeniyle saf olarak elde edilmesi o günün şartlarında zordu. Sonunda, titanyumun babası olarak kabul edilen, Wilhelm Justin Kroll, 1932 yılında TiCl4 ü Ca ile birleştirerek saf titanyumu elde etmeyi başardı. Daha sonra 2.Dünya savaşının patlak vermesiyle birlikte Amerika'ya yerleşti ve burada Dupont Firması Kroll yöntemini kullanarak ilk kez ticari olarak titanyumu üretti. Bugün, başta uzay ve uçak sanayi olmak üzere titanyum ve alaşımlarını, kimya, tıp, güç üretimi, denizcilik, spor aletleri ve taşımacılık sektörleri yaygın olarak kullanmaya başlamıştır [1].

Titanyum dünyada yapısal olarak kullanılan metaller arasında alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra 4.sırada yer alırken en çok rezervi olan metaller sıralamasında da 9. sırada yer almaktadır. Ancak titanyum saf olarak bulunmamakla beraber saf hale getirme işlemleri bu metali pahalı kılmaktadır [3].

2.2. Dünyada Titanyum Endüstri

Yüksek özgül mukavemet, ısıl direnci, korozyon direnci ve diğer olumlu özelliklerinin birleşimi nedeniyle çok geniş bir kullanım alanına sahip olan titanyumun ve alaşımlarının çeşitli sanayilerde uygulamaları mevcuttur [4].

Titanyum ve alaşımlarının en büyük kullanımı şüphesiz ki uzay sanayinde gerçekleşmektedir. Bunun yanında son on yıllık dönemde; kimyasal makine imalatında, gemi yapımında, otomotiv endüstrisinde, yağ ve gaz endüstrisi

ekipmanlarının imalatında, gıda sanayinde, tıp uygulamalarında ve sivil mühendislik uygulamalarında titanyum ve alaşımlarının kullanım oranı hızla artmaktadır. Tablo 2.1' de A.B.D deki titanyum endüstrisinin dağılımını gösteren en güncel verileri içermektedir[2].

Tablo 2.1 A.B.D' deki titanyum endüstrisi[2].

Uygulama Alanı	Yüzde %
Ticari uçak jet motoru	31
Askeri uçak jet motorları	20
Ticari uçak iskeleti	15
Askeri uçak iskeleti	10
Uzay roketi	7
Helikopter ve teçhizatları	1
Diğer sanayi dalları	16

Havacılık uygulamaları için, titanyum ve alaşımlarının en ilgi çekici özellikleri arasında, yüksek özgül dayanımı ve yüksek ısıl direnci ter almaktadır. Diğer sanayi dalları için ise bunlara ek olarak yüksek korozyon direnci gösterilebilir.

Titanyum alaşımlarının ticari uygulamalar bazında en büyük dezavantajı yüksek yarı mamul maliyetedir. Bu maliyet yüksekliğinin nedenleri arasında; çıkarılma ve ayrıştırılma sırasında karmaşık proseslere ihtiyaç duyulması, yoğun olarak bulunmama ve bu nedenle tesis yatırımlarını yeteri kadar karşılayamaması, son olarak da işleme maliyetlerinin yüksekliği sıralanabilir [10].

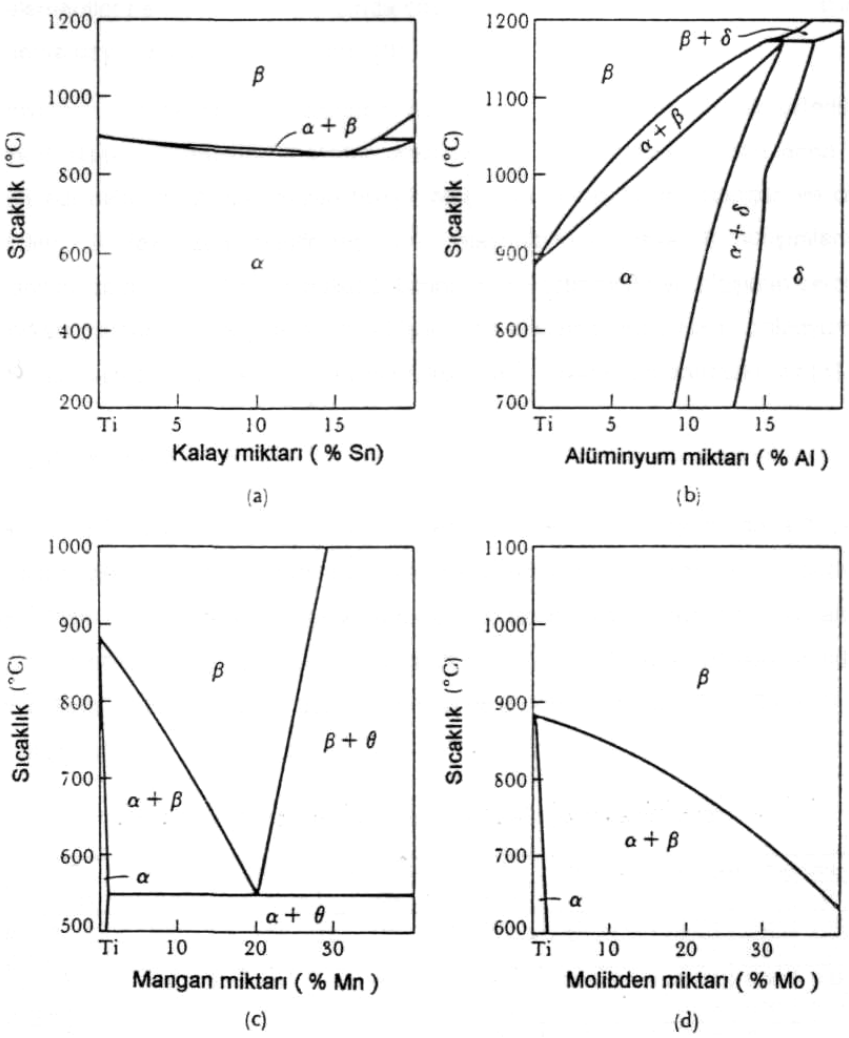
3. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ İÇYAPI ÖZELLİKLERİ

Titanyum allotropik karakterde bir malzeme olup, oda sıcaklığındaki sıkı düzen hekzagonal (SDH) kristal yapıdaki α fazı, saf titanyum için yaklaşık 885 ^{o}C de hacim merkezli kübik (HMK) yapıdaki β fazına dönüşmektedir. Bu sıcaklık "β dönüşüm sıcaklığı" adını almaktadır. Oksijen, azot ve karbon gibi α fazını kararlı kılan elementlerin etkisiyle bu sıcaklık yükselirken, metal kalıntılar veya alaşım elementlerinin etkisiyle düşmekte ya da yükselebilmektedir[9].

Alaşım elementlerinin ilavesi bu dönüşüm sıcaklığını ikiye bölmektedir. Altındaki sıcaklıklarda tüm alaşımın α fazında olduğu sıcaklığa "α dönüşüm sıcaklığı"; üstündeki sıcaklıklarda tüm alaşımın β fazında olduğu sıcaklığa "β dönüşüm sıcaklığı" denilmektedir. Bu iki dönüşüm sıcaklığı arasında malzemenin mikro yapısında hem α hem de β fazı bulunmaktadır[9].

Alüminyum, galyum, germanyum, karbon, oksijen ve azot gibi alaşım elementleri titanyum kristal yapısındaki α fazını daha kararlı hale getirerek α-β dönüşüm sıcaklığını da yükseltmektedir. β fazını kararlı hale getirerek bu iki dönüşüm sıcaklığını düşüren iki grup element vardır. Bunlardan "izomorf grup"; β fazı içerisinde tamamen çözünebilen molibden, vanadyum, tantal ve kolombiyum elementlerinden oluşmaktadır. Diğer grup ise titanyumla ötektoid alaşımlar yapan elementlerdir ve ötektoid sıcaklıkları saf titanyumun dönüşüm sıcaklığının 333 ^{o}C kadar altındadır. "Ötektoid grup"; mangan, demir, krom, kobalt, nikel, bakır ve silisyum gibi elementleri içermektedir. Bu elementler α fazında düşük çözünürlüğe sahiptir ve dönüşüm sıcaklığını düşürmektedir. Gerek β fazını karalı hale getirmek için, gerekse yüksek sıcaklıklarda kullanımda görülen metaller arası bileşiklerin oluşumunu azaltmak ya da önlemek için bu β-izomorf grup elementleri alaşım içine katılmalıdır[2].

Bu noktada β-izomorf grup elementlerinden molibdenin, ötektoid gruptan manganın ve α fazını kararlılaştıran kalay ve alüminyumun; titanyum ile oluşturdukları faz diyagramları şematik olarak Şekil 3.1' de gösterilmektedir[1].



Şekil 3.1 Kalay, Alüminyum, Molibden ve Manganın Titanyum ile faz diyagramaları[7]

Zirkonyum ve hafniyum, hem α hem de β fazı içinde izomorf olan iki elementtir ve bu yüzden titanyumun kardeşleri olarak isimlendirilmektedir. Kalay ve alüminyum da hem α hem de β fazı içinde önemli bir çözünürlüğe sahiptir. Alüminyum, kalay ve zirkonyum; α ve süper-α titanyum alaşımlarında genellikle birlikte kullanılırlar. Bu elementler α+β alaşımlarında α ve β fazları içine yaklaşık olarak eşit olarak dağılmaktadır. β alaşımlarında ise β fazını daha kararlı ve dayanıklı hale getirirken, dönüşüm özelliklerini düzenlemektedir. Hemen hemen tüm ticari titanyum alaşımları bu elementlerde bir ya da daha fazlasını içermektedir. Çünkü bu elementler hem α hem de β fazında çözünebilmekte ve kısmen de olsa α fazında sürünme dayanımını arttırmaktadırlar[3].

Titanyumun β fazında, α fazından daha fazla element çözünebilmektedir. β izomorf alaşım elementleri metaller arası bileşik oluşturmadıklarından daha çok tercih edilmektedir. Ancak bazen bileşik oluşturan demir, krom, mangan ve diğer metaller, β fazı zenginleştirilmiş α+β alaşımlarında veya β alaşımlarında kullanılmaktadır. Çünkü bu metaller β fazını kararlılaştırmakta ve alaşımın sertliğini artırırken malzemeye uygulanacak ısıl işlemi de etkilemektedir. Nikel, paladyum ve molibden bazı ortamlarda saf titanyumun korozyon dayanımını artırmaktadır[3].

3.1. Saf Titanyum

% 99.5 - % 98.635 oranında titanyum içeren ticari saflıktaki titanyum, daha önce de belirtildiği gibi oda sıcaklığında sıkı düzen hekzagonal yapıda, yani α fazındadır ve 885 °C' de hacim merkezli kübik yapıdaki β fazına dönüşmektedir. Ancak bu dönüşüm sırasında her iki fazın da bir arada bulunduğu küçük bir sıcaklık aralığı da vardır. Farklı kalitelerdeki saf titanyumların α ve β dönüşüm sıcaklıkları Tablo 3.1' de verilmiştir[5].

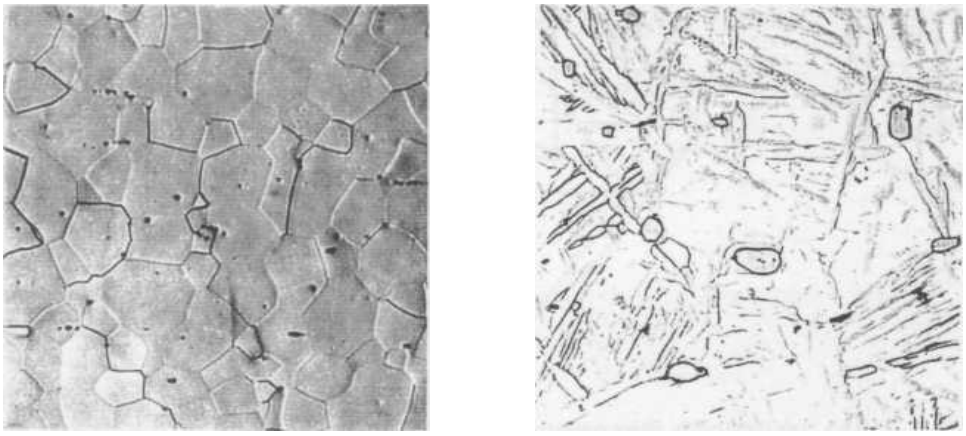
Tablo 3.1 Ticari saflıktaki titanyum malzemelerin genel özellikleri[1]

ASTM Standardı	Akma Day.(MPa)	Çekme Day.(MPa)	Dönüşüm Sıcaklıkları (°C)		Katışkı Elementten (max % ağırlıkça)				
			Alfa	Beta	N	C	H	Fe	O
Grade1	170	240	888	880	0.03	0.10	0.015	0.20	0.18
Grade2	280	340	913	890	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25
Grade3	380	450	920	900	0.05	0.10	0.015	0.30	0.35
Grade4	480	550	950	905	0.05	0.10	0.015	0.50	0.40
Grade7	280	340	913	890	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25

Ticari saflıktaki titanyum, genellikle yüksek dayanım gerektirmeyen ancak korozyon dayanımının ön planda olduğu uygulamalarda tercih edilirler. Akma dayanımı Tablo 3.1' de görüldüğü gibi kimyasal içeriğine bağlı olarak akma dayanımı 170 MPa ile 480 MPa arasında değişen birçok saf titanyum malzeme vardır. Oksijen ve demir, bu malzemelerde öncelikli olarak bulunan katışkı elementleridir. Tablodan da görülebileceği gibi demir ve oksijen içeriği arttıkça malzemenin dayanımı da artmaktadır[1].

Oda sıcaklığındaki alaşımsız titanyumun içyapısı % 100 α fazındadır. Yabancı elementlerin ve özellikle de demir miktarı arttıkça, içyapısında ve tane sınırlarında küçük fakat artan oranlarda β fazına rastlanır. Tavlanmış alaşımsız titanyumun içyapısı, eşeksenli (equiaxed) veya iğnesel (acicular) olabilmektedir. İğnesel α fazının oluşumu, β fazından α fazına dönüşüm sırasında uygulanan soğumaya bağlıdır. Soğutma hızı arttıkça iğnesel α plakalarının genişliği azalır. Eşeksenli α ise

yeniden kristalleşme tavlaması görmüş malzemelerde ortaya çıkmaktadır. İçyapıda iğnesel α fazının görülmesi, malzemenin β dönüşüm sıcaklığı üzerine dek ısıtıldığını da göstermektedir. Şekil 3.2' de eşeksenli ve iğnesel içyapının birer görüntüsü verilmektedir[2].

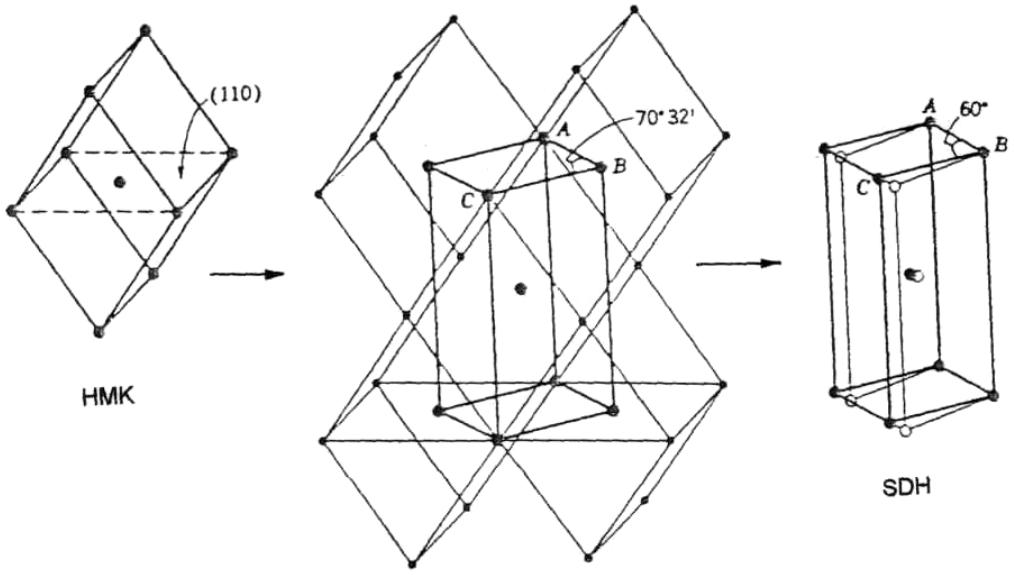


(a) (b)

Şekil 3.2 Eşeksenli (a) ve iğnesel (b) içyapı örneği[2]

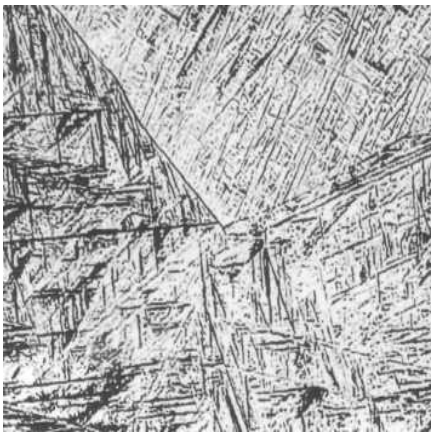
Titanyum ve alaşımlarının içyapısında en çok rastlanan eşeksenli ve iğnesel yapı birbirinden farklı özellikler taşımaktadır. Örneğin eşeksenli tane yapısına sahip alaşımlar; yüksek süneklik ve dayanım, yüksek şekillendirme kabiliyeti ve çatlak dayanımı, sıcak tuz banyolarında gerilmeli korozyona karşı yüksek direnç gösterirken iğnesel tane yapısına sahip alaşımlar; mükemmel bir sürünme direnci, yüksek kırılma tokluğu, çatlak oluşum eğiliminde azalma, gerilmeli korozyona karşı mükemmel direnç ancak bunlara karşın mukavemette küçük oranlarda azalma göstermektedir[6].

β fazından yapılacak hızlı soğutmanın, β fazının α fazına dönüşümünü bastırabileceği ve içyapının kararsız olmakla birlikte oda sıcaklığında β olarak kalabileceği bir an için beklenebilmektedir. Ancak saf titanyumda soğutma hızı ne olursa olsun α fazının oluşumunu engellemek olanaksızdır. β fazından α fazına dönüşüm sırasında kimyasal içerik değişmemekte ancak kristal yapı değişmektedir. Bu oluşum aşırı doymuş bir yapı olan martenzitik dönüşümü beraberinde getirmektedir. Şekil 3.3' de HMK β fazının SDH α fazına martenzitik dönüşümü şematik olarak gösterilmektedir[12].



Şekil 3.3 HMK kafes yapısının SDH kafes yapısına dönüşümü[12]

Martenzitik yapıdaki α, β fazının difüzyonsuz dönüşümü sonucu oluşan kararsız ve aşırı doymuş bir α yapısıdır. İğnemsi görünümlü çeliklerdeki martenzit oluşumuna benzerdir ancak bu yapıyı daha eğri yüzeylere sahip olan iğnemsi α fazından ayırt etmek çoğu zaman zordur. Ancak iğnemsi α fazının daha yuvarlak kenarları ve martenzitik α fazının düz kenarları olduğu söylenebilir. Martenzitik α yapısının bir içyapı örneği Şekil 3.4' te görülmektedir[14].

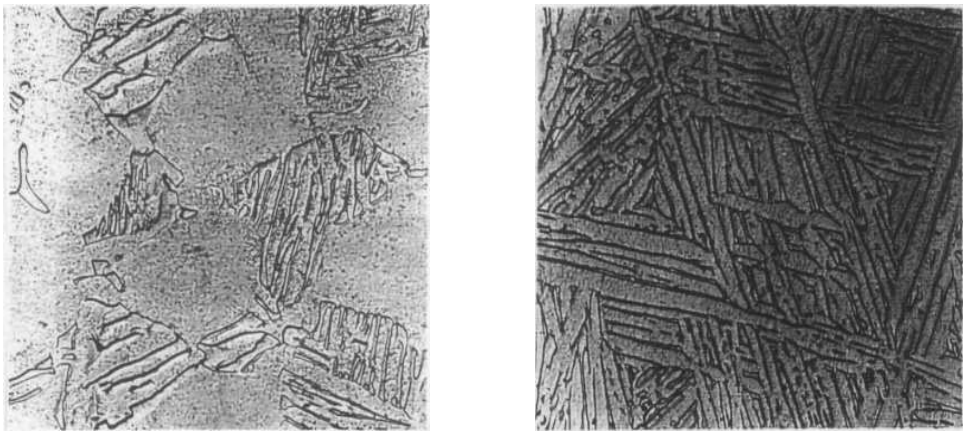


Şekil 3.4 Martenzitik α yapısı[3]

Isıl işlem görmüş titanyum ve alaşımlarının içyapısında β fazından dönüşmüş α fazları bulunmakla beraber, ısıl işlem öncesinden kalan fazlarına da rastlanmaktadır

ki bunlara "birincil α" (primary α) denilmektedir. Sonradan dönüşmüş α fazları farklı yapılarda karşımıza çıkabilmektedir. Bunlara tırtıllı, iğnemsi, plak, Widmanstatten, veya martenzit yapılar denilmektedir. "Dönüşmüş β" ifadesi bu çeşitli α yapıları ile oda sıcaklığında kalan herhangi bir β yapısı için kullanılmaktadır. İğnemsi alfa ve Widmanstatten α aslında aynı yapıyı ifade eden terimlerdir[10].

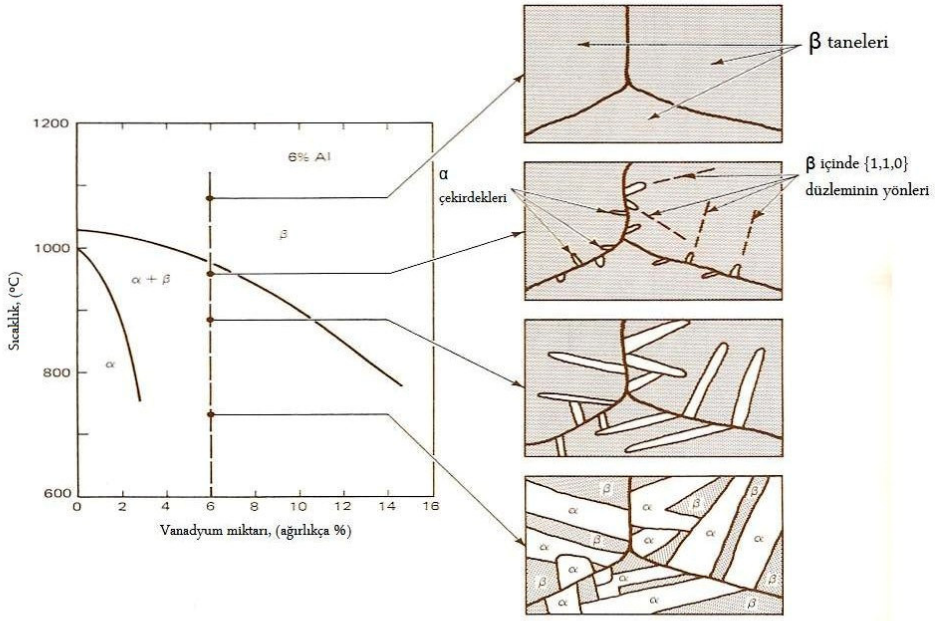
Soğutma sırasında β fazından dönüşen en yaygın içyapı daha önce de bahsedilen iğnemsi α olmaktadır. Bu yapıyı; β matrisinde bir düzlem içinde veya birçok düzlem içinde çekirdeklenerek büyüyen α taneleri oluşturmaktadır. Şekil 3.5 (a)'da bir düzlem içinden ve Şekil 3.5 (b)'de birçok düzlem içinden iğnemsi α oluşumu (Widmanstatten) görülmektedir[11].



(a) (b)

Şekil 3.5 İğnesi α oluşumu (Widmanstatten yapısı oluşumu) (a) bir düzlemden (b) birçok düzlemden[3]

İğnemsi α'nın, bir başka deyişle Widmanstatten yapısının oluşumunu Şekil 3.6' da görüldüğü gibi şematize etmek de mümkündür. Şekilde örnek olarak gösterilen Ti6Al4V alaşımının β fazından itibaren soğutulması esnasında, içyapıda büyümeye başlayan α taneleri, β taneleri içerisinde atomların en yoğun olarak bulunduğu [1,1,0] düzleminde ilerlemektedir. Böylece Widmanstatten formunda bir dönüşmüş β fazı ortaya çıkmaktadır[2].



Şekil 3.6 Widmanstatten yapısının oluşumu[2]

3.2. Titanyum Alaşımlarının Faz Yapılarına Göre Türleri

Titanyum alaşımları, α , α+β alaşımları ve β alaşımları olmak üzere başlıca üç grupta toplanabilmektedir. α alaşımlarının tüm yapısını α fazı oluştururken, β alaşımlarının yapısında büyük ölçüde β fazı bulunmaktadır ve bu yapıya çözündürme sıcaklığından itibaren soğutarak ulaşılabilmektedir. α+β alaşımları ise oda sıcaklığında hem α hem de β fazını içermektedir. Yapısında β fazından çok daha fazla α fazı içeren alaşımlara da near-alpha alaşımlar denilmektedir, "süper-alfa" veya "lean-beta" isimleri de bu alaşımlar için kullanılabilmektedir[7].

α alaşımlarının temel alaşım elementi alüminyumdur ancak bazı α alaşımlarında ve çoğu ticari titanyum alaşımlarında küçük miktarlarda β fazını kararlaştıran elementler de bulunmaktadır. Benzer şekilde, β alaşımları da yapısında malzemenin dayanımını artıran küçük miktarlarda α fazını kararlaştıran elementler bulundurmaktadır[9].

Bunların yanı sıra titanyum içerisinde çözünen hidrojen, oksijen, karbon ve azot gibi katışkıların mekanik özelliklere önemli ölçüde etki ettiği de bir gerçektir. Hidrojen, azot ve oksijen titanyum içerisinde yüksek çözünürlüğe sahiptir ancak güçlü karbür oluşturma etkisinden dolayı karbonunki düşüktür[9].

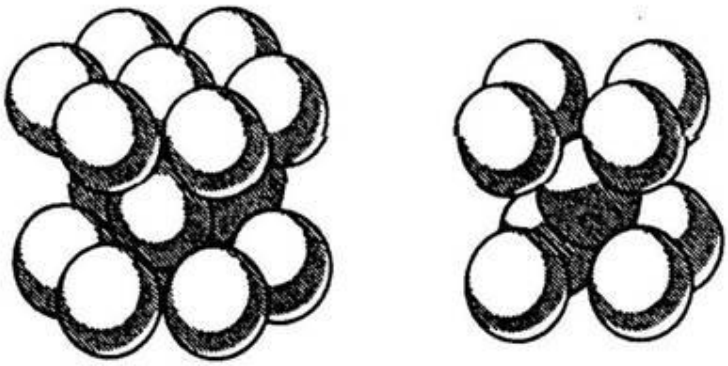
Hidrojen, en küçük atomlu element olduğundan titanyum içerisine düşük sıcaklıklarda dahi kolaylıkla nüfuz edebilmektedir. Böylece su buharı, bazı asitler veya hidrokarbon içeren ortamlarda sıcaklığın artmasıyla titanyum içine hidrojen absorbe edebilmektedir. Titanyum içerisindeki hidrojen malzemenin sünekliğini düşürmekte, çentiklere karşı daha duyarlı hale getirmekte ve sonuçta gevrekleştirmektedir. Bu durumun ortadan kaldırılması için yeterli vakum atmosferinde titanyumu tavlamak gerekmektedir[12].

Oksijen ve azotun titanyum üzerinde dayanımı artırıcı etkisi vardır. Titanyum içerisine % 0.3 oranına kadar yapılacak karbon ilavesi de dayanımı oldukça artırmaktadır ancak bu orandan fazla yapılan ilavenin bir etkisi olmamaktadır[10].

Saf titanyumdaki oksijen, azot, karbon ve demir içeriğine bakılarak malzemenin Brinell sertlik değeri ampirik olarak bulunabilmektedir. Brown tarafından geliştirilen bu formül şöyle ifade edilmektedir[10].

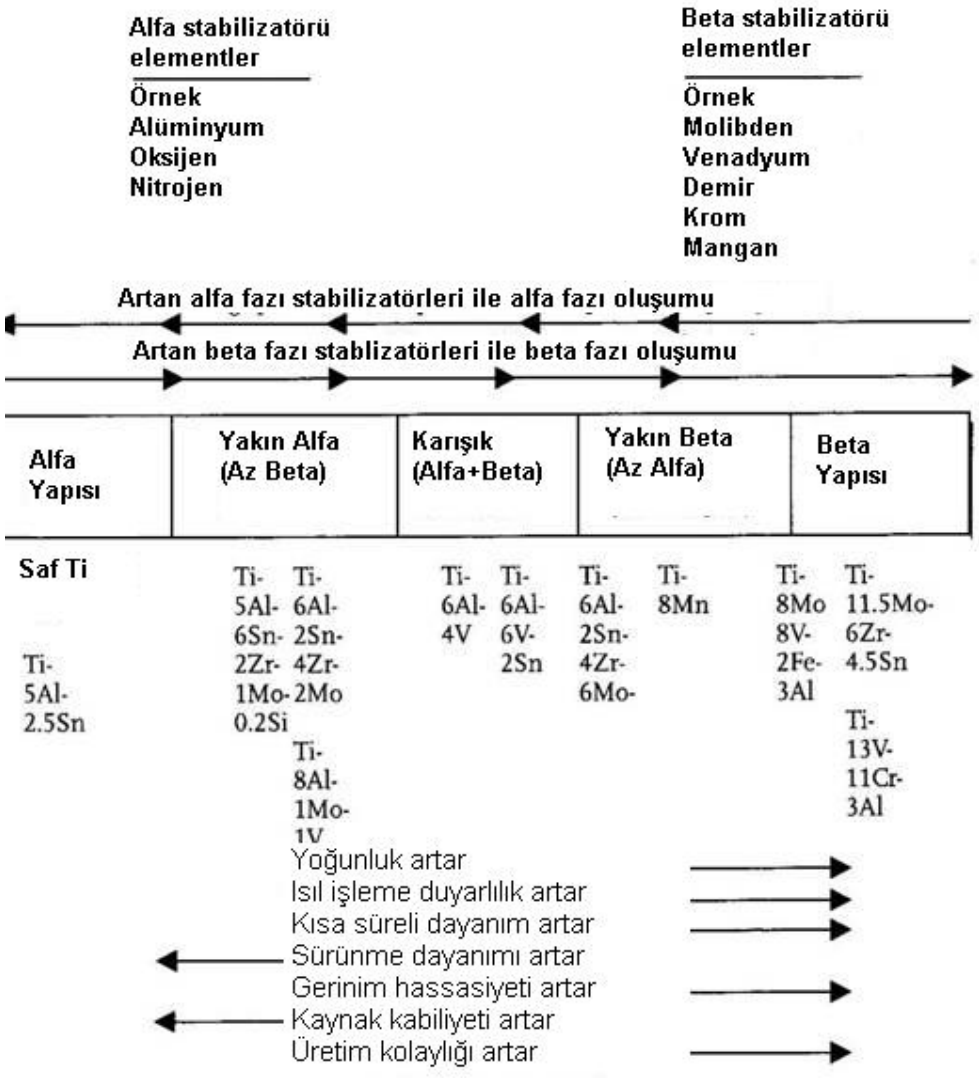
$$BHN = 196 \cdot \sqrt{\%N} + 158.\sqrt{\%O} + 45.\sqrt{\%C} + 20.\sqrt{\%Fe} + 57 \qquad 3.1$$

Sonuç olarak faz yapılarının kafes yapısıyla da ilişkilendirilerek hangi özellikler üzerinde hangi etkileri olduğu şematik olarak Şekil 3.7’ de gösterilmektedir.



(α) Sıkı Düzen Hegzagonal yapı (SDH)

(β) Hacim Merkezli Kübik yapı (HMK)



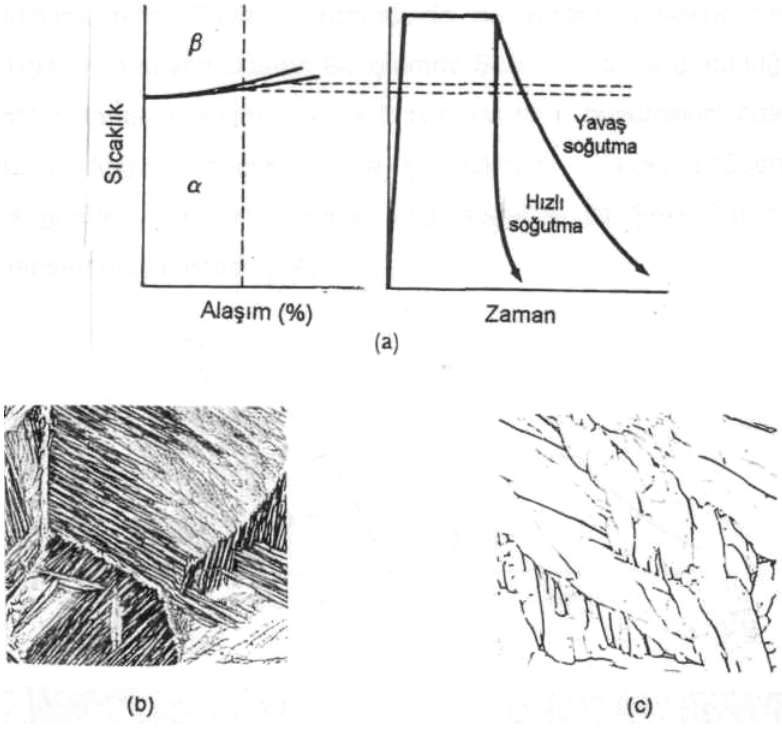
Şekil 3.7 α ve β faz yapılarının özellikler üzerindeki etkileri[2]

3.2.1. α Alaşımları

Alüminyum, kalay veya zirkonyum içeren α alaşımları daha çok; yüksek sıcaklık ya da çok soğuk ortamlarda tercih edilmektedir. α fazı zengin olan alaşımlar, β alaşımlarına göre yüksek sıcaklıklarda sürünmeye karşı genellikle daha dayanıklıdır. Çok düşük miktarda ara yer atomu içeren α alaşımları, sünekliğini ve tokluğunu çok düşük sıcaklıklarda dahi sürdürmektedir[9].

α+β alaşımları ve β alaşımlarının aksine; α alaşımları kararlı α fazına sahip olduklarından ısıl işlem ile sertleştirilememektedir. Ancak, soğuk bir işlem sonrası oluşan artık gerilmeleri yok etmek için yeniden kristalleşme tavı veya sadece tavlama işlemi yapılabilmektedir. Dövülebilme kabiliyetleri çok düşüktür ve dövme sıcaklığı aralığı α+β alaşımları veya β alaşımlarından daha dardır. Dövme sırasında oluşan yüzey çatlakları veya merkezde kırılmalar bunu açıkça göstermektedir. Böyle bir oluşumu önlemek için de dövme işleminde deformasyon miktarının daha küçük seçilmesi ve malzemenin sık sık ısıtılması gerekmektedir[7].

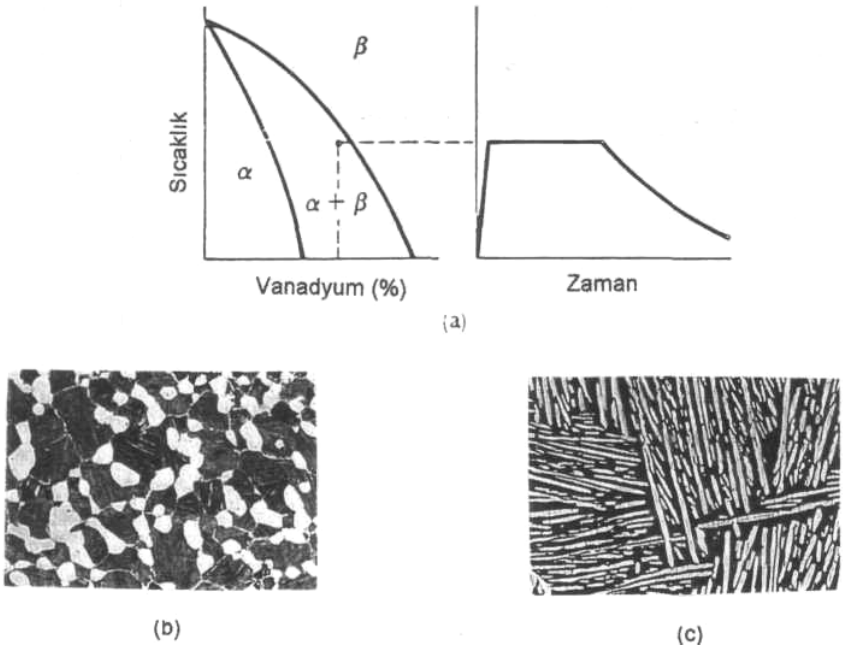
α alaşımlarının iç yapısı, tavlama sonrası soğutma hızına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Şekil 3.8' den de görülebileceği gibi malzemeyi hızlı soğutmak iğnemsi α nın, fırında soğutmak ise plaklı α nın hakim olduğu bir içyapıyı ortaya koymaktadır[5].



Şekil 3.8 α Titanyum alaşımının tavlanması(a), hızlı soğutma sonrası iğnemsi iç yapı(b), yavaş soğutma sonrası plakalı iç yapı(c)[5].

3.2.2. α+β Alaşımları

Bu alaşımlar, bir ya da daha fazla α fazını kararlılaştırıcı veya α içinde çözünebilen elementler ile bir ya da daha fazla β fazını kararlılaştırıcı elementleri yapısında bulundurmaktadır. α ve β fazını kararlılaştırıcı elementlerin uygun bir şekilde ayarlanmasıyla oda sıcaklığında α ve β fazlarının karışımı olan bir içyapı elde edilebilmektedir. Tavlama sonrasında da yüksek süneklik, homojenlik ve yüksek dayanım sağlanmaktadır. Bu işlemde Şekil 3.9 (a)' da görüldüğü gibi küçük miktarlarda α taneleri oluşturmak ve β fazında tane büyümesini önlemek için, β dönüşüm sıcaklığının hemen altına çıkılmaktadır. Yavaş soğutma ile Şekil 3.9 (b)' de görülen eşeksenli taneler; hızlı soğutma ile Şekil 3.9 (c)' de görülen iğnemsi taneler oluşmaktadır[3].



Şekil 3.9 α+β titanyum alaşımının tavlanması (a), yavaş soğutma sonrası eşeksenli iç yapı (b), hızlı soğutma sonrası iç yapı (c)[3].

α+β alaşımlarından en çok kullanılanları Ti-6Al-4V ile Ti-4Al-2Sn-4Mo-0.5Si alaşımlarıdır ki; sadece Ti-6Al-4V malzemesi toplam titanyum üretiminin % 45 inden fazlasını oluşturmaktadır. Bu alaşımlardan yüksek mukavemet değerleri elde etmek için ısıl işlem uygulanabilmektedir. Bu yüzden α+β alaşımları 350 - 400 °C arasındaki sıcaklıklarda ve özellikle yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılabilmektedir[8].

Dayanım artışı için, alaşım öncelikle yarı kararlı aşırı doymuş hale getirilmek üzere çözeltiye alma sıcaklığından hızla soğutulmakta ve daha sonra yaklaşık 500 °C' de yaşlandırılmaktadır. Bu sırada içyapıdaki aşırı doymuş α ve β fazları çözünerek yapıya düzgün bir şekilde dağılmakta ve dayanım artışı sağlanmaktadır[6].

3.2.3. β Alaşımları

Bu alaşımlar önemli miktarlarda β fazını kararlılaştırıcı alaşım elementleri içeren malzemelerdir ve sertleştirilebilme, dövülebilirlik, soğuk şekillendirilebilme ve de yüksek yoğunluk gibi özellikleriyle diğer titanyum alaşımlarından ayırt edilebilmektedir. Bu alaşımlar oda sıcaklığında α+β alaşımları ile eş mukavemet değerlerine sahip iken yüksek sıcaklıklarda bu değerler α+β alaşımlarından sonra gelmektedir[11].

β alaşımları kararsız alaşımlardır ve α fazının β matrisi içinde çökeltilmesi ile sertleştirilirler. Yüksek kırılma tokluğuna sahiptirler ve molibden içeren β alaşımlarının korozyona karşı direncinin yüksek olduğu bilinen bir gerçektir. α+β alaşımlarına göre daha iyi işlenebilmekle beraber ısıl işleme yatkındırlar[11].

4. TİTANYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMLERİ

Titanyum ve alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler, amaçlarına göre şöyle sıralanabilmektedir:

1. Üretim esnasında oluşan artık iç gerilmeleri önlemek (gerilme giderme),
2. Süneklik, boyutsal ve yapısal kararlılık ve talaş kaldırmaya uygunluk gibi önemli parametrelerin optimizasyonu (tavlama)
3. Mukavemeti artırmak (çözeltiye alma ve yaşlandırma).

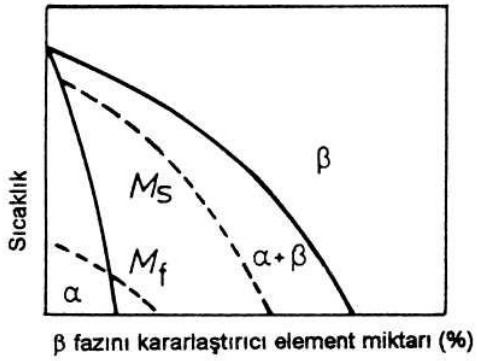
Bunlardan tavlama, çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemleri malzemenin mekanik özelliklerini değiştirmeye yönelik işlemlerdir. Ayrıca tavlama ve gerilme giderme işlemleri; malzemenin içinde bulunacağı korozif ortamlara karşı direncini artırmak, çarpılmaları önlemek ve şekil verme öncesi malzemeyi hazırlamak amacı ile de uygulanabilmektedir[14].

α+β alaşımları, isminden de anlaşılacağı gibi, α ve β fazlarının dağılım yoğunluğuna göre farklı ısıl işlem karakteristikleri gösterirler. α+β alaşımları, kararsız β fazının parçalanması nedeniyle yaşlandırma esnasında sertleşme gösterseler de; β alaşımlarında olduğu kadar kararsız β içermediklerinden dolayı β alaşımları kadar sertleşememektedirler. Bununla beraber α ve β fazlarına yönelik ısıl işlemler ile mikro yapısal ve mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir[1].

α+β alaşımlarına uygulanan son ısıl işlem sonrası yapı içerisinde süper-α alaşımlarına göre daha fazla β fazı kaldığı görülmüştür ve bu fazın belli bir değerde olması; ısıl işlemin türüne ve alaşım içerisindeki β fazını kararlılaştırıcı elementlerin miktarına bağlı bulunmaktadır. α+β alaşımları çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemleri ile sertleştirilebilmektedir. Çözeltiye alma işleminde malzeme genellikle ikili faz bölgesi yani α+β fazı sıcaklıklarına çıkartıldıktan sonra su, yağ ya da diğer soğutucular içerisinde soğutulmaktadır. Bu soğutma sonucunda çözeltiye alma sıcaklığında bulunan β fazı ya aynen kalmakta ya da soğutma sırasında dönüşüme uğramaktadır. Bu işlem sonucundaki yapının içeriği; alaşımın kompozisyonuna, çözeltiye alma sıcaklığına, soğutma hızına ve malzemenin kesit boyutlarına bağlı olmaktadır. Çözeltiye alma işlemini normalde 480 - 650 °C ' de yapılan yaşlandırma

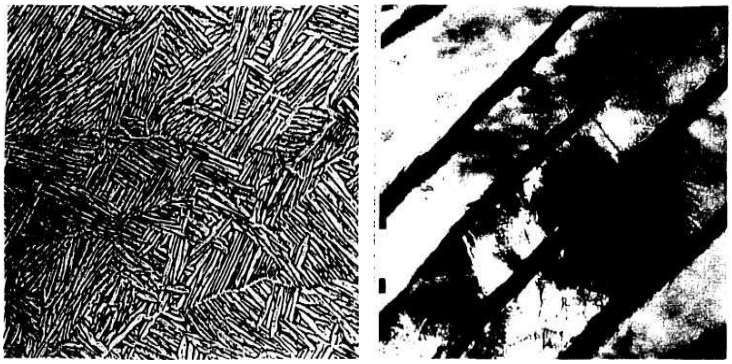
işlemi takip etmektedir ki bu işlem ile α ve β fazlarının çok iyi bir karışımı amaçlanmaktadır[2].

Bilindiği gibi titanyum alaşımlarından en çok kullanılanı yine bir α+β alaşımı olan Ti6Al4V malzemesidir. Bu alaşıma ait faz diyagramı kabaca Şekil 4.1' deki gibi canlandırılırsa iki tür ana dönüşümün önemli olduğu görülebilmektedir[9].



Şekil 4.1 Ti6Al4V alaşımı için temsili faz diyagramı[9]

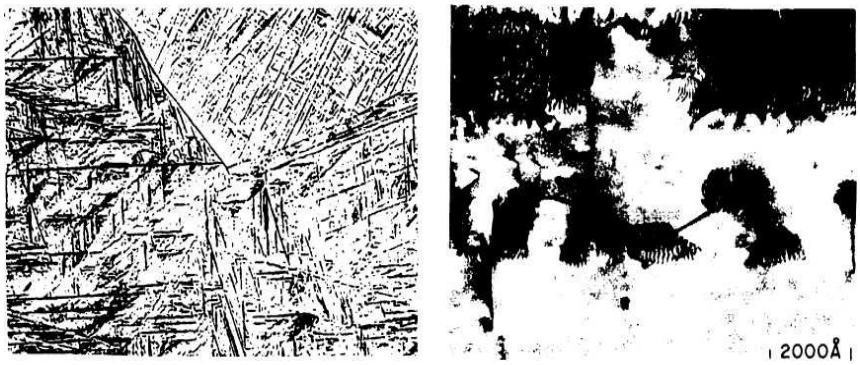
Bunlardan birincisi β dönüşüm sıcaklığı üzerine çıkartılan malzemenin α+β bölgesine dek soğutularak β fazının α fazı içine çökeltilmesidir Temelde bu işlem, demir-karbon diyagramı göz önüne getirilirse; ostenit fazının soğutularak ferrit oluşturulmasına benzemektedir. Ancak burada Widmanstatten yapısı hemen her soğutma hızında baskındır. Örneğin 1037 °C 'den itibaren havada soğutulan Ti6Al4V alaşımının mikro yapısı Şekil 4.2 (a)' da görülmektedir. Şekilde açık renk bölgeler α, koyu bölgeler de β fazını göstermektedir. Şekil 4.2 (b)' de ise aynı yapının elektron mikroskobunda alınan görüntüsü vardır ve iki fazın ayırımı daha net bir biçimde yapılabilmektedir. Görüntülerden β fazının Widmanstatten yapılı α plakları arasında ince tabakalar halinde kaldığı anlaşılmaktadır. Fırında soğutmanın da benzer bir yapı ortaya çıkardığı bilinmektedir[11].



(a) (b)

Şekil 4.2 Ti6Al4V nin havada soğutularak elde edilen yapısı[11]

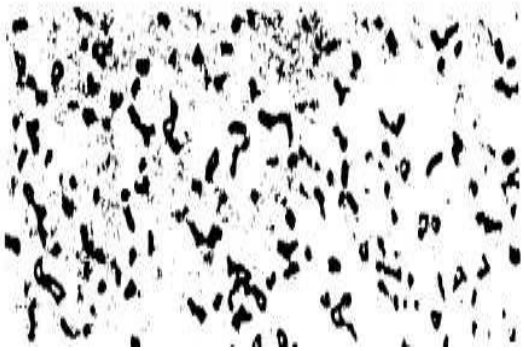
İkinci önemli dönüşüm ise β fazından itibaren suda soğutulan malzemede martenzit oluşumudur. Bu dönüşüm β → α' şeklinde yazılabilmektedir ve α' ifadesi aşırı doymuş sıkı düzen hekzagonal α fazını temsil etmektedir. Şekil 4.3 (a)' da; 1064 °C 'den itibaren suda soğutulan Ti6Al4V malzemesinin bu martenzit dönüşümünü göstermektedir. Martenzit yapı, istenen difüzyonun gerçekleşebileceği sıcaklıklarda yaşlandırılarak; çökeltiler şeklinde ortaya çıkan β fazının aşırı doymuş α fazını bozması sağlanmaktadır. 1100 °C 'den su verilen Ti6Al4V malzemesinin 600 °C 'de 24 saat yaşlandırılması sonucunda oluşan mikro yapının elektron mikroskobundaki görüntüsü Şekil 4.3 (b)' de verilmektedir[12].



(a) (b)

Şekil 4.3 Ti6Al4V alaşımına su verilerek martenzit yapı oluşumu(a), yaşlandırma sonrası yapı(b)[12].

Martenzit veya Widmanstatten yapılı alaşımların mühendislik uygulamalarında genellikle kullanılmadığı bir gerçektir. Ancak malzemenin bu yapısını kırmak ve β fazını α fazına düzgün bir şekilde dağıtmak için faz diyagramında α+β bölgesinde çalışılmaktadır. Bu işlemin ardından malzemenin 700 °C 'de tavlanması mikro yapıyı istenen duruma getirmektedir. Şekil 4.4' te de görülen bu yapının avantajı, Widmanstatten formundaki α fazına göre daha sünek olmasıdır[9].



Şekil 4.4 Sıcak işlenmiş ve tavlanmış Ti6Al4V alaşımı[9].

Çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemi ile α+β alaşımlarının dayanımı; tavlanmış veya aşırı yaşlandırılmış alaşımlara göre % 30-50 daha fazla olabilmektedir. Bu işlem ile elde edilecek sertlik değerleri de büyük ölçüde, alaşım içindeki β fazını kararlılaştırıcı elementlerin miktarına bağlı olmaktadır. Bu elementlerin miktarı arttıkça alaşımın sertleşme kabiliyeti de artmaktadır[10].

β alaşımları ise çözeltiye alma işleminden sonra 450-600°C 'de yaşlandırılmaktadırlar. İşlem sonucunda β fazı içerisinde dağılmış ince α partiküllerinden oluşan bir mikro yapı ile yaşlandırılmış α+β alaşımlarına göre yüksek dayanımlı bir malzeme elde edilmektedir. Ancak yaşlandırılmış koşullarda β alaşımlarının α+β alaşımlarına göre dezavantajları yüksek yoğunluk, düşük sürünme dayanımı ve dövülebilirliğinin az olması şeklinde sıralanabilir. Dövülebilirliğinin az olmasına rağmen, yaşlandırılmış β alaşımlarının kırılma tokluğu α+β alaşımlarından yüksektir. Çözeltiye alınmış ve yapısı % 100 β olan alaşımların dövülebilirliği, şekillendirme kabiliyeti ve tokluğu iyi olmakla beraber dayanımları düşüktür[10].

4.1. Gerilme Giderme Tavlaması

Titanyum ve alaşımlarına uygulanan gerilme giderme tavının, malzemenin dayanımına veya sünekliğine olumsuz etkisi bulunmamaktadır. Gerilme giderme işlemi dövme işleminde parçanın asimetrik şekillendirilmesiyle veya döküm ve kaynaklı imalat sonrası parçanın soğuması sırasında oluşan iç gerilmelerin azaltılması amacıyla uygulanmaktadır[11].

Bu gerilemelerin giderilmesi ile boyutsal kararlılığın sağlanması yanında Bauschinger etkisi gibi istenmeyen etkiler de oradan kalkmaktadır. Titanyum üreticileri, iç gerilmesiz asimetrik işlenmiş plakalar üretmekte ve bunu da yüksek sıcaklıklarda ürünün sürünme direncini azaltarak yapmaktadırlar[5].

Gerilme giderme işlemleri seçilen alaşıma göre metalürjik esaslar göz önüne alınarak yapılmaktadır. Buna göre işlem sıcaklıkları α+β alaşımları ve β alaşımlarında istenmeyen miktarlarda çökelmeye veya yaşlanmaya; α alaşımlarında ise soğuk şekillendirmeye olumsuz etkisi olan istenmeyen miktarlarda yeniden kristalleşmeye izin vermeyecek derecelerde tutulmalıdır. Etkin bir gerilme giderme işlemi, daha yüksek sıcaklıklar ile daha kısa süreler veya daha düşük sıcaklıklar ile daha uzun süreler gerektirmektedir. Çözeltiye alınmış ve yaşlandırılmış titanyum alaşımlarının gerilme giderme işlemi esnasında, dayanımın düşmesine neden olan aşırı yaşlanmanın önüne geçilmesi ve bunu önleyici tedbirlerin alınması gereklidir. Bu durum uygun zaman-sıcaklık kombinasyonunun seçilmesiyle sağlanmaktadır[5].

Gerilme giderme işlemi için zaman-sıcaklık kombinasyonları farklı malzemeler için Tablo 4.1' de verilmektedir. Değişen sıcaklık ve zaman aralıklarından da anlaşılacağı gibi yüksek sıcaklıklarda kısa süreler, düşük sıcaklıklarda da uzun süreler dikkate alınmalıdır. Gerilme giderme işleminde, α veya α+β alaşımlarının karmaşık kaynak bölgeleri için tablodaki en yüksek sıcaklık değerleri sağlanmalıdır. İşlemin ilk saatinde saf titanyum, Ti5Al2.5Sn ve Ti6Al4V alaşımlarının karmaşık kaynakları sonucu oluşan artık gerilmelerin % 70 den fazlasının giderilebildiği bilinmektedir.[6]

Gerilme giderme sonrası soğutma işlemi kritik bir önem taşımaktadır. Yağda veya suda su vererek soğutmayı hızlandırmak, homojen olmayan soğuma nedeniyle iç gerilmeleri artırabilmektedir. Bu nedenle fırın içinde ya da havada soğutma tercih edilmektedir[6].

Tablo 4.1 Bazı titanyum alaşımları için önerilen gerilme giderme parametreleri[6]

Alaşımın		**Gerilme Giderme Parametreleri**	
İç yapısı	**Türü**	**Sıcaklık (ºC)**	**Zaman (Saat)**
α	Saf titanyum	500-600	0,25-4
	Ti-5Al-2.5Sn	550-660	0,25-4
	Ti-5Al-5Sn-5Zr	600-720	0,25-1
	Ti-7Al-12Zr	600-720	0,25-1
α+β	Ti-2Fe-2Cr-2Mo	500-550	0,5-1
	Ti-4Al-4Mn	500-720	0,25-1
	Ti-4Al-4V	500-660	1-5
	Ti-4Al-3Mo-1V	500-580	0,5-8
	Ti-6Al-4V	500-660	1-5
	Ti-7Al-4Mo	500-720	1-8
β	Ti-13V-11Cr-3Al	720-750	1-8

Gerilme giderme işleminin verimini, x ışınları difraksiyonu dışında efektif ve hasarsız olarak ölçebilecek başka bir yöntem yoktur. Optik mikroskop ile mikro yapılar incelenerek gerilme giderme işleminin verimi saptanamamaktadır[4].

Bilindiği gibi x ışınları difraksiyonu ile malzemelerin kristal yapıları hakkında bilgi edinmek mümkündür. Bir kristal kafesin üzerine, kafesteki düzlemler arası mesafeden daha büyük dalga boyunda ve yüksek frekansta elektromanyetik dalgalar gönderildiğinde bu dalgalar, düzlemlerdeki atomlar tarafından saptırılmaktadır. Sapma açısının tespiti ile de kristal yapının şekil değiştirmemiş ilk haline göre durumu ortaya çıkmaktadır[3].

4.2. Tavlama

Titanyum ve alaşımlarına yeterli kırılma tokluğu, işlenebilirlik, oda sıcaklığında maksimum süneklik, yüksek sıcaklıklarda ise boyutsal ve yapısal kararlılık kazandırmak amacıyla tavlama işlemi yapılmaktadır. Çeşitli alaşımlar için önerilen tavlama parametreleri Tablo 4.2' de verilmektedir[3].

α+β alaşımlarının ısıl kararlılığını β fazının dönüşümü etkilemektedir. Tavlama sıcaklıklarından itibaren malzemenin soğutulması esnasında β fazı dönüşebilmekte, hatta belirli şartlar altında ve belirli alaşımlarda kırılgan bir ara faz olan omega (ω) fazını oluşturmaktadır. İşte, çalışma şartlarında yüksek sıcaklıklara maruz kalarak, kararlı β fazını oluşturmak mümkündür. Bu tavlama işlemi de, 550 °C gibi bir dönüşüm aralığı içerisinde yavaş soğutmanın (dakikada yaklaşık 3 °C lik soğutma hızı) ardından; havada soğutmayı gerektirmektedir. Ancak süper-α ve Ti6Al4V gibi α+β alaşımları tavlama sıcaklığından itibaren havada soğutulabilmektedir[2].

Pek çok titanyum alaşımı piyasaya sürülmeden önce tavlanmaktadır Uygulanan tavlama işlemleri; normalizasyon tavlaması, dubleks tavlama, tripleks tavlama, yeniden kristalleşme tavlaması ve β tavlamasıdır. Buradaki normalizasyon tavlaması (mill annealing), haddeleme sırasında termo mekanik olarak uygulanan bir işlem olup kısmi bir tavlamadır ve genellikle saclara uygulanmaktadır Tavlama sonrası mikro yapılarda soğuk veya sıcak deformasyon izlerine rastlanmaktadır. Yeniden kristalleşme ve β tavlaması işlemleri ısıl işlem uygulanan alaşımın β dönüşüm sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda uygulanmaktadır[12].

Tablo 4.2 Bazı titanyum alaşımları için önerilen tavlama parametreleri[3]

Alaşımın		**Tavlama Parametreleri**		
İç yapısı	**Türü**	**Sıcaklık (°C)**	**Süre (Saat)**	**Soğutma**
α	Saf titanyum	660-770	0,1-8	Havada
	Ti-5Al-2.5Sn	730-850	0,16-4	Havada
	Ti-5Al-5Sn-5Zr	880-910	0,5-4	Havada
	Ti-7Al-12Zr	870-910	0,5-4	Havada
	Ti-5Al-1Mo-1V	800-910	1-8	Havada
α+β	Ti-2Fe-2Cr-2Mo	660-715	0,5-4	Havada
	Ti-8Mn	660-770	0,5-1	(1)
	Ti-4Al-4Mn	715-800	1-2	(1)
	Ti-4Al-4V	660-770	1-8	(2)
	Ti-4Al-3Mo-1V	715-740	1-2	Havada
	Ti-6Al-4V	715-850	1-8	(2)
β	Ti-13V-11Cr-3Al	720-800	0,16-1	Havada/Suda

(1) : 550 °C 'ye kadar yavaş, sonra havada soğutma

(2) : Havada veya fırında soğutma

Dubleks tavlamanın amacı ise çalışma koşullarında yüksek sıcaklıklara çıkılması durumunda β→ω faz dönüşümünü engelleyerek kararlı bir β fazı elde etmektir. Ti6Al4V gibi düşük oranda β fazı içeren α+β alaşımları tavlama işlemi sonrası havada soğutulduğunda kararlılıklarında bir değişiklik olmamaktadır Ancak fırın içerisinde soğutma durumunda Ti_3Al ara fazı oluşmakta ve bu faz malzemenin gerilmeli korozyona karşı direncini azaltmaktadır. Bunlara ilave olarak, Ti6Al4V ve Ti6Al6V2Sn alaşımlarında tavlama sıcaklığından 540 °C 'ye 56 °C/saat' lik bir hızla

soğutma gerçekleştiğinde mukavemette küçük oranlarda bir artış (34 MPa) gözlenmektedir[10].

Tavlama sırasında çarpılmaları önlemek zor olabilmektedir. Bu durumda da titanyum üreticileri için çubuk formundaki parçaların küçük toleranslarda doğrultulması ve sacların düzeltilmesi önemli bir problemdir. Titanyumun oda sıcaklığında geri yaylanma özelliği ve doğrultmaya karşı direnci nedeniyle yüksek sıcaklıklarda doğrultma yapılması gerekmektedir. Tavlama sıcaklıklarında malzemenin yeterince düşük sürünme dayanımına sahip olması, bu sıcaklıklarda doğrultma yapılabilmesine olanak sağlamaktadır[9].

4.3. Çözeltiye Alma ve Yaşlandırma

Titanyumun birçok alaşımına yüksek dayanım ve de süneklik kazandırmak için ısıl işlem yapılabilmektedir. Bu ikili kombinasyon özelliği genellikle çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma işlemleri ile sağlanmaktadır[9].

Daha önce de belirtildiği gibi saf titanyum allotropik bir malzeme olup, ısıtıldığında belli bir sıcaklıktan sonra sıkı düzen hekzagonal kristal yapısını (α fazı) hacim merkezli kübik kristal yapıya (β fazı) dönüştürmektedir. Ti6Al4V alaşımına ait β dönüşüm sıcaklığı 1000 ^{o}C ±20 olarak verilmektedir.

α+β ve β titanyum alaşımlarında çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemleri sonucunda mukavemette büyük artışlar görülmektedir. Yeterli süneklik ile birlikte yüksek dayanım sağlamak için çözeltiye alma işleminin α+β fazından yapılması gerekmektedir. Çözeltiye alma sıcaklığının değiştirilmesi β fazı miktarının da değişmesine ve dolayısıyla yaşlandırma işlemi özelliklerinin değişmesine yol açmaktadır. Çözeltiye alma sıcaklığının belirlenmesinde; malzemenin yaşlandırma sırasında tutulduğu zaman ve yaşlandırma sonrası elde edilen süneklik gibi değerler önem kazanmaktadır[14].

Çözeltiye alma işleminde, işlem sıcaklığı β dönüşüm sıcaklığının biraz altında seçildiğinden hassas bir sıcaklık kontrolü gerekmektedir Bu dönüşüm sıcaklığı geçildiğinde mekanik özellikler ve özellikle de süneklik olumsuz yönde etkilenmektedir. Daha da önemlisi, böyle bir durumda diğer ısıl işlemler ile istenen değerlere bir daha ulaşılamamaktadır. Bununla beraber süneklikteki böyle bir düşüş anormal değerlerde değildir. Ancak unutulmamalıdır ki; β dönüşüm sıcaklığı altında yapılan çözeltiye alma işlemi sayesinde malzemenin süneklik, tokluk ve sürünme dayanımları optimum bir bileşimde elde edilebilmektedir[10].

Çözeltiye alma sıcaklığından itibaren soğutma hızı, malzemenin dayanım özelliklerine önemli ölçüde etki etmektedir. Örneğin; soğutma hızı çok yavaş

tutulursa yapı içerisinde oluşabilecek difüzyon nedeniyle yaşlandırma sırasında dönüşmüş β fazının dağılması istenen dayanım artışına izin vermeyecektir. Bu durumun ortaya çıkmasını önleyen soğutma hızı, suda soğutma ile sağlanmaktadır. Soğutma sırasında karşılaşılan en genel problem ise malzemenin fırından soğuma ortamına götürülürken oluşan gecikmeden etkilenmesidir ve bu olayda en kritik malzeme Ti6Al4V olmaktadır. Yapılan çalışmalarda Ti6Al4V malzemesinin yaşlandırma işlemi sonrasında maksimum dayanıma sahip olabilmesi için; ilk etapta 935 °C 'deki çözeltiye alma sıcaklığından 550 °C 'ye soğutulmasının en fazla 1.5 sn. içinde bitirilmesi gerektiği ve en fazla 2 sn içerisinde fırından soğutma ortamına götürülmesi gerektiği görülmüştür. Bu malzemenin suda soğutularak yaşlandırılması sonucunda elde edilen dayanım; yağda soğutularak yaşlandırılan duruma göre 70-100 MPa daha fazla olabilmektedir. Ayrıca aynı malzemenin buzlu ve tuzlu suda soğutarak yaşlandırılması sonucu elde edilen dayanım ile oda sıcaklığındaki suda soğutarak yaşlandırılması arasında çok az bir fark bulunmaktadır[4].

Çözeltiye alınan ve yaşlandırılan malzemenin kesit boyutu, hem soğutma işleminin verimini, hem de yaşlandırma işlemi sonunda ulaşılan dayanımı etkilemektedir[4].

Titanyum alaşımlarının ısıl işleminde son aşama yaşlandırma işlemidir. Bu işlem soğutma sonrasında oluşan aşırı doymuş β fazının çözülmesine neden olmaktadır. Uygun bir yaşlandırma işlemi ile malzemenin yeterli süneklikte, yüksek dayanıma ve metalürjik kararlılığa sahip olacağı da bir gerçektir[7].

Çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemlerinin farklı alaşımlar için önerilen zaman-sıcaklık değerleri Tablo 4.3 'te verilmektedir. Bu tabloda verilen alaşımlar suda soğutulmaktadır[1].

Birçok α+β alaşımının ısıl işlemi sonrasında yapısındaki β fazı yarı-kararlı geçiş fazı olan omega (ω) fazına dönüşmektedir. Bu fazdan; soğutmayla, malzemenin tekrar ısıtılmasıyla ya da yaşlandırma sırasında kurtulmak zor olmaktadır. ω fazının yapı içerisinde yer alması malzemeyi kırılgan hale getirmektedir ve ısıl işlem uygulanan alaşımlarda bulunmaması önerilmektedir. Dolayısıyla bu fazdan tamamen kurtulmak için çok hızlı bir soğutma ve hemen ardından yaşlandırma sıcaklığına hızlı ısıtmak gerekmektedir. Ancak bu işlem sonunda mikro yapının kaba taneli α fazını içermesi nedeniyle malzemede istenen dayanıma ulaşılamamaktadır. Bu nedenle yaşlandırma işleminin 425 °C' nin üzerinde yapılması önerilmektedir[3].

Tablo 4.3 Bazı titanyum alaşımlarının çözeltiye alma ve yaşlandırma parametreleri[1]

Alaşımın		**Parça Şekli**	**Çözeltiye alma**		**Yaşlandırma**	
İç yapısı	**Türü**		**Sıcaklık (ºC)**	**Süre (Saat)**	**Scaklık (ºC)**	**Süre (Saat)**
α	Ti-8Al-1Mo-1V	A	900-1010	5-15 d.	565-620	7-9
α+β	Ti-2Fe-2Cr-2Mo	a,b	760-805	0,5-1	480-510	2-8
	Ti-4Al-4Mn	C	790-870	1-2	480-540	4-8
	Ti-4Al-3Mo-1V	A	870-900	5-20 d.	480-565	4-12
	Ti-6Al-4V	A	900-940	5-20 d.	480-540	3-5
	Ti-6Al-4V	C	900-955	0,5-1	510-595	2-8
	Ti-7Al-4Mo	C	925-980	0,5-2	540-620	4-8
β	Ti-13V-11Cr-3Al	B	790	0,5-1	425-510	24-100

a: Sac b: Çubuk c: Dövme çubuk

Titanyum alaşımlarının; çentik mukavemeti, kırılma tokluğu ve özellikle çentiğe duyarlılığı gibi bazı mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi özel ısıl işlemler ile yapılmaktadır. Bu yöntemlere ilişkin üç örnek şöyledir[2-4]:

1-Ti6Al4V alaşımının çözeltiye alınması ve aşırı yaşlandırılması: 955 ^{o}C' de 1 saat boyunca bekletme ve suda su verme, 2 saat boyunca 705 °C 'de bekletme ve daha sonra havada soğutma. Bu işlemler sonucunda alaşımın çentik mukavemeti, kırılma tokluğu ve sürünme direnci artmaktadır.

2-Ti6Al4V, Ti6Al4V ELI (Extra Low Impurity) alaşımlarının normalleştirme tavlaması : 925 - 955 °C sıcaklıkta 4 saat veya daha fazla bekletme, maksimum 56 °C / saat hızla fırında 760 °C 'ye kadar soğutma ve daha sonra oda sıcaklığına kadar havada soğutma. Bu işlemin avantajı, kırılma tokluğunun ve çatlak oluşum hızının düşürülmesidir.

3- Ti6Al4V, Ti6Al4V ELI (yüksek saflıkta) alaşımlarının β tavlaması: 5-60 dakika boyunca 1010 -1040 °C sıcaklıkta bekletene, 85 °C / dak (veya daha fazla) hızla 650 °C 'ye havada soğutma, 730 - 790 °C sıcaklıkta 2 saat ısıtma ve daha

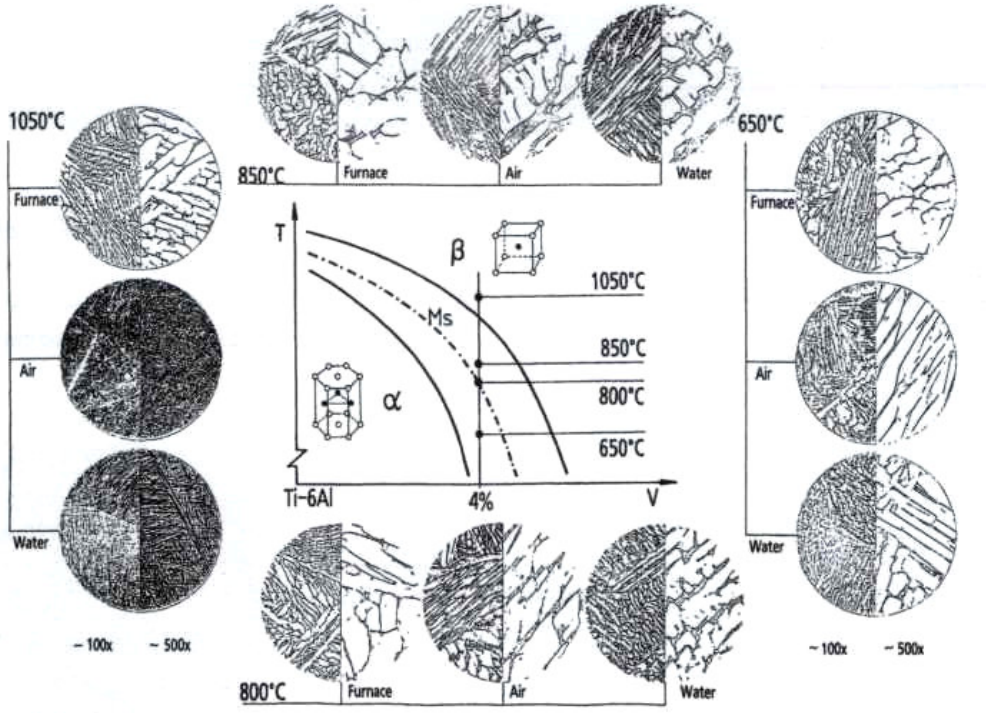
sonra havada soğutma. İşlem sonrası alaşımın kırılma tokluğu, yorulma ve sürünme direnci ve gerilmeli korozyon dayanımı artmaktadır.

Sonuç olarak α+β titanyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlemleri Tablo 4.4'te toplamak mümkündür.

Tablo 4.4 α+β alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler ve oluşan mikro yapılar[7]

ISIL İŞLEM TÜRÜ	ISIL İŞLEM ŞARTLARI	OLUŞAN İÇYAPI
Dubleks Tavlama	β dönüşüm sıcaklığının 50-75 ºC altında çözeltiye alma, havada soğutma ve 540-675 ºC sıcaklığında 2-8 saat yaşlandırma	Birincil α ve Widmanstatten tipi α+β bölgeleri
Çözeltiye Alma ve Yaşlandırma	β dönüşüm sıcaklığının yaklaşık 40 ºC altında çözeltiye alma, su verme ve 535-675 ºC sıcaklıkta 2-8 saat yaşlandırma	Birincil α ve temperlenmiş α martenziti veya α+β karışımı içyapı
β Fazı Tavlaması	β dönüşüm sıcaklığının yaklaşık 15 ºC üstünde çözeltiye alma, havada soğutma ve 650-760 ºC 'de 2 saat kararlaştırma	Widmanstatten tipi α+β bölgeleri
β Fazında Su Verme	β dönüşüm sıcaklığının yaklaşık 15 ºC üstünde çözeltiye alma, su verme ve 650-760 ºC 'de 2 saat temperleme	Temperlenmiş α martenziti
Normalizasyon Tavlaması	925 ºC 'de 4 saat ısıtmanın ardından 760 ºC 'ye kadar 50 ºC/saat hızla soğutma ve daha sonra havada soğutma	Eşeksenli α taneleri sınırlarında noktasal β fazları
Yeniden Kristalleştirme Tavlaması	α+β fazında yapılan sıcak işlem sonrası 705 ºC de en az 30 dakika tavlama ve havada soğutma	Kısmi kristalleşmiş α taneleri içinde hacimce küçük β partikülleri.

Şekil 4.5 te çeşitli sıcaklıklardan oda sıcaklıklarına değişik soğuma hızlarında indirilmiş Ti6Al4V alaşımına ait mikro yapı örnekleri verilmiştir.

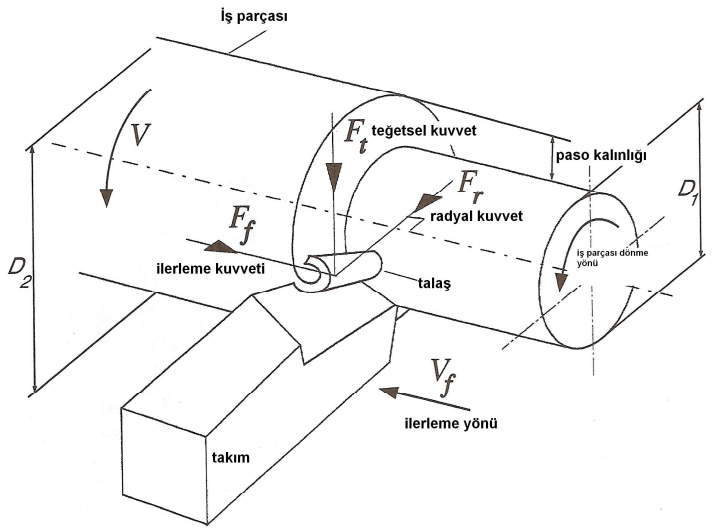


Şekil 4.5 Ti6Al4V alaşımına ait çeşitli soğuma hızları sonucu oluşan iç yapılar[2]

5. TALAŞLI İMALATIN MEKANİĞİ

5.1. Giriş

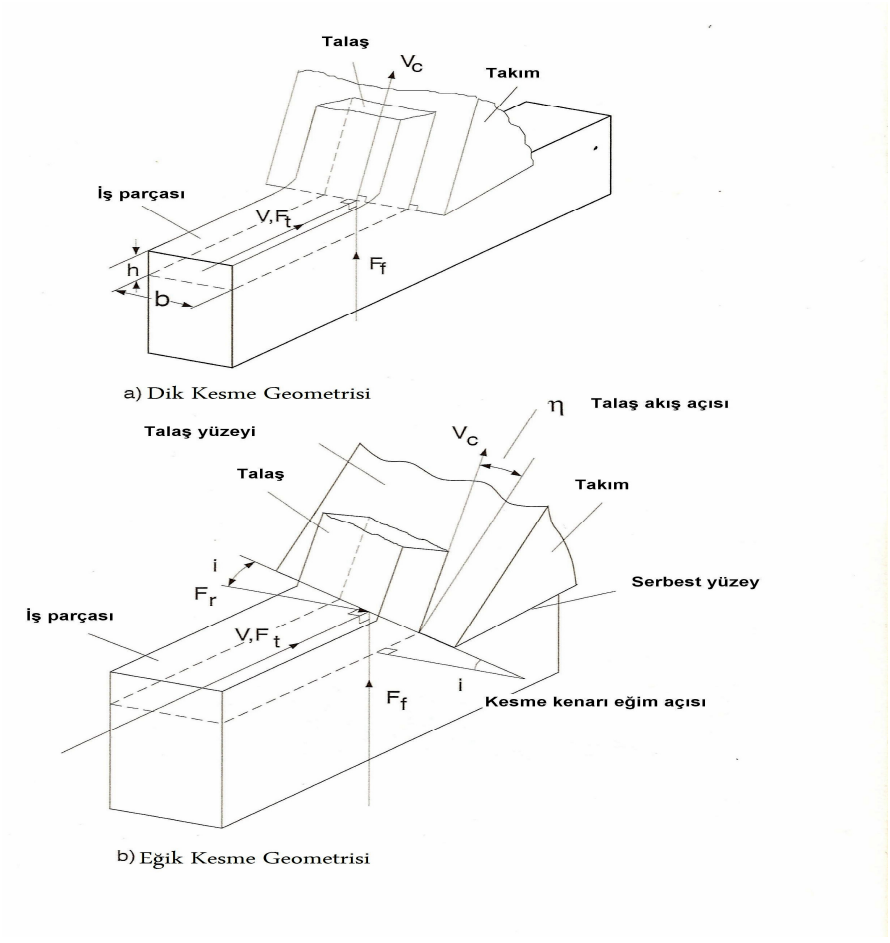
Birçok makine parçası elemanı son şeklini talaşlı imalat yöntemleri ile kazanmaktadır. Ekstrüzyon, haddeleme ve döküm gibi işlemlerin sonunda; yüzey kalitesi, istenen son şekil ve ölçülere getirmek için talaş kaldırma yöntemleri kullanılmaktadır. Talaşlı imalat iki ana grupta ele alınabilir; kesme işlemleri ve taşlama işlemleri. Kesme işlemleri parçadan talaş kaldırma esasına dayanırken, taşlama işlemleri parçanın yüzey kaltesini ve ölçü hassasiyetini arttırma yönünde önem kazanır. En genel talaşlı imalat işlemleri tornalama, frezeleme ve delik delmedir. Şekil 5.1' de tipik bir silindirik tornalama işlemi şematize edilmiştir. Her ne kadar bütün talaşlı imalat işlmeleri aynı mekanik prensibe dayansa da, geometri ve kinematik olarak birbirlerinden ayrılırlar [16,17]. Bu çalışmada bütün talaşlı imalat yöntemlerinin geometri ve kinematiği üzerine durulmak yerine, kesme mekaniğinin temel prensibine kısaca yer verilecektir.



Şekil 5.1 Tornalama geometrisi [16]

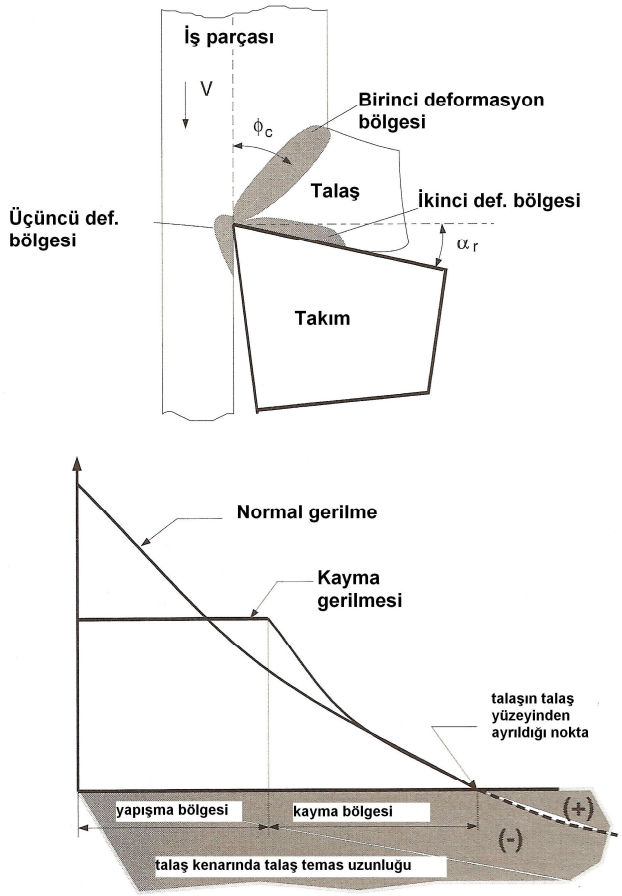
5.2. Dik Kesme Mekaniği

Neredeyse bütün talaş kaldırma işlemleri 3 boyutlu ve karmaşık geometrilere sahip olsalar da, kolay anlaşılması açısından 2 boyutlu dik kesme üzerinden işlemin mekaniği anlatılacaktır. Dik kesmede malzemeden talaş kaldırma işlemi, takım ucunun iş parçasına göre dik olarak ilerlemesiyle gerçekleşir. Daha karmaşık ve 3 boyutlu kesme şartlarının modellendiği eğik kesmede ise dik kesme şartları üzerinden yola çıkılarak kesme modellenir. Dik ve eğik kesme işlemleri Şekil 5.2 de şematik olarak gösterilmiştir. Dik kesmede kesme kenarı kesme hızı (V) yönüne diktir. Kesme genişliği b ve kesme derinliği h, kesme işlemi ile parçadan uzaklaştırılmaktadır. Dik kesmede, kesme işlemi işlem süresince kesme kenarı boyunca uniform olarak devam ettiği kabul edilir. Takım ile parça arasındaki kesme kenarı dik olduğu için işlem sırasında iki kesme kuvveti oluşur; bunlar teğet kuvvet (F_t) ve ilerleme kuvveti (F_f) dir. Ancak eğik kesmede bu iki kuvvete ilave olarak eğim açısı (i) tarafından meydana gelen radyal kuvvet (F_r) oluşur [16,17].



Şekil 5.2 Dik ve Eğik kesme geometrileri [16]

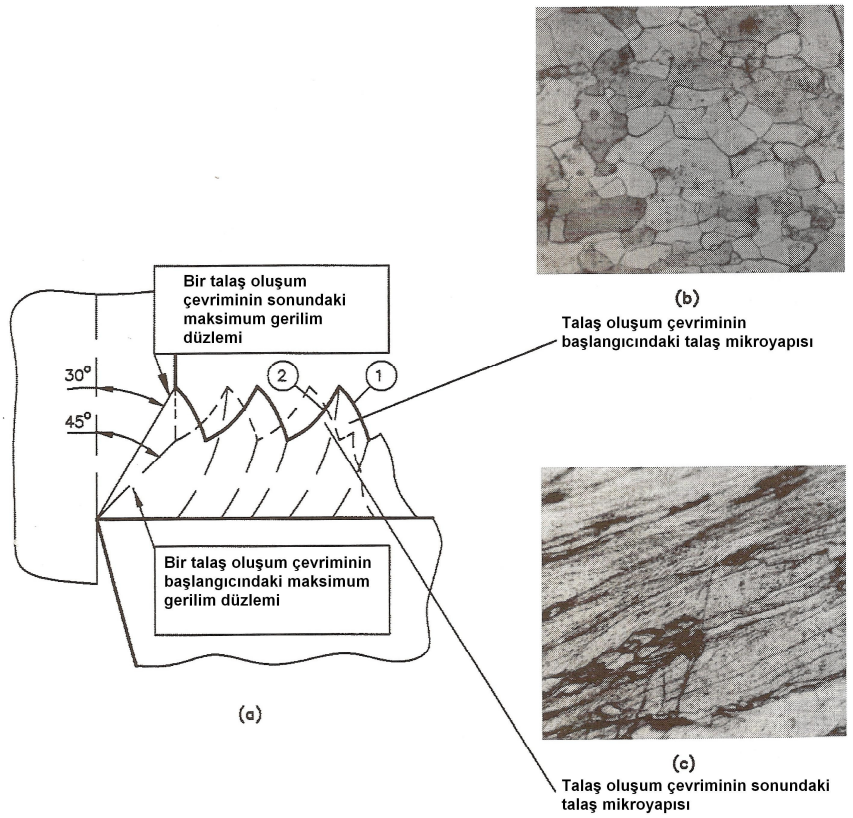
Kesme sırasında 3 adet deformasyon bölgesi oluşur (Şekil 5.3). Takım ucunun, iş parçası üzerinde basınç oluşturması sonucu, temas noktasındaki malzeme talaş oluşumuna başlamak üzere kayma gerilmesi atında birinci kayma bölgesini oluşturur. Kaymaya başlayan malzeme, yani talaş, takımın talaş kenarı üzerinde ilerlemeye başlayarak ikinci deformasyon bölgesini oluşturur. Sürtünme bölgesinde henüz işlenmiş yüzey ile takımın serbest kenarı arasında kalan bölge ise üçüncü bölgeyi oluşturur [16,19].



Şekil 5.3 Deformasyon bölgeleri ve talaş kenarında dağılımı [16].

Şekil 5.4' te ise deneysel kesme çalışmlarından elde edilen bilgilerin sonuçları gösterilmektedir. Bu şekilde, talaş oluşum evresinin başlangıcındaki durum kesikli çizgilerle, sonundaki durum ise düz çizgi ile gösterilmiştir. Talaş oluşum evresinin başlangıcında maksimum gerilme $\varphi_1=45^o$ deki düzlemde oluşmaktadır. Bu da

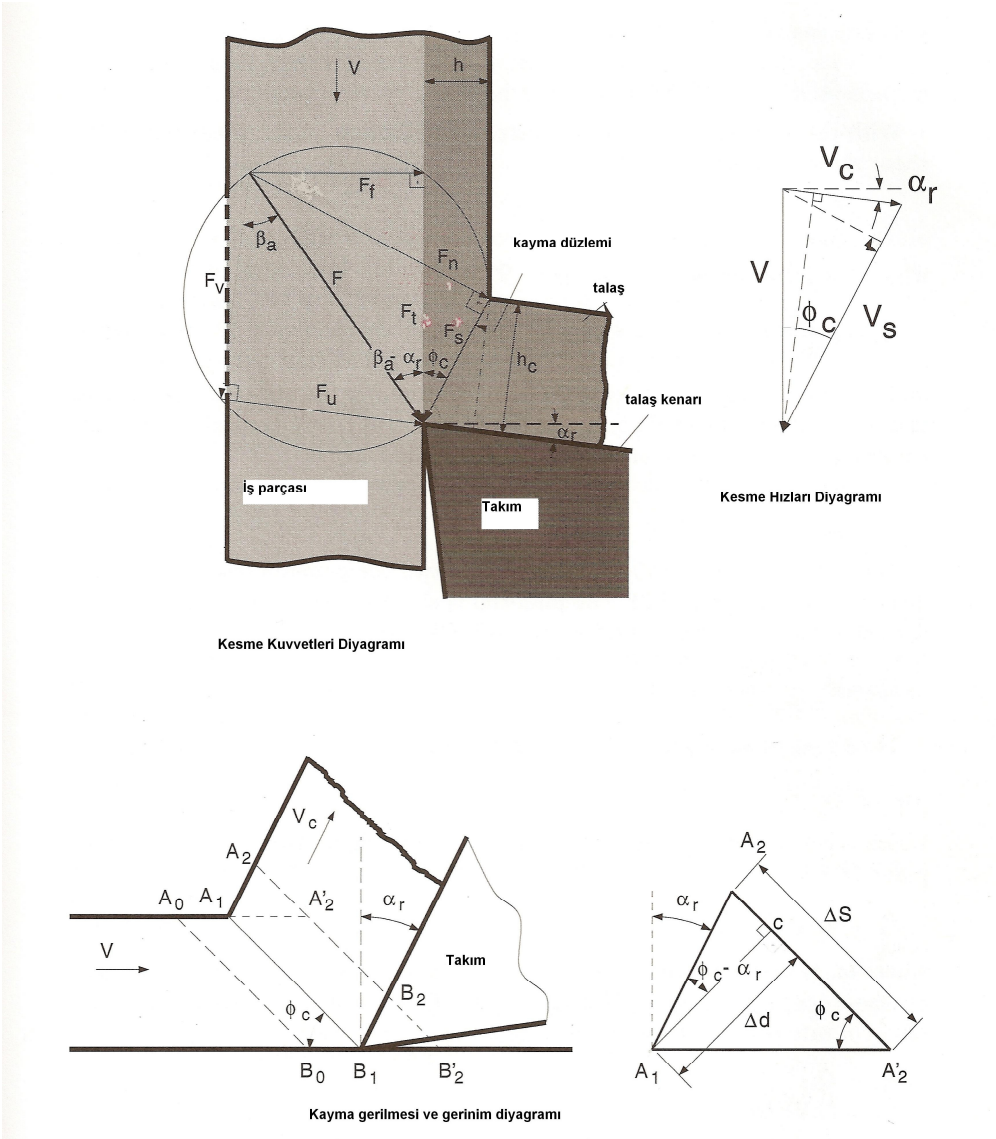
göstermektedir ki, etki eden kuvvet sadece kayma gerilmesi olarak kullanılmaktadır. Talaş oluşum evresinin sonlandığı noktada ise maksimum gerilme $\varphi_2=30^o$ deki düzlemde oluşmaktadır. Bu da gelen kuvvetin bir miktarının talaşın kıvrılması için kullanıldığını işaret etmektedir. Şekil 5.4.a da gösterilen 1 nolu bölgede maksimum kayma gerilmesinin φ_1 den φ_2 ye geçmesi nedeniyle ortaya çıkan eğim görülmektedir. Bu bölgeki eğim oluşmu plastik deformasyondan kaynaklanan şişme olarak açıklanabilir. Bunu desteklemek için Şekil 5.4.b de mikroyapı fotoğrafı gösterilebilir. Görüldüğü gibi, talaş oluşum çevriminin başlangıcındaki tane yapısı sadece kayma gerilmesine maruz kalması sonucu deforme olmuştur. Şekil 5.4. c de ise deforme olmuş tane yapısını göstermektedir. Görüldüğü gibi, mikroyapı, bileşke kuvvetler altında plastik deformasyona maruz kalan malzemelerin mikroyapısına benzemektedir [18].



Şekil 5.4 Talaş oluşum evresinin başlangıcında ve sonunda talaş durumu ve mikroyapı fotoğrafları [18].

Talaş ilk olarak takımın talaş kenarına yapışık olarak ilerler ki bu bölgeye yapışma bölgesi denir. Bu bölgede sürtünme gerilmesi ile akma gerilmesi değerleri hemen hemen aynı değerlere ulaşır. Bu bölgeden sonra talaş sabit bir kayma gerilmesi

üsteli ile kaymaya başlar ve yapışma bölgesi bitmiş olur. Böylece talaş takıma temas etmeden uzaklaşmaya başlamış olur. Temas bölgesi genişliği kesme hızı, takım geometrisi ve malzeme özelliklerine göre değişiklik gösterir. Birincil kayma bölgesinin analizi için temelde iki yaklaşım mevcuttur. Merchant, birincil kayma bölgesinin ince bir tabaka olduğunu varsayarak bir dik kesme modeli oluşturmuştur. Diğer yandan Lee ve Shaffer ile Palmer ve Oxley ise, analizlerini kalın bir kayma deformasyon bölgesi üzerine temellendirerek plastisite teorisini kullanarak birmodel oluşturmuştur. Bu çalışmada, kolaylaştırma açısından Merchant yaklaşımı üzerinden durum ele alınacaktır [16].



Şekil 5.5 Dik kesme mekaniği [16]

Deformasyon geometrisi ve kesme kuvvetleri dik kesmenin kesit görünüşünde gösterilmektedir (Şekil 5.5). Kesme kenarı pahsız ve radyüssüz olduğu varsayılarak deformasyonun sonsuz incelikteki bir kayma düzleminde başladığı varsayılır. Kayma açısı φ_c, kesme hızı (V) ile kayma düzlemi arasında kalan açı olarak tanımlanır. Daha sonra kayma düzleminde kayma gerilmesi (τ_s) ve normal gerilme (σ_s) sabit olarak düşünülerek talaştaki mutlak kuvvet (F) hesaplanır. Bu da teğetsel (F_t) ve ilerleme (F_f) kesme kuvvetlerinin bileşkesi olarak hesaplanır [16,19].

$$F = \sqrt{F_t^{\,2} + F_f^{\,2}} \qquad 5.1$$

İlerleme kuvveti kesilmemiş talaş yönünde ve teğetsel kuvvet de kesme hızı yönündedir. Takıma etkiyen kesme kuvvetleri talaşa etkiyen kesme kuvvetleri ile aynı şiddette ancak ters yönlüdür. Şimdi de iki deformasyon bölgesi için dik kesme mekaniğini inceleyelim [16].

5.2.1. Birincil Kayma Bölgesi

Kayma düzleminde yer alan kayma kuvveti (F_s), geometriden;

$$F_s = F.\cos(\varphi_c+\beta_a-\alpha_r). \qquad 5.2$$

olarak hesaplanır. Burada β_a takımın talaş kenarı ile kayan talaş arasındaki ortalama sürtünme açısı; α_r ise talaş açısıdır. Kayma kuvveti aynı zamanda ilerleme ve teğetsel kuvvetler cinsinden de ifade edilebilir:

$$F_s = F_t\cos\varphi_c - F_f\sin\varphi_c. \qquad 5.3$$

Benzer şekilde kayma düzleminde rol alan normal kuvvet de bulunabilir

$$F_n = F\sin(\varphi_c+\beta_a-\alpha_r) \qquad 5.4$$

ya da

$$F_n = F_t\sin\varphi_c + F_f\cos\varphi_c. \qquad 5.5$$

Kayma düzleminde gerilmenin eşit dağıldığı düşünülerek kayma gerilmesi (τ_s)

$$\tau_s = \frac{F_s}{A_s} \qquad 5.6$$

olarak bulunabilir. Burada A_s kesme düzlemi alanı olmakla beraber

$$A_s = \frac{b.h}{\sin \varphi_c} \qquad 5.7$$

formülü ile hesaplanır. Burada b paso miktarı, h kesilmemiş talaş kalınlığı ve φ_c ise kayma açısıdır. Kayma düzlemindeki normal gerilme ise

$$\sigma_s = \frac{F_n}{A_s} \qquad 5.8$$

formülü ile hesaplanır [16,19].

Kesme hızı (V) iki bileşenden oluşmaktadır (Şekil 5.5). Talaş ana malzemeden kayma hızı (V_s) ile uzaklaştırılır. Diyagramdan anlaşılacağı üzere,

$$V_s = \frac{V.\cos \alpha_r}{\cos(\varphi_c - \alpha_r)} \qquad 5.9$$

kesme hızı ile kayma hızı arasındaki ilişki de bu şekilde tanımlanabilir [16].

Kayma düzlemi kenar uzunluğu L_c ise talaş deformasyon geometrisinden,

$$L_c = \frac{h}{\sin \varphi_c} = \frac{h_c}{\cos(\varphi_c - \alpha_r)} \qquad 5.10$$

şeklinde bulunur [16].

Talaş sıkışma oranı adı verilen ve kesilmemiş talaş (h) ile kesilmiş talaş (h_c) kalınlıklarının oranını ifade eden r_c ise,

$$r_c = \frac{h}{h_c} \qquad 5.11$$

ile elde edilir [16].

Kayma açısı φ_c, talaş sıkışma oranı ve takımın talaş açısı yardımıyla,

$$\varphi_c = \tan^{-1} \frac{r_c.\cos\alpha_r}{1 - r_c.\sin\alpha_r} \qquad 5.12$$

şeklinde bulunur [16].

5.2.2. İkincil Kayma Bölgesi

Takımın talaş kenarındaki kesme kuvvetinin iki bileşeni vardır. Bunlardan ilki normal kuvvet F_v,

$$F_v = F_t\cos\alpha_r - F_f\sin\alpha_r \qquad 5.13$$

ve ikincisi de sürtünme kuvveti F_u,

$$F_u = F_t\sin\alpha_r + F_f\cos\alpha_r \qquad 5.14$$

Burada anlatılan dik kesme analizinde, talaşın takım üzerinde ortalam ve sabit bir sürtünme katsayısı olan μa ile hareket ettiği varsayılır. Gerçekte ise talaş takıma önce yapışır daha sonra belirli bir sürtünme katsayısı ile ilerler. Ortalama sürtünme katsayısı,

$$\mu_a = \tan\beta_a = \frac{F_u}{F_v} \qquad 5.15$$

olarak bulunur [16,17,19].

Sürtünme açısı β_a aynı zamanda teğetsel ve ilerleme kuvvetleri cinsinden de bulunabilir,

$$\beta_a = \alpha_r + \tan^{-1}\frac{F_f}{F_t} \qquad 5.16$$

Kesilmiş talaş takımın talaş yüzeyinde V_c hızı ile ilerler ve,

$$V_c = r_c.V = \frac{V.\sin\varphi_c}{\cos(\varphi_c - \alpha_r)} \qquad 5.17$$

olarak hesaplanır [16,19].

Birim talaş kaldırmak için gereken enerji olarak tanımlanan özgül kesme enerjisi u_s; teğetsel (kesme) kuvveti F_t, ilerleme f ve paso miktarı a cinsinden,

$$u_s = \frac{F_t}{a.f} \qquad 5.18$$

şeklinde tanımlanır [19].

Standart çekme ve sürtünme deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak kayma açısı, kayma düzleminde oluşan gerilme ve sürtünme katsayılarını heaplamak oldukça zordur. Daha gerçekçi ve doğru bilgilerin elde edilebilmesi için dik kesme şartlarında yapılan, çeşitli talaş açılarına sahip takımların kullanılmasıyla farklı ilerleme, teğetsel kuvvetler ve talaş kalınlıklarının kullanılmasıyla yapılan deneyler kullanılır. Talaş kalınlığı ve kesme hızlarında değişiklik yapılarak deneyler tekrarlanır [16].

5.3. Takım Ömrü

Talaş kaldırma işlemleri takım, iş parçası, kesme sıvısı veya bir başka ara elementin yanısıra hız, kuvvet ve sıcaklık gibi parametrelerden etkilenen tribolojik işlemlerdir. Takım ile iş parçasındaki izafi hareket ve kesme kuvveti talaş oluşumu için gereklidir. Hareket ve kuvvet etkisine bağlı olarak oluşan sürtünme ısı artışına neden olmaktadır.

Talaş kaldırma esnasında kesici takımda oluşan aşınma, ömürlerini tamamlayıncaya kadar sürmektedir. Kesici takım ömrü her zaman sınırlıdır. Takım aşınmasına etki eden faktörler kesme işlemine bağlı parametrelerdir. Kesici takımın kırılması köşe ve serbest yüzeydeki aşınma, talaş ile plastik deformasyona bağlıdır, çoğunlukla takım ömrü kriterleri takım aşınmasına göre belirlenir. Kesici takımların kalitesinin yükseltilmesi, kullanılan malzemelerin iyileştirilmesi takım ömrüne olumlu etki etmektedir. Kesme parametrelerinin optimizasyonu takım ömrünün iyileştirilmesi için gereklidir. Takım ömründe yapılan iyileştirmeler üretim maliyetini doğrudan etkilemesi nedeniyle büyük önem taşır. Takım ömrünün artırılması ile üretim maliyeti mümkün olduğu kadar azaltılmaya çalışılmıştır. Takım ömrünün sona ermesi kaçınılmazdır. Üzerinde çalışılan konu ölçü toleransı, yüzey kalitesi, ve üretim akışı olumsuz etkilenmeden takım ömrünü artıracak kesme parametrelerinin kullanılmasıdır. Çoğunlukla takım ömrü kriteri olarak yüzey aşınması kullanılır. Takım ömrünü tamamlamadan aşınmayı yavaşlatmanın yöntemlerinden birisi kesme hızının sayısal denetimli tezgahlarda (CNC) yavaş yavaş azaltılmasıdır. Plastik deformasyonu azaltmak için kesme hızı, ilerleme ve son olarak talaş derinliği azaltılmalıdır [17,18,19].

Kesme işlemleri sırasında önemli olan takım ömrünün aşınma nedeniyle tamamlandığı anın belirlenmesidir. Kesme kuvvetleri ile takım ömrü arasında direkt bir ilişki bulunmaktadır. Ft kesme kuvveti talaş kaldırma işlemleri sırasında lineer olarak takımın aşınma miktarı ile orantılı ve takımın ömrünü tamamlaması anında önemli oranda artmaktadır [17,18,19].

5.4. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik terimi belirli bir malzeme veya malzeme grubu için işleme kolaylığı veya zorluğunu ifade etmek için kullanılır. İş parçasına ait birçok özellik işlenebilirlik üzerinde etkilidir. Bunların başlıcaları; kimyasal bileşim, mikroyapı, mekanik özellikler (sertlik, çekme dayanımı, vb.) ve fiziksel özelliklerdir. Aslında işlenebilirlik sadece malzeme özelliği olarak değil, iş parçası, takım malzemesi,

tezgah, kesme sıvısı ve kesme koşullarını da içine alan bütün olarak değerlendirilmelidir [19].

İşelenebilirlik terimi genelde karşılaştırma veya derecelendirme amacıyla kullanılır. İşlebebilirliğin belirlenmesinde kullanılan ana kriterler şu şekilde sıralanabilir.

1.Takım Ömrü veya Takım Aşınma Oranı: Bu en anlamlı ve ortak işlenebilirlik kriteri olarak öne çıkmaktadır. Takım aşınması, işlenen parça maliyeti ve kalitesini direk olarak etkiler. Eğer belirli kesme koşullarında takım aşınmaları azalıyorsa o koşullarda işlenebilirliğin arttığından söz edilebilir. Takım aşınması içinde bulunulan kesme koşullarından direk etkileneceğinden kendi koşulları içinde değerlendirilmelidir [19].

2.Kesme kuvvetleri veya Güç Gereksinimi: Kesme kuvvetleri ve dolayısıyla güç gereksinimi azalıyorsa işlenebilirlik o koşullarda artıyor demektir. Düşük kesme kuvvetleri, takım aşınmasını azaltır, ölçü kesinliğini arttırır ve dolayısıyla takım ömrünü arttırır. Kesme kuvvetlerini ve gücünü azaltmak için kesme hızları, ilerleme, paso derinliği gibi parametrelerin düşürülmesi gerekir [19].

3. Talaş Formu: Kısa talaş üreten malzemeler ve kesme koşulları için işlenebilirliğin; uzun, kopmayan veya kısa ama toz halinde talaş çıkaran melzemeler ve kesme koşullarına göre daha iyi olduğu söylenebilir. Talaş formaları da bazı koşullarda kesme parametrelerinin değiştirilmesi ile istenen duruma getirilebilir [19].

4. Yüzey Kalitesi: Yüzey kalitesinin yüksek olması işlenebilirliğin de yüksek olmasına işaret eden bir faktördür. Yüzey kalitesinin belirlenmesinde ise ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değeri kullanılır [19].

6. TİTANYUM ALAŞIMLARININ İŞLENEBİLİRLİĞİ

Titanyum alaşımları iki ana grup olarak toplanabilir: korozyon dirençli alaşımlar ve yapısal alaşımlar. Korozyon dirençli alaşımlar genelde α yapısına sahip olan, yani içinde α kararlılaştırıcı elementleri bulunan alaşımlardır. Genellikle kimya sanayinde, enerji iletimi, kağıt ve gıda sanayinde, korozyon dirençli boru ve hatta ısı eşanjörleri, valfler ve taşıyıcılar olarak kullanılmaktadır. Kısaca α tipi alaşımlar mükemmel korozyon direncine, iyi bir kaynak kabiliyetine ve nispeten daha kolay işlenebilirliğe ve üretim kolaylığına sahiptirler[9].

Yapısal olarak kullanılan titanyum alaşımları da bilindiği gibi 3 grupta toplanabilmektedir: α alaşımları, α+β alaşımları ve β alaşımları. α alaşımları; yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmaları nedeniyle içten yanmalı türbin motorlarında 600 ºC 'den yüksek sıcaklıklara kadar kullanılabilmektedir. α+β alaşımları; yapısal alaşımlardır ve genellikle uzay uygulamalarında motor ve diğer yapısal kısımlarda komponentler olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımlar içinde en bilineni ise Ti6Al4V dir ve 315 ºC gibi sıcaklıklarda dahi hem mekanik özelliklerini hem de ısıl direncini korumaktadır. β alaşımları ise daha yüksek dirence sahip olmasına rağmen nispeten daha düşük sıcaklıklarda bu dayanımını korur[15].

Uzay sanayinde titanyum alaşımlarının kullanım amaçları dikkate alındığında; %25 oranında yüksek korozyon direnci, %60 oranında Ti6Al4V, %15 oranında ise diğer titanyum alaşımlarının kullanıldığı görülmektedir[9].

6.1. Ti6Al4V Alaşımının İşlenebilirliği

Titanyum alaşımlarının işlenmesinde ortaya çıkan sorunların genellikle, bu alaşımların yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanıma sahip olmaları olarak özetlenebilir. 1950 'lerde titanyumun kullanılmaya başlanmasıyla birlikte işlenebilirlik özellikleri de araştırılmaya başlanmıştır. Çıkan sonuçlar şu şekilde ifade edilebilir[13]:

1. Titanyum alaşımlarının zayıf termal özelliklerinin fiziksel özellikleriyle birlikte rol oynadığı ilk kesme bölgesinde oluşan plastik deformasyon.
2. Birincil kesme bölgesinde heterojen deformasyon gelişimi

3. Kopuk talaş oluşumu sırasında kesme koşullarının karalılığının etkisi
4. Takım- talaş temas bölgesinde, titanyum alaşımlarının neredeyse tüm takım malzemeleriyle yüksek kimyasal reaksiyon eğilimi göstermesi, takım aşınmalarının başta gelen nedenidir.
5. Orta sıcaklıklarda bile aniden artış gösteren düşük elastiklik modülü, parçada eğilmelere neden olmaktadır. Bu da ince cidarlı malzemeleri işlerken veya bitirme işlemlerinde sorun yaratmaktadır.

Kopuk talaş oluşumuna neden olan iki ana aşama vardır. Birincisi, kararsız plastik deformasyon içeren ve birincil kesme bölgesi içinde dar bir alanda gerilme yaratan, kesme yüzeyi boyunca kesme hatasına neden olan durumdur. İkincisi ise, üretilen kesikli talaşın kademeli olarak üst üste binmesiyle, takım talaş yüzeyine sürekli artan baskı yapılması sonucu oluşmaktadır[13].

Titanyum alaşımlarının işlenebilirliğinde bir başka konu da kesme hızıdır. Kesme hızı aynı zamanda talaş formunu etkilediğinden az önce bahsedilen talaş formunun kesme şartlarına etkisiyle bağlantılıdır. Kesme hızı prosesteki diğer faktörleri, örneğin sıcaklık ve takım aşınmasını yakından etkiler. Bu aynı zamanda diğer metaller için de geçerlidir[11].

Titanyum ve alaşımları, genellikle HSS takımlar kullanılarak 30 m/dak dan daha yüksek hızlara işlenmesi zor olan metallerdir. Bu rakam WC takımla için 60m/dak ya kadar yükselmektedir. Diğer takım malzeme tipleri olan seramik esaslı takımlar, elmas, CBN gibi takım malzemeleri titanyum ve alaşımları ile yüksek reaksiyon eğilimi olan malzemeler olduğu için titanyum ve alaşımlarının işlenmesinde kullanılmazlar[14].

Şimdi maddeler halinde titanyumun işlenebilirliğinde etkisi olan kesme parametrelerin etkilerini tek tek ele alalım.

6.1.1 Kesici Takım

Titanyumun işlenmesi sırasında, kesici takım, Tablo 6.1' de de görüldüğü gibi, titanyumun bazı karakteristikleri sebebiyle olumsuz şartlara maruz kalmaktadır.

Buna göre kesici takımların şu özelliklere sahip olması gerektiği söylenebilir[9]:

- Meydana gelen ve uzaklaşamayan yüksek ısıya direnç gösterebilmesi için, "kızıl sertlik" özelliği iyi olmalıdır,
- Krater aşınmasına direnç gösterebilmesi için, "difüzyon ve abrasif tip aşınmalara dayanım" ve "kimyasal kararlılık" özellikleri iyi olmalıdır,

- Kuvvetlerin dar bir alana yayılması, tırlama olasılığı ve kraterlerle ucun zayıflaması durumlarına karşı, özellikle uç kısımda "tokluk" değerinin yüksek olması gerekmektedir,
- Isı malzemeden uzaklaşamadığı için, diğer malzemeler için kullanılan uçlara göre "ısıl iletkenlik" değeri yüksek olmalıdır,
- Talaş kalınlığının küçük olması nedeniyle, daha rahat talaş kaldırabilmek için "uç keskinliği" yüksek olmalıdır.

Tablo 6.1 Titanyum ve alaşımlarının karakteristik özelliklerinin kesici takıma etkisi[9]

Malzeme Karakteristikleri	**Kesici Takıma Etkisi**
Mukavemetin yüksek sıcaklıklarda korunması	Yüksek kuvvet ve ısıların oluşması
Dar talaş/takım temas alanı	Kesme kuvvetinin ve ısının yoğunlaşması
Isıl iletkenliğin düşüklüğü	Isının sıkışıp yükselmesi
Periyodik talaş oluşumu ve düşük elastisiteden kaynaklanan değişken kuvvetler	Vibrasyon ve tırlama
Kimyasal reaktifliğin yüksek olması	Özellikle krater aşınması olmak üzere kimyasal tabanlı aşınmalar

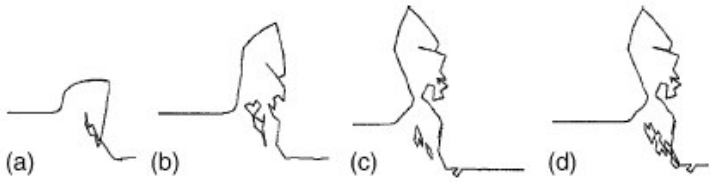
Titanyumun ısıl iletkenliği düşük (örneğin çeliğin 1 /6'sı kadar) olduğu için oluşan ısının yaklaşık % 80'i takım üzerinde kalmaktadır. Bu değer, çelikte %45-50 arasında değişmektedir[9].

Titanyumda ise ısının, iş parçası boyunca uzaklaşamadığı için takım üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, düşük ısıl iletkenlik nedeniyle yüzeyin 20 µm ile 70 µm altında uzun süre sıkışıp kalan ısı, malzemenin bu kısmına ait sertliğin, aşırı-yaşlanmaya bağlı olarak ortalama sertliğin bir hayli altına düşmesine sebep olur[8].

Grafikte ayrıca, seramik gibi ısıl iletkenlikleri düşük takımlarda ısının, çeliğin işlenmesine göre çok daha fazla bir kısmının takıma aktarıldığı görülmektedir. Bu durumda ısı, takımdan da uzaklaşmayacak ve ısıl tabanlı aşınma mekanizmaları ileri düzeyde etkili olacaktır. Çelik işlenirken ise ısı iş parçası boyunca uzaklaşabilmektedir[15].

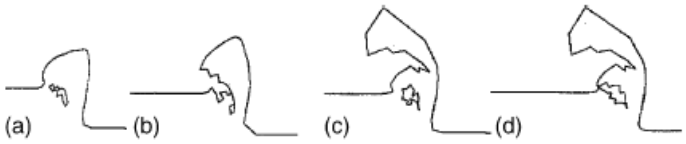
Titanyumun işlenmesinde pek rastlanmayan parçalı talaşın oluşumunda, Şekil 6.1 (a) da gösterilen ilk çatlak, sürekli/testere dişli talaşta da olduğu gibi, en yüksek asal ve kayma gerilmelerinin bulunduğu, takımın uç bölgesindeki birincil deformasyon bölgesinde ortaya çıkar. Daha sonra diğer aşamalarda görüldüğü üzere, takımın

bulunduğu kısma doğru ilerler ve orada da son bulur. Birkaç ayrılmadan sonra, Şekil 6.1 (d)de gösterildiği gibi büyüyen kayma açısının yanı sıra artan talaş ağırlığı sonucu, takım tarafından da desteklenmemiş olan talaş kırılır[15].



Şekil 6.1 Parçalı talaş oluşumuna ait evreler[15]

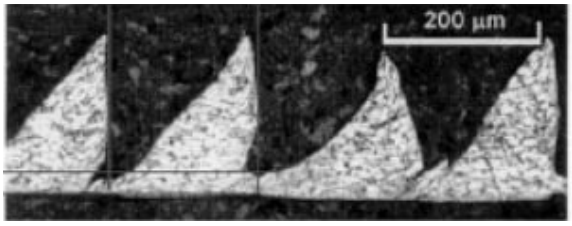
Sürekli/testere dişli talaş oluşumunda ise oluşan ilk çatlak işlenmemiş parça yüzeyine doğru ilerler ve orada son bulur. Şekil 6.2 (d) de gösterildiği gibi talaşın sürekli olan kısmı takım tarafından desteklenir ve talaş kırılmadan uzun süre devamlılığını korur. Bir süre sonra sarım yapacak ve kaymaya başlayacak olan talaş, talaş yüzeyinde takımın ucuna yakın bir bölgede, takımı aşındıracak şekilde şiddetli bir kayma gerilmesine ve bunun sonucu yüksek sıcaklığa sebep olarak ikincil deformasyon bölgesini oluşturur[7].



Şekil 6.2 Sürekli/testere dişli talaş oluşumu evreleri[15]

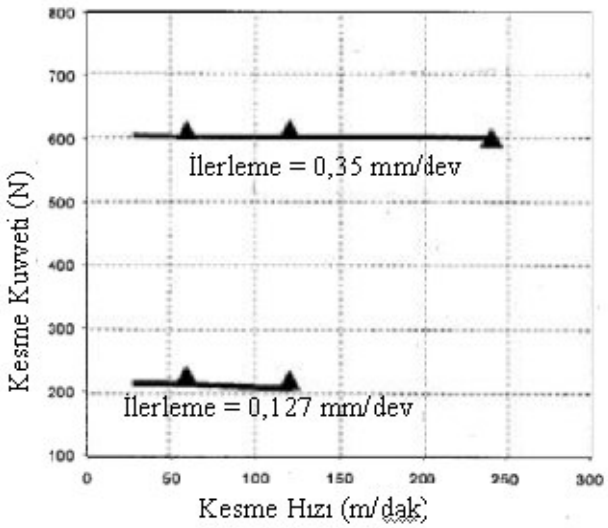
Profili Şekil 6.3 'te gösterilen sürekli/testere dişli talaş tipi titanyumun işlenmesinde, özellikle kesme hızının belirli bir değerin üzerinde olduğu durumlarda, çok sık karşılanan talaş tipidir. Bu tip bir talaş değişken bir yüke sebep olur ve özellikle rijit olmayan sistemlerde, sistemdeki boşluklar nedeniyle "tırlama" meydana gelir[6].

Kesme kuvvetlerinin dalgalanma periyodu ile talaşta oluşan dişlerin oluşma frekansı çakışmaktadır. Böyle bir durumda, takım ömrü önemli ölçüde düşeceği için, sistem mümkün olduğunca rijit olmalı ve takım malzemesi de "tok" seçilmelidir. Tırlamaya sebep olan bir diğer unsur olan "sehim", çeliğe göre 2 misli değerindedir ve düşük elastisite modülünden kaynaklanır. Takım malzemeye her girdiğinde, bir sıçrama etkisi yaşanır. Ayrıca, tırlamanın sebep olduğu dalgalı yüzeye, takım bir sonraki devirde veya dişte tekrar temas edecek ve tırlama "rejeneratif tırlama" denilen mekanizma ile belirli bir sınıra kadar, giderek şiddetlenecektir[9].



Şekil 6.3 Sürekli/testere dişli talaşın profili[9]

Bunların dışında, titanyum işlenirken takıma gelen yük çok küçük bir alana yayılmaktadır. "Temas Genişliği" çelik işlenirken 24 µm iken, titanyumun işlenmesinde 8 µm' ye düşer. Çeliğin işlenmesi için gerekli olan kuvvet, titanyum için gerekli olan kuvvetle yaklaşık aynı olsa da, oluşan gerilmenin titanyumda 3-4 misli olmasının en önemli sebebi budur. Bu alan darlığı, takımın aşınmasını hızlandıran ısıl yoğunlaşmaya da yol açmaktadır. Titanyum ve alaşımlarının 500 °C' yi aşan sıcaklıklarda, neredeyse tüm malzemelerle reaksiyona girmesi ve sonuçta kimyasal tabanlı aşınma mekanizmalarının etkili olması da, takım ömrünü önemli ölçüde etkilemektedir. Buna göre, kimyasal olarak kararlı takımlar ve etkili soğutma sıvıları kullanılmalıdır[14].

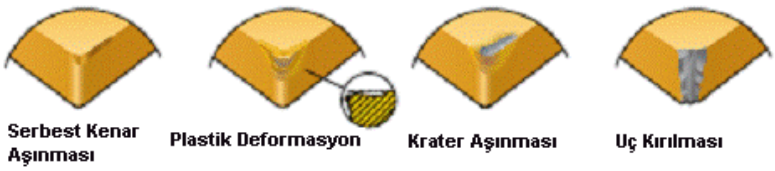


Şekil 6.4 Ti6Al4V için kesme hızı kesme kuvveti ilişkisi[9]

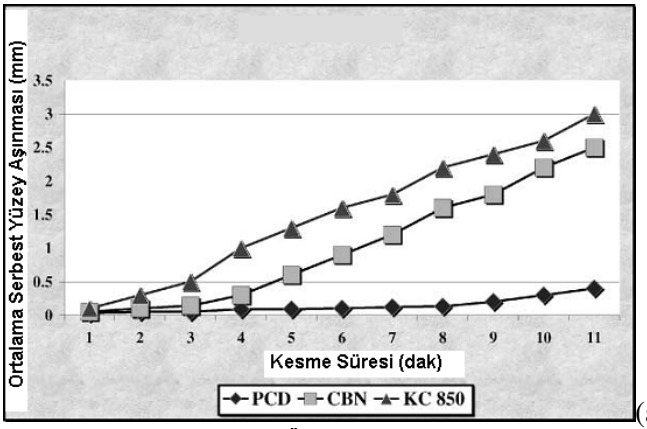
Son olarak, Ti6Al4V üzerinde, çeşitli kesme hızı ve ilerleme değerleri ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen ve Şekil 6.4 'te görülen grafikten de anlaşıldığı gibi, kesme hızı artsa da, iş parçası mukavemetini kaybetmemektedir. Bu arada artan sıcaklıkla mukavemetini yitiren takım ise hızla aşınmaktadır[11].

Tüm bu olumsuz etkiler sonucu, özellikle Şekil 6.5 'de temsili olarak gösterilen üç aşınma tipi ortaya çıkmaktadır. Takımın serbest yüzeyinin işlenmiş yüzeye

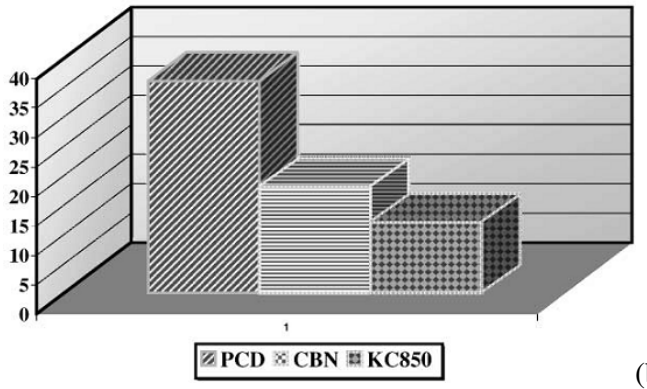
sürtünmesi ile meydana gelen "serbest yüzey aşınması", kimyasal reaktifliği yüksek olan titanyumun yüksek gerilmeler altında takıma yapışmasının ardından çekilip alınması ile, difuzyon aşınmasının da etkisi ile oluşan akış yönünde pürüzsüz kanallar meydana getiren "krater aşınması" ve daha çok kırılma tokluğu düşük olan takımlarda, serbest yüzey aşınması ve krater aşınması ile desteksiz kalan takımda meydana gelen "kırılma". Serbest yüzey aşınmasının her malzemede meydana geldiği ve kırılmanın da bir sonuç olduğu düşünülürse, bu aşınma mekanizmaları arasında krater aşınması, üzerine durulması gereken mekanizma olarak düşünülebilir[9].



Şekil 6.5 Titanyumun işlenmesinde baskın olan aşınma tipleri[16]



(a)



(b)

Şekil 6.6 Serbest yüzey aşınması (a), Takım ömrü (b)[9]

Kaplamalı karbür, CBN ve PCD takımlar kullanılarak yapılan deneyler sonucunda, serbest yüzey aşınmasına dair elde edilen sonuç, Şekil 6.6 (a)' daki grafikte görülmektedir. Buna göre, PCD takım kullanıldığında, aşınma önemli ölçüde azalmaktadır. Aynı deney sonucunda elde edilen takım ömrü değerleri, Şekil 6.6 (b)' de gösterilmiştir. En iyi sonuç, yine PCD takımlarla alınmıştır. Aynı deneyde, yüzey pürüzlülüğü değerleri de ölçülmüştür. En iyi sonucu PCD takımlar vermiştir. Bu takımlarla, 10 dakikalık kesme süresinin ardından dahi, yüzey pürüzlülüğü 2 µm düzeylerinde kalmıştır[9].

Titanyum alaşımlarının işlenmesi açısından takım malzemelerinin performansı Tablo 6.2' de özetlenmiştir[9].

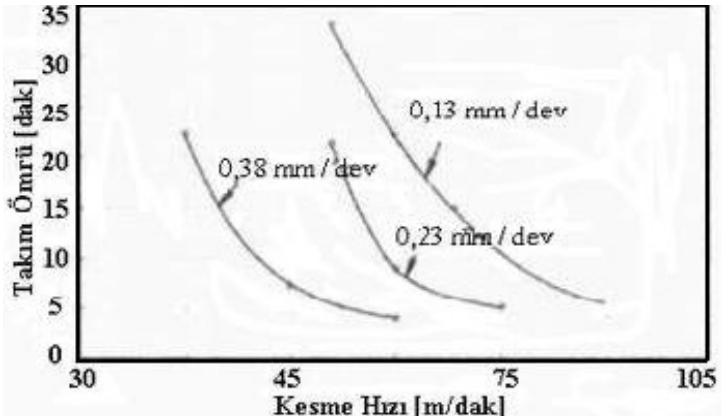
Tablo 6.2 Titanyum alaşımlarının işlenmesinde çeşitli takımların performansı[9]

Seramik Takımlar	♦ Isıl iletkenlikleri düşüktür. Malzemeden uzaklaşamayan ısı, takımdan da uzaklaşamaz ve ısıl tabanlı aşınma mekanizmaları üst düzeyde etkili olur, ♦Titanyum işlenirken, krater + serbest yüzey aşınması ile oluşan kırılmanın, yüksek gerilmelerin ve değişken yüklerin gerektirdiği "tokluk" özelliği, seramiklerin en büyük eksikliğidir, ♦Titanyumla tepkime eğilimleri oldukça yüksektir. ♦ Bu sebeplerden dolayı tavsiye edilmezler.
Hız Çeliği Takımlar	♦ Oluşan yüksek ısı ve gerilmeler sonucu, kısa sürede plastik deformasyona uğramakta ve ardından kırılmaktadırlar. ♦ Aralıklı kesme işlemleri dışında tavsiye edilmezler.
Kaplamalı Karbür	♦ Özellikle CVD olmak üzere, yukarıdaki deney sonuçlan da düşünülürse tavsiye edilmezler. Kaplama, kısa sürede kopmaktadır.
Kaplamasız Karbür Takımlar	♦ Kaplamalı olanlara göre daha iyi sonuç vermektedirler. Bunun sebebi, kaplamalı karbürlerde, takım ana malzemesinin kaplama ile birlikte koparılmasıdır. ♦ Karbür takımlar arasında, özellikle K sınıfı tungsten karbür takımlar, tokluk için %6'lık kobalt eklenmesi ile, genel amaçlı talaş kaldırma işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sementit karbür ise, iyi sonuçlar vermemektedir.
CBN ve özellikle PCD Takımlar	♦ Aşınmalara karşı çok iyi direnç göstermektedirler. Diğer taraftan, pahalı oluşları, kullanımlarını kısıtlamaktadır. Ancak, ince işlemlerde yüksek yüzey kalitesi ve uç değiştirme sıklığının azalması ile alakalı olan kalite tutarlılığı isteniyorsa, tercih edilmelidirler.

6.1.2 Kesme Hızı

Titanyumun işlenebilirliğini kısıtlayan en önemli unsurun ısıl tabanlı aşınmalar olması ve sıcaklığı etkileyen en önemli kesme parametresinin "kesme hızı" olması nedeniyle titanyumun işlenmesinde kesme hızı önemli bir yere sahiptir. Uygulamalarda çeliğin işlenmesinde kullanılan değerlerin % 10-35' i arası kesme hızları kullanılır. Ancak, işleme aşamasına kadar maliyeti artan ve işlenirken de büyük oranda talaş olarak atılan titanyum, bu maliyet artışlarının bir oranda telafi edilmesi için mümkün olduğunca yüksek hızda işlenmelidir. Buna karşın kesme hızının artması ile sıcaklığın artması, sürekli/testere dişli talaşın oluşması ve bu oluşumun sıcaklığı daha da arttırırken tırlamaya da sebep olması, kesici takım mukavemetini yitirirken iş parçasının mukavemetini koruması, yüzey kalitesinin belirli hız değerlerinden sonra muhtemelen takımdaki aşınmaya bağlı olarak düşmesi ve ayrıca yüzeye yakın bölgelerde mikro-yapının bozulması ve sertliğin artması problemleri söz konusudur. Dolayısıyla günümüz teknolojisinde çıkılabilecek en yüksek değer 90-100 m/dak ile sınırlıdır. Tornalama için 150 m/dak 'da yaklaşık 10 m mesafede meydana gelen aşınma, kesme hızı 100 m/dak değerine düştüğünde 100 m mesafede oluşmaktadır. Kesme hızının arttırılması ile talaş, tam anlamıyla sürekli bir karakter kazanmakta ve takım aşınmasının etkisi artmaktadır[9].

Ti6Al4V malzemesinin K20 kalitesinde karbür bir takımla işlendiği, sonuçları Şekil 6.7' de görülen bir deneyde, kesme hızı-ilerleme ve takım ömrü ilişkisini veren sonuçlara göre, kesme hızı arttıkça takım ömrü azalmaktadır[11].



Şekil 6.7 Kesme hızı-ilerleme-takım ömrü ilişkisi. Malzeme:Ti6Al4V, Takım : Karbür [11]

Körelmiş takımlar ve yüksek gerilmelerin söz konusu olduğu kesme koşullarının taşlama işleminde, tornalama ve frezelemedekinin aksine, yorulma ömrünü düşüren çekme tipi artık gerilmelere ve ayrıca mikro-çatlaklara neden olduğu görülmüştür. Her koşulda, maliyet, süre ve kalite ölçütlerine göre optimum değerlerin aranması ideal yaklaşım olsa da bir fikir vermesi açısından Tablo 6.3' teki değerler, bir bütün olarak düşünülmesi gereken kesme parametrelerinin tipik değerleri olarak verilebilir[9].

Tablo 6.3 Titanyumun işlenmesinde kullanılan tipik kesme parametreleri[9].

Yöntem	**Takım**	**Kesme Hızı [m/dak]**	**Kesme Derinliği [mm]**	**İlerleme**
Kaba Tornalama	Karbür (K20)	30-50	8	0,25-0,35 mm/dev
İnce Tornalama	Karbür (K20)	80-100	0,25- 1	0,1 -0,2 mm/dev
Frezeleme	HSS (M421	40-60	3,5-5	0,1-0,15 mm/diş
Delme	Karbür (K20)	10-20	-	0,1 mm/dev
Broşlama	HSS (M3)	3-4	-	0,075 mm/diş

6.1.3 İlerleme

Genel olarak talaşlı imalatta ilerlemenin tek sınırlayıcısı yüzey kalitesi olsa da titanyum işlenirken ilerlemenin takım ömrünü daha fazla etkilemesi[9]:

- sıcaklığın tehlikeli seviyelerde olması ve ısıl iletkenliğin düşük olması sonucu aşınmanın ısıl tabanlı olmasına bağlı olarak ilerlemenin karekökü ile doğru orantılı olan takım/talaş kesiti sıcaklığının ilerleme ile artarak aşınma mekanizmalarının etkinliğini arttırmasına,
- takım/talaş temas alanının çok dar olmasına bağlı olarak ilerlemenin yarattığı küçük kuvvet artışının daha etkili olmasına

bağlanabilir.

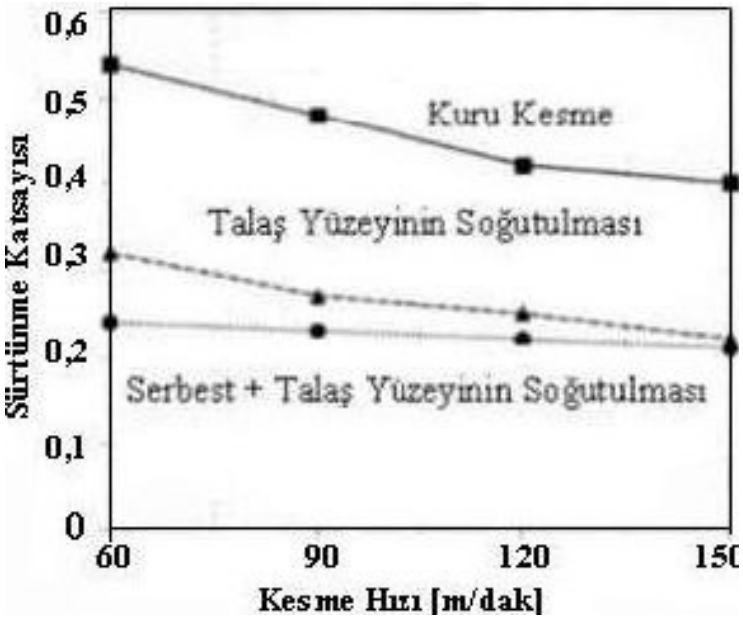
Şekil 6.7 'deki grafiğe ilerleme açısından bakıldığında da anlaşıldığı gibi, ilerleme de kesme hızı kadar olmasa da takım ömrünü önemli ölçüde etkilemektedir. Örneğin, 75 m/dak 'da, ilerleme hızı 0.13 mm/dev 'den 0.23 mm/dev 'e çıktığında takım ömrü yarı yarıya azalmaktadır. Ancak, verimliliği arttırma gerekliliği ve kesme hızının zararlı etkisi düşünüldüğünde kesme hızından ziyade ilerlemenin mümkün olduğunca arttırılması yerinde olacaktır[2].

6.1.4 Kesme Derinliği

Titanyumun işlenmesinde kesme derinliği kesme hızından sonra en etkili değişken olarak göze çarpmaktadır. Kesme derinliğinin artması ile birlikte hem talaş yükü artarak gerilmeleri arttırmakta, hem de artan talaş yükü ile artan sürtünme kuvveti ve dolayısıyla ısı, bu ısının uzaklaşmasının da zorlaşması ile daha etkili olmaktadır. Titanyumun işlenmesinde takım ömrünü etkileyen en önemli değişken olan sıcaklık kesme derinliğindeki artışla çok yüksek değerlere çıkmaktadır. Malzemenin yorulma ömrünü etkileyen artık gerilmelerin ise frezeleme sonrasında, yorulma ömrünü arttıracak şekilde tornalamada olduğu gibi sürekli olarak bası tipinde oluştuğu, ayrıca kesme derinliğinin artması ile birlikte mutlak olarak azaldığı görülmüştür[1].

6.1.5 Kesme Sıvısı Kullanımı

Titanyumun işlenmesinde en önemli sorunların 1100 °C' ye varan yüksek kesme sıcaklıkları ve dolayısıyla yüksek ısı ve yapışmanın gerçekleştiği aşınma mekanizmaları olduğu düşünülürse kesme sıvılarının kullanılması gerektiği rahatlıkla söylenebilir. Düşük hızlarda bor yağı yeterli olurken, yüksek kesme hızlarında ve delme, broşlama işlemlerinde, korozyon riski taşısa da klor içerikli kesme yağlarının kullanılması gerekmektedir. Geleneksel kesme sıvıları soğutma özelliklerinin yanında yüksek viskoziteleri ile yağlama işlevi de görürken, soğuk kesmede kullanılan sıvı azot gibi sıvılar çok daha düşük kesme sıcaklıkları sağlamaları ile bilinirler. Bunun yanında, Şekil 6.9' daki grafikte de görüldüğü gibi, yüksek basınçla talaş/takım nüfuz etmeleri sayesinde geleneksel kesme sıvıları kadar olmasa da sürtünme etkisini azaltarak, ve ayrıca sıcaklığın düşmesi ve takım sertliğinin korunması ile takım/talaş arasındaki yüksek yapışma eğilimini kısmen yok ederek, sürtünme katsayısını düşürürler ve böylece yağlama etkisi de yaparlar[8].



Şekil 6.8 Sıvı azotun sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi. Yöntem : tornalama, takım = K20 (kaplamasız), kesme derinliği = 1,27 mm, ilerleme = 0,254 mm/dev.

Bu olumlu etkiler sayesinde kimyasal aşınmaları önemli ölçüde engeller ve takım ömrünü arttırırlar. Bunun yanı sıra bu maddelerin çevreye zararı yoktur. Ancak azot kesme sıvıları gibi devri daim ettirilemez, buharlaşır ve daha fazla gerçekleşen soğuma nedeniyle gerekli kesme kuvveti % 6-7 artar. Bir başka önemli husus olarak klasik bir soğutmada sıcaklık, özellikle sürekli kesmede, çok az miktarda düşmektedir. Bu verimsizlik soğutucunun tam olarak kesme bölgesine yönlendirilmesi ile aşılabilir. Bu tip bir soğutma devri daimin olmadığı soğuk kesmede şarttır[9].

6.1.6. Sonuçlar

İşlenmesi-zor malzemeler grubunda olan titanyumun işlenebilirliği ile ilgili bu bilgilerin ışığında, aşağıdaki sonuçlara varılabilir[9]:

- Titanyumun işlenmesinde ana oluşum nedeni sürekli/testere dişli talaş oluşumu ve düşük elastisite modülü olan tırlamaya karşı rijit bir sisteme ve tok takımlara gereksinim vardır.
- Hız çeliği takımlar aralıklı kesme işlemlerinde kullanılabilse de, düşük maliyet ve kalite unsurlarını bir arada sağlamaları ile K sınıfı tungsten karbür takımlar, genel amaçlı talaşlı imalat işlemleri için en iyi seçim olacaktır.

Kaplamalı karbürler ise, kaplamanın bir miktar takım ana malzemesiyle beraber kısa sürede kopması nedeniyle genelde tavsiye edilmezler.

- CBN ve PCD takımlar pahalı olsalar da standart takımlardan çok daha iyi yüzey kalitesi ve takım ömrü değerleri vermektedirler. Bu takımlar da bir seçenek olarak düşünülmeli ve yapılacak imalatın maliyet, zaman ve kalite değerlerine göre bir karar verilmelidir.
- Dönel takımlar takım ömründe belirgin bir artış sağlarken yüzey kalitesini de iyileştirmektedirler. Bu takımların kullanılmasını kısıtlayan unsurlar yapılacak imalat için engel değilse kullanılmaları tavsiye edilebilir.
- Verimliliği ve yüzey kalitesini arttırsa da kesme hızı takım ömrünü en çok etkileyen kesme parametresi olarak en çok kısıtlanması gereken parametredir.
- İlerleme titanyumun işlenmesinde takım ömrünü diğer malzemelerde olduğundan daha fazla etkilese ve yüzey pürüzlülüğünü arttırsa da verimliliğin arttırılmasında kesme hızına tercih edilmelidir.
- Titanyumun işlenmesinde kesme hızından sonra takım ömrünü etkileyen en önemli parametre olan kesme derinliği, sıcaklığı, dolayısıyla takım aşınmasını ve yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı için küçük tutulmalıdır.
- Kalıntı gerilmeleri tornalama ve frezeleme işlemlerinde yorulma ömrünü arttıracak şekilde bası tipinde oluşsa da, körelmiş takımlarla ve yüksek gerilmeli kesme koşulları altında yapılan taşlama işlemlerinde bu gerilmelerin çekme tipinde oluştuğu unutulmamalıdır.
- Titanyumun işlenmesinde en önemli sorun olan yüksek sıcaklıkların aşılması için kesme sıvısı kullanılmalıdır. Sıvı azot gibi yeni soğutucu maddelerin yağlayıcı özelliklerinin olduğu da ispatlanmıştır.
- Titanyumun işlenmesinde ısı çok dar bir alanda etkili olmaktadır. Buna göre kesme sıvısı tam olarak kesme bölgesine odaklanmalıdır.

7. TİTANYUM ALAŞIMLARININ UYGULAMA ALANLARI

Bu bölümde, çok geniş kullanım alanına sahip olan titanyum ve alaşımlarının çeşitli uygulama örnekleri özetlenmiştir. Resimler [23] no.lu kaynaktan alınmıştır.

7.1. Enerji Ve Kimya Sanayi

Yüksek dayanımın gerekmediği, daha çok korozyon özelliklerinin ön planda tutulduğu bu tür uygulama alanlarında alaşımların yerine daha çok saf titanyum kullanılır. Bu tür uygulamalarda titanyumun korozyon dayanımından ötürü ekonomik olmaktadır. Tabaka tipi ısı değiştiricileri titanyumun yaygın olarak kullanıldığı ve korozyon özelliğinin ön planda tutulduğu uygulamaların başında gelmektedir. Şekil 7.1 ve 7.2 de ticari saflıktaki titanyum kullanılarak imal edilmiş ısı değiştiriciler görünmektedir [1].

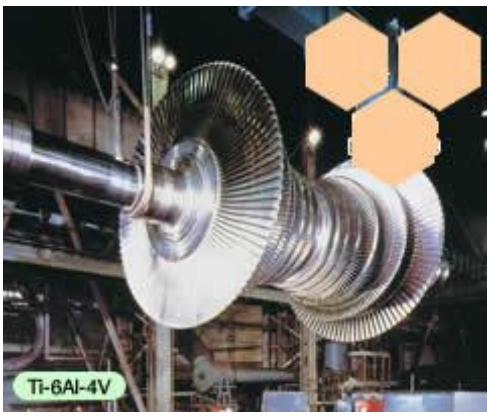
Enerji üretim tesislerinde kullanılan buhar türbin bıçakları da Şekil 7.3 de gösterilmektedir. Kritik uygulama alanlarından biri olan ve nukleer enerji tesislerinde kullanılan kondenserler yüksek sızdırmazlık ömrü nedeniyle tercih edilmektedir (Şekil 7.4).



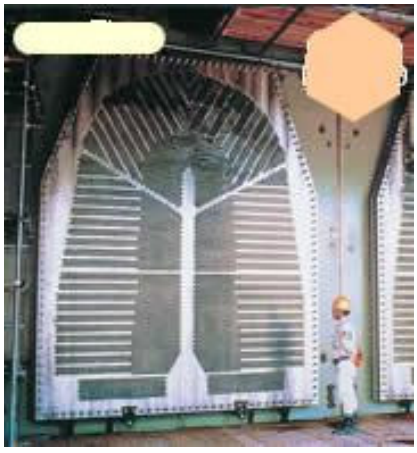
Şekil 7.1 Tabaka tipi ısı değiştirici



Şekil 7.2 Kimya sanayi için ısı değiştirici



Şekil 7.3 Buhar türbini bıçakları



Şekil 7.4 Enerji tesisleri için kondanser

7.2. Uzay ve Havacılık Sanayinde

Titanyum ve alaşımlarını uçak ve uzay sanayinde tercih sebebi yapan kilit özellikleri; yüksek özgül mukavemet, yüksek yorulma dayanımı, yüksek sürünme dayanımı ve yüksek kırılma tokluğu olarak sıralanabilir.

Şekil 7.4,7.5 ve 7.6 da düşük ağırlık ve yüksek mukavemet özellikleri nedeniyle titanyum alaşımları kullanılarak üretilmiş bir turbofan motoru, buhar türbini kafesi ve roket yakıt tankı gösterilmiştir. Titanyum üzerine yapılan araştırmalar neticesinde jet motorlarının yüksek sıcaklıklara ulaşan bölgelerinde sürünme dayanımı arttırılmış bu sayede de ömürleri ve verimlilikleri arttırılmıştır.



Şekil 7.5 V2500 turbofan motoru



Şekil 7.6 Buhar türbini kafesi



Şekil 7.7 Roketlerde kullanılan yakıt tankı

7.3. Denizcilik Uygulamaları

Denizcilik uygulamalarında da yine yükzek korozyon direncinin yanısıra yüksek mukavemetin önem kazandığı alanlarda kullanılmaktadır. Şekil 7.8 de görüldüğü gibi denizaltının dış gövdesi titanyum alaşımı ile kaplanarak hem mukavemet hem de korozyon dayanımı sağlanmış olur. Şekil 7.9 da ise ticari saflıktaki titanyum sürekli deniz suyu içinde bulunan deniz çiftliklerinde kullanılmıştır. Şekil 7.10 da da farklı bir uygulama alanı olarak göze çarpan deniz kenarı korkuluklarında titanyum kullanılmıştır.



Şekil 7.8 Denizaltı araçların basınca dayanıklı dış kabuklarında



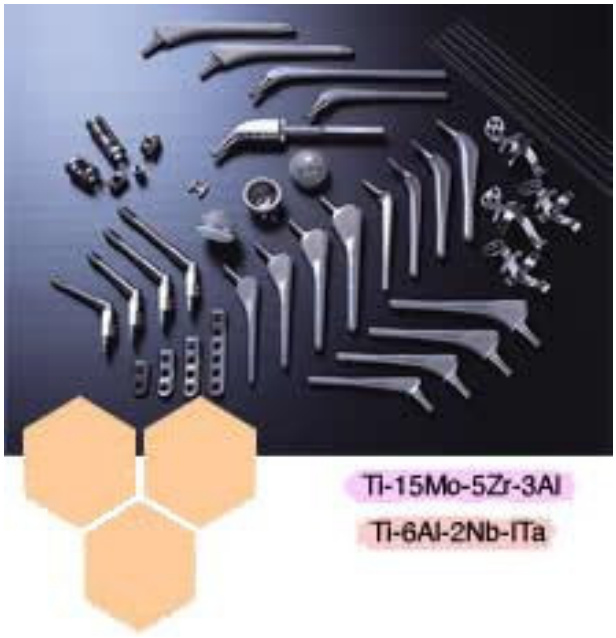
Şekil 7.9 Balık çiftliklerinde



Şekil 7.10 Deniz kenarı korkuluklarında

7.4. Medikal Uygulamalar

Medikal uygulamalarda titanyumun tervih edilmesinin altında yatan nedenlerin başında vücut sıvılarının neden olduğu korozyona dayanıklı olmasından dolayı insan vucuduna uyum sağlamasıdır. Medikal uygulamalarda titanyum ve alaşımları yapay kan pompaları ve yapay kalplerden, kalça ve diz proteslerine kadar geniş bir yelpazede yer bulmaktadır. Titanyum alaşımlarının protez olarak kullanılmalarının çok önemli bir nedeni de kemik dokuları ile çok kuvvetli ve uzun ömürlü bir bağ oluşturmalarıdır. Şekil 7.11 de çeşitli protez parçaları görünmektedir.



Şekil 7.11 Çeşitli protez parçaları

8. DENEYSEL ÇALIŞMA

En çok kullanılan titanyum alaşımı olan Ti-6Al-4V alaşımının işlenebilirliği üzerine yapılan deneysel çalışma, İTU Makine Fakültesi Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojileri Ana Bilim Dalı' nın Malzeme ve CAD/CAM laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

8.1. Fiziksel ve Kimyasal Özellikler

Deneylerde kullanılan Ti-6Al-4V malzemeye ait bazı fiziksel özellikler yaygın olarak kullanılan diğer bazı malzemeler ile karşılaştırmalı olarak Tablo 8.1 'de verilmiştir.

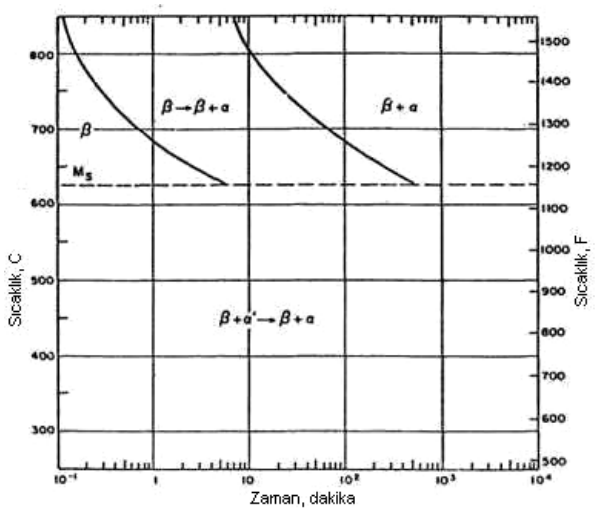
Tablo 8.1 Ti-6Al-4V alaşımının fiziksel özelliklerinin karşılaştırmalı özeti[23]

	Ticari Saflıktaki Titanyum	Titanyum alaşımı Ti-6Al-4V	Demir	Paslanmaz Çelik		
				304	Ostenitik	Ferritik
Kristal yapı	SDH<885ºC<HMK	SDH< yaklaşık990ºC <HMK	HMK< 830ºC <YMK	YMK	YMK	HMK
Yoğunluk g/cm^3	4.51	4.42	7.9	8.0	8.0	8.0
Ergime derecesi(ºC)	1668	1540-1650	1530	1400-1427	1320-1400	1400
Young Modülü GPa	106	113	192	199	204	215
Elekrik direnci (μΩ-cm, 20ºC)	47-55	171	9.7	72	90	72
Elektirik iletkenliği	3.1	1.1	18.0	2.4	1.9	2.4
Isıl İletkenlik (W/mºC)	17	7.5	62	16	13	17
Isıl genleşme (X10^{-6}/ºC)[0~100ºC]	8.4	8.8	12	17	16	16
Özgül Isı(J/kg-K)	520	520	460	500	500	450
Isınma Isısı (J/m^3-K)	2.4X10^6	2.3X10^6	3.6X10^6	4.0X10^6	4.0X10^6	3.6X10^6

Tablo 8.1 Ti-6Al-4V alaşımının fiziksel özelliklerinin karşılaştırmalı özeti (Devam)

	Alüminyum	Alüminyum Alaşımı 7075	Magnezyum Alaşamı AZ31	Hastelloy C	Bakır	Zirkonyum	Cam
Kristal yapı	YMK	YMK	SDH	YMK	YMK	SDH< 863ºC <HMK	Amorf Yapı
Yoğunluk g/cm^3	2.7	2.8	1.8	8.9	8.9	6.5	2.4
Ergime derecesi(ºC)	660	476-638	838-905	1305	1083	1852	800
Young Modülü GPa	69	71	45	205	117	89	98
Elekrik direnci (μΩ-cm, 20ºC)	2.7	5.8	9.3	130	1.7	40-54	-
Elektirik iletkenliği	64.0	30.0	18.5	1.3	100	3.1	-
Isıl İletkenlik (W/mºC)	203	120	96	12	381	17	1
Isıl genleşme (X10^{-6}/ºC)[0~100ºC]	23	23	26	12	17	6	9
Özgül Isı(J/kg-K)	880	960	960	1050	390	290	1050
Isınma Isısı (J/m^3-K)	2.4X10^6	2.7X10^6	1.9X10^6	3.5X10^6	3.5X10^6	1.9X10^6	2.5X10^6

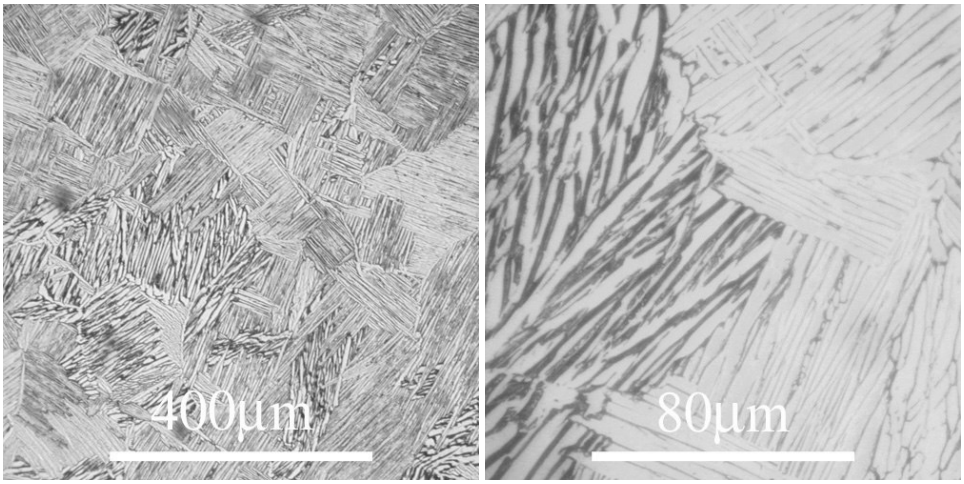
Bu alaşıma ait Zaman-Sıcaklık Dönüşüm diyagramı Şekil 8.1 ‘de verilmiştir.



Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm Diyagramı

Şekil 8.1 Ti6Al4V alaşımına ait Zaman-Sıcaklık- Dönüşüm diyagramı[5]

Mikroyapı fotoğrafı da Şekil 8.2 ‘de gösterilmiştir.



Şekil 8.2 Ti-6Al-4V alaşımına ait mikroyapı fotoğrafı.

Literatürden alınan bilgiler ışığında malzemenin kimyasal bileşimi maksimum % olarak şu şekildedir: %6 Al, %4 V, %0.05 N, %0.10 C, %0.0125 H, %0.30 Fe, %0.20 O.

Yine literatürden toplanan bilgilere göre malzemeye ait bazı mekanik özellikler de Tablo 8.2’de verilmiştir.

Tablo 8.2 Ti-6Al-4V alaşımına ait bazı mekanik özellikler

Çekme dayanımı	895 MPa
Akma dayanımı	825 MPa
Uzama	10%
Kesit daralması	20%
Charpy Kırma Enerjisi	27 J
Sertlik	36 HRC

8.2. Isıl İşlem

Kesme deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanan 16 mm çapındaki 100 mm boyundaki 3 adet Ti-6Al-4V alaşımına 3 farklı ısıl işlem uygulanmıştır. Isıl işlem parametrelerinin belirlenmesinde [2],[3],[4],[6] ve [9] nolu kaynaklardan yararlanılmıştır.

Daha önce de bahsedildiği gibi, titanyum yüksek sıcaklıklarda aktif kimyasal özelliklere sahip bir malzemedir. Ancak titanyumun ısıl işleminde yüzeyde oksit tabakası oluşturan oksijenden daha önemlisi gevrekleşmeye yol açan hidrojenin absorbsiyonudur. Ancak, vakum ve koruyucu gaz altındaki atmosferlerde yapılan ısıl işlemlerin maliyetli olması ve belirli miktarda hidrojen absorbsiyonun kabul edilebilmesi nedeniyle ısıl işlemler laboratuvarda bulunan LINN marka, 3.2 kW ısıtma gücü ve 1200ºC maksimum sıcaklık kapasitesine sahip P.I.D. kontrollü elektrikli tav fırınında yapılmıştır. Titanyumun tuz çözeltisi içinde yüksek sıcaklıklarda gerilmeli korozyona maruz kaldığı literatürde belirtildiği için ısıl işlemler normal fırın atmosferinde yapılmıştır.

Buna göre ilk önce 3 parça için de 750 ºC ‘de 4 saat süre ile tavlama işlemi uygulanmış ve havada soğutma gerçekleştirilmiştir. Numunelerden 1 tanesi bu şekilde kesme deneyleri için ayrılmıştır. Daha sonra diğer 2 numune su verme işlemi için 955ºC ‘de 1 saat bekletilmiş ve suda su verme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çözeltiye alma işlemi sonrasında parçaların fırından çıkarılıp suya götürülmeleri için geçen süre yaklaşık 1 s olarak gerçekleştirilmiştir. Literatürde bu süre 1.5 s (en fazla 2 s) olarak tavsiye edilmektedir. Bu iki numuneden biri yine kesme deneylerinde bu şekilde kullanılmak üzere ayrılmıştır. Sonra, son kalan numune 550ºC de 4 saat boyunca fırında yaşlandırılmış ve fırından çıkarılarak havada soğutularak ısıl işlemler tamamlanmıştır.

8.3. İçyapı İncelemeleri

Isıl işlemleri tamamlanan numunelerden 5 mm boyunda kesilen parçalar Metkon Metapress-M marka numune gömme cihazında bakalite gömülmüştür. Daha sonra yine Metkon marka Forcipol 2V model parlatma cihazı kullanılarak sırasıyla 400,600,1000,1200 kum zımparalar ve 1 mikron Alümüna solusyonu dökülmüş keçe ile zımparalanmış ve parlatılmıştır. Parlatma işleminin hemen ardından yüzeyde oksidasyona fırsat vermeden, literatürden edinilen bilgilere göre %10 HF, %5 HNO_3 ve %85 H_2O ile hazırlanan dağlayıcı kullanılarak 1 ila 3 saniye arasında, dağlayıcı

emdirilmiş pamuk ile numuneler dağlanmıştır. Dağlanan numunelerin içyapı incelemeleri yine malzeme labaratuvarında bulunan optik mikroskopta yapılmış ve fotoğrafları çekilmiştir.

8.4. Mekanik İnceleme

Mekanik deneyler laboratuvarındaki Shimadzu marka mikrosertlik ölçüm cihazında sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik değerleri 0,3 Kg yük altında yapılmış ve hem HV hem de HRC sertlikleri alınmıştır.

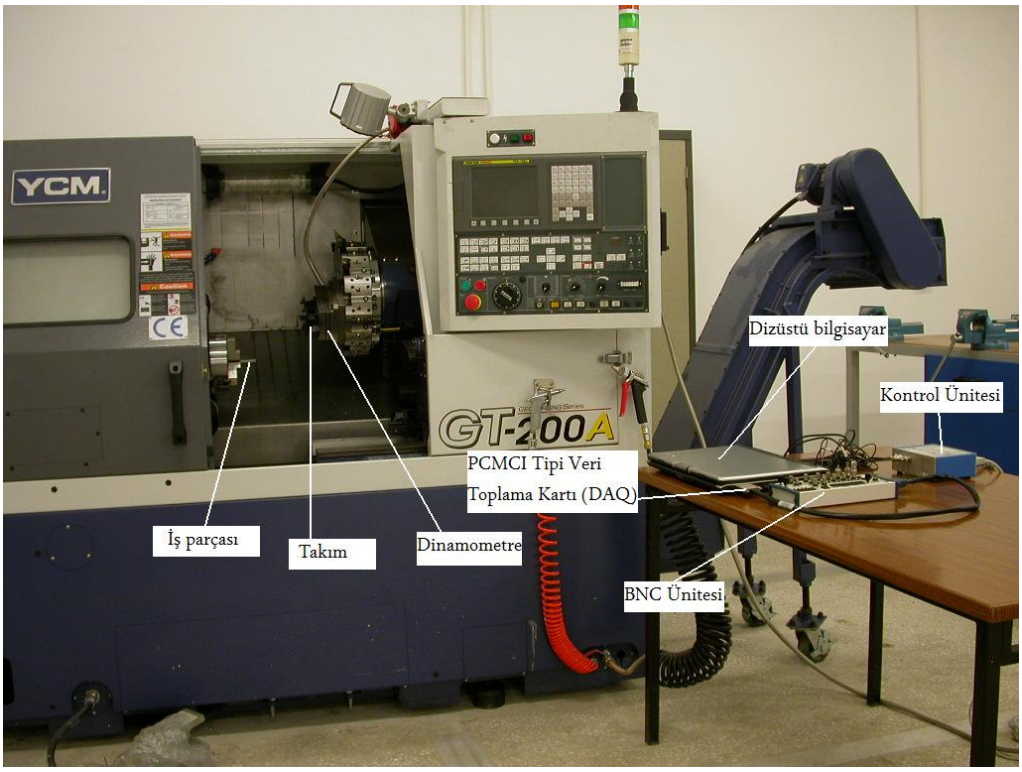
8.5. Talaşlı İmalat

Isıl işlemleri yapılan deney numunelerinin talaşlı işlemi, Şekil 8.3 'te gösterilen ve staj atelyesinde bulunan 2007 Tayvan yapımı YCM marka GT200A model CNC tornada gerçekleştirilmiştir. Torna tezgahı 6000 dev/dak maksimum devre sahip olup x ekseninde 150 mm, z ekseninde 360 mm maksimum eksen hareketlerine sahiptir. Boyuna tornalama için gerekli program tezgaha ait programlama ekranında yazılmıştır.



Şekil 8.3 Kesme deneylerinde kullanılan CNC Torna

Kesme sırasında kuvvet ölçümü için gerekli deney düzeneği Şekil 8.4 'te görüldüğü gibi takım ucundan sayısal değerlerin elde edilmesine kadar sırasıyla Kistler 9257BA dahili yükselticili dinamometre, Kistler kontrol ünitesi, NI BNC2120 BNC ünitesi, NI 6024E DAQ PCMCI veri toplama kartı ve PCMCI kart girişi olan bir dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. Yazılım olarak da LabView 8.2 programı kullanılmış ve bu program sayesinde kesme sırasında anlık olarak kaydedilen veriler MS Excel programına aktarılmış ve kuvvet grafikleri oluşturulmuştur.



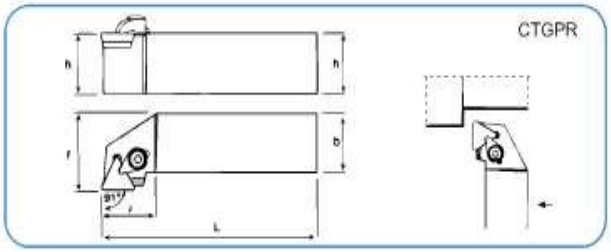
Şekil 8.4 Deney düzeneği

Kesme işlemleri sırasında BÖHLER marka TPUN 160308 nolu takım kullanılmıştır. ISO kodlama sisteminden bilindiği üzere takım geometrisi eşkenar üçgen (T), serbest açı 11^{o} (N), kenar ölçüsü toleransı +-0,27 mm (U), uç tipi talaş kırıcısız ve deliksiz (N), kenar uzunluğu 16 mm, kalınlık 3 mm ve uç radyüsü 0,8 mm 'dir. Takım tutucu olarak da Timax marka CTGPR 16 20*20 kullanılmıştır. Takım tutucuya ait üreticiden alınan ölçü bilgeleri Şekil 8.5 'te verilmiştir. Takım malzemesi WC olup kaplamasız ve talaş kırıcısız takım tercih edilmiştir.



Takım Kod No	Kater Ölçüleri (mm)					Kesici Uç
	h	b	L	I	f	
CTGPR 2020K 16	20	20	125	26	25	TPUN 160308

Yedek Parçaları				
Baskı parçası	Baskı Vidası$	Altlık	Altlık Vidası	Anahtar
				
BBP 16	BKBV 5M	BCT 16PA	M.4	AA05



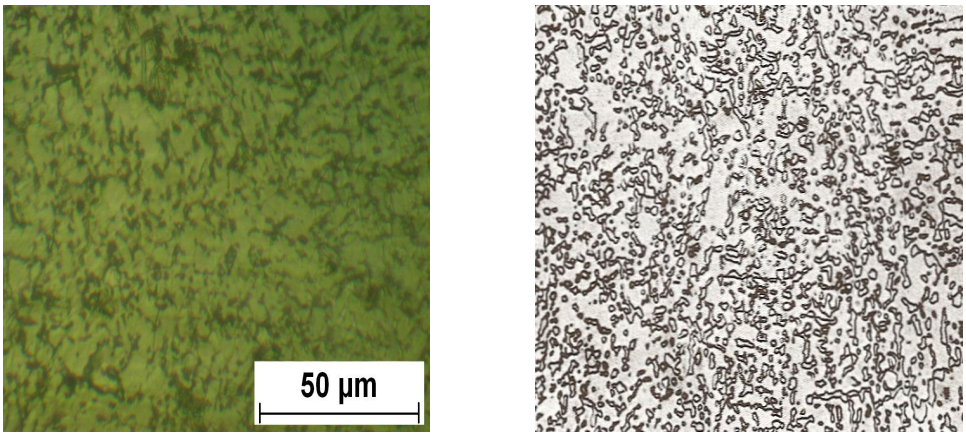
Şekil 8.5 Takım tutucuya ait bilgiler

8.6. Pürüzlülük Ölçümleri

Her kesme işleminden sonra yüzey pürüzlülük ölçümleri Mitutoyo marka SJ-201P model taşınabilir yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Bu ölçümler sırasında 0,8 mm ölçme boyu esas alınmış ve R_a değerleri kaydedilmiştir.

9. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Isıl işlemler sonucu elde edilen yapılara ait mikroyapı fotoğrafları Şekil 9.1, 9.2 ve 9.3 'te literatürden alınan resimlerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

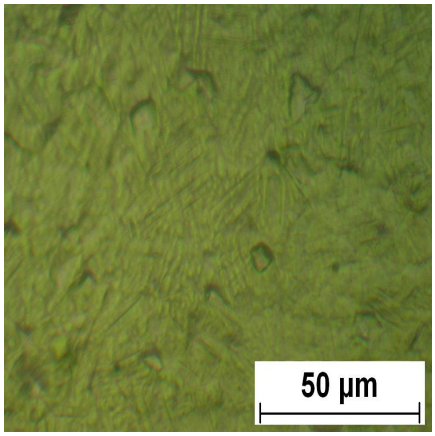


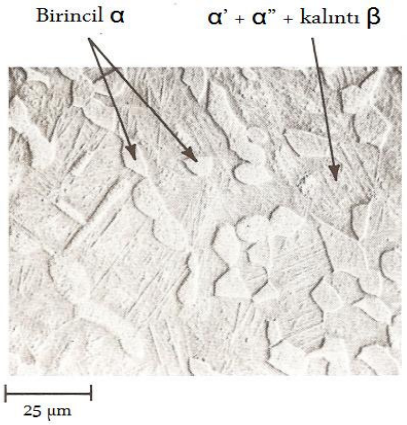
(a) (b)

Şekil 9.1 750 ºC de 4 saat tutulduktan sonra fırın ortamında 25 ºC ye dek soğutulmuş deney numunesi (a), [4] nolu kaynaktan alınan ve 750 ºC de 4 saat tutulduktan sonra fırın ortamında 25 ºC ye dek soğutulmuş Ti-6Al-4V mikro yapısı (b).

Şekil 9.1'de görüldüğü gibi β dönüşüm sıcaklığının çok altındaki bir sıcaklık olan 750 ºC ye kadar ısıtılan Ti-6Al-4V malzeme fırın ortamında soğutularak β fazının küresel olarak α matris fazı içinde oluşması sağlanarak nispeten yumuşak ve işlenebilirliği yüksek bir içyapı elde edilmiştir. Şekilde görülen koyu bölgeler β fazını, açık renkli kısımlar ise α fazını göstermektedir.

Yaklaşık olarak β dönüşüm sıcaklığının hemen altındaki bir sıcaklık olan 955 ºC 'de 1 saat boyunca tutulmuş ve suda su verilerek çok hızlı bir şekilde oda sıcaklığına indirilen Ti-6Al-4V alaşımına ait mikro yapı fotoğrafı ve [4] nolu kaynaktan alınan fotoğraf Şekil 9.2 'de bir arada verilmiştir.

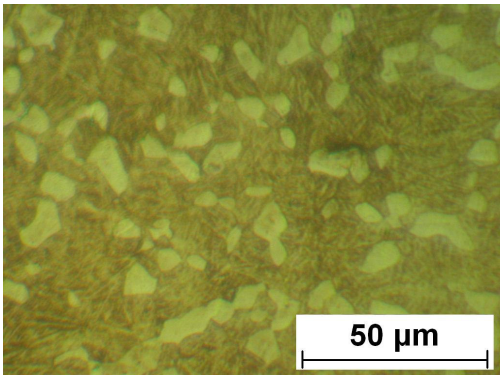




(a) (b)

Şekil 9.2 955 ºC 'de 1 saat tutulduktan sonra suda su verilmiş deney numunesi (a), [4] nolu kaynaktan alınan ve 955 ºC de 1 saat tutulduktan sonra suda su verilmiş Ti-6Al-4V mikro yapısı (b).

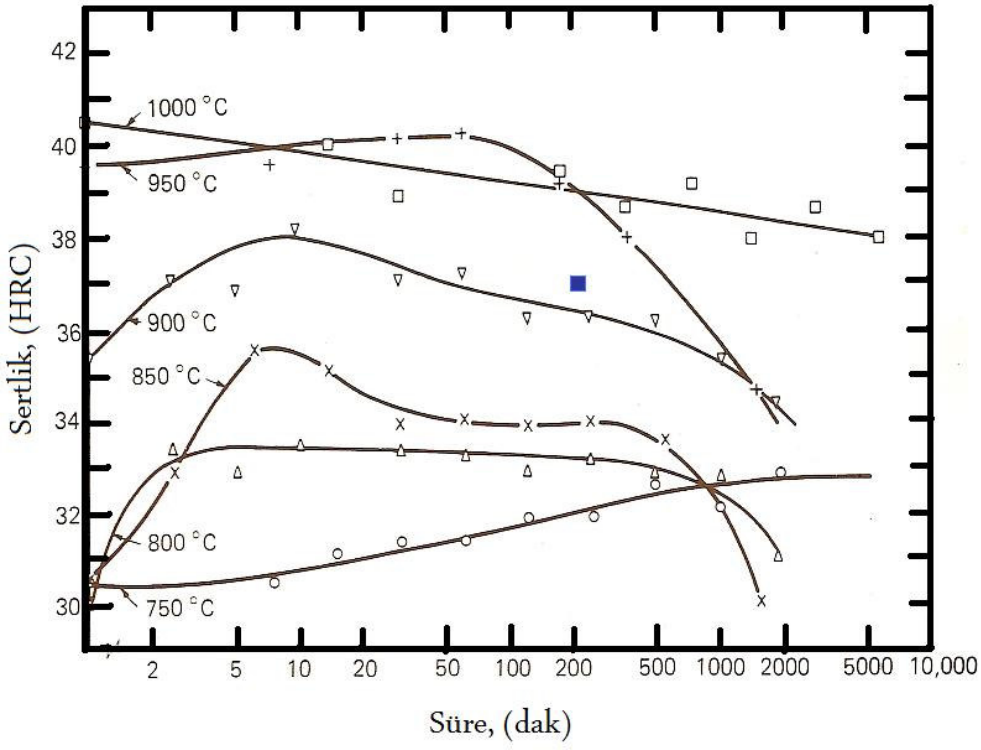
Şekil 9.2 de deneylerde kullanılan malzemeye ait mikro yapı ile literatürden alınan mikro yapı fotoğrafları birbiri ile paralellik göstermektedir. 955 ºC 'den su verilmiş yapıda birincil α soğutma hızından etkilenmezken, β fazı α' + α" martenzitlerine dönüşmüştür. Ancak β fazını kararlı kılan vanadyumun etkisinin 955 ºC 'de de sürmesi nedeniyle M_f (Martenzit sonu) sıcaklığına (25ºC) inilmiş olmasına rağmen yapıda kalıntı β bulunmaktadır. Şekil 9.2 de açık renkli alanlar birincil α, koyu renkli alanlar ise martenzit ve kalıntı β 'yı temsil etmektedir. Burada yaklaşık olarak %40 oranında birincil α olduğu söylenebilir.



Şekil 9.3 955ºC den su verilmiş yapının 550ºC de 4 saat süre ile yaşlandırılması sonucu oluşan mikro yapısı.

α’ + α” martenzit yapısı hızlı soğutma sonunu β fazının α fazına dönüşememiş halini ifade etmektedir. Tavlama sıcaklığının altında yapılacak bir yaşlandırma işleminde, kalıntı β vanadyum içinde zenginleşmek için bir miktar α fazının çökelmesini hızlandıracaktır. Aynı zamanda α’ + α” martenziti de bir miktar β ‘nın çökelmesini hızlandırarak SDH α dönüşümünü hızlandırmaktadır. Kalıntı β miktarının düşük olması nedeniyle, yaşlandırma işleminde dayanım ve tokluk artışı β fazının α’ ve α” içinde çözünmesi ve bunların α fazına dönüşmesi ile elde edilir.

Şekil 9.4 ‘te 540 ºC yapılan yaşlandırma işlemlerinin sertlik değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Görüldüğü gibi en yüksek sertlik değerleri 950 ºC ‘den su verilmiş alaşımın 2 saat gibi bir süre 540 ºC de yaşlandırma işlemine tabi tutulmasıyla elde edilmiştir. Literatürde genel olarak 2-8 saat olarak tavsiye edilen yaşlandırma süresi biraz daha yumuşak ve toparlanmış bir iç yapı elde edebilmek için yapılan deneylerde 4 saat olarak gerçekleştirilmiştir. Şekilde görülen mavi renkli nokta bu çalışmada kullanılan süre sonucu edilen sertlik değerini işaret etmektedir.



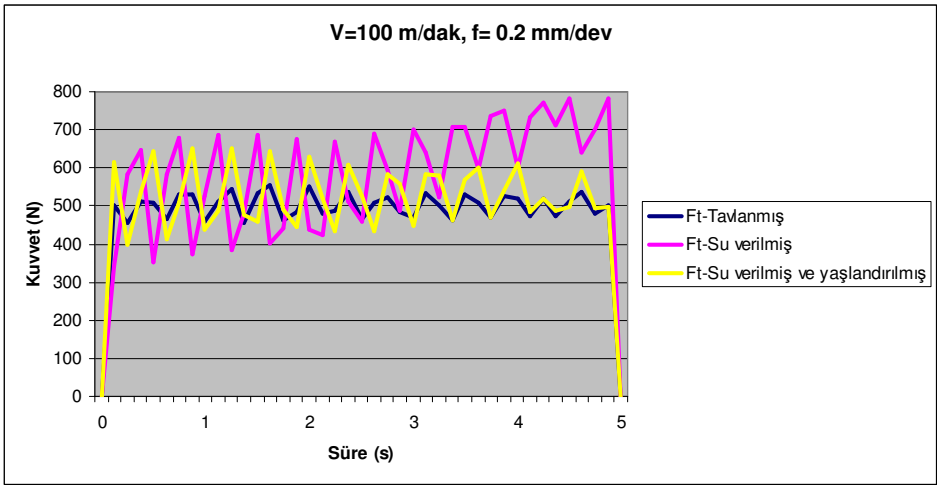
Şekil 9.4 Belirli sıcaklıklardan su verilmiş Ti-6Al-4V alaşımının yaşlandırma süresi (540 ºC ’de) ile sertlik ilişkisi grafiği [4].

Bu 3 mikro yapıya ait sertlik değerleri de Tablo 9.1 ‘de verilmiştir. En düşük sertlik değeri görüldüğü gibi tavlanmış yapıda meydana gelmiştir. Su verme sonucunda ise en yüksek sertlik elde edilmiştir. Ancak unutulmamalıdır ki elde edilen bu yüksek sertlik değerinin yanında tokluk değeri de önemlidir. Tokluk değerinin yükseltilmesi ise yaşlandırma sonrası mümkün olmaktadır. Sertlik değerinde az miktarda gerçekleşen düşüşün yanında tokluk değerinin arttığı bilinmektedir.

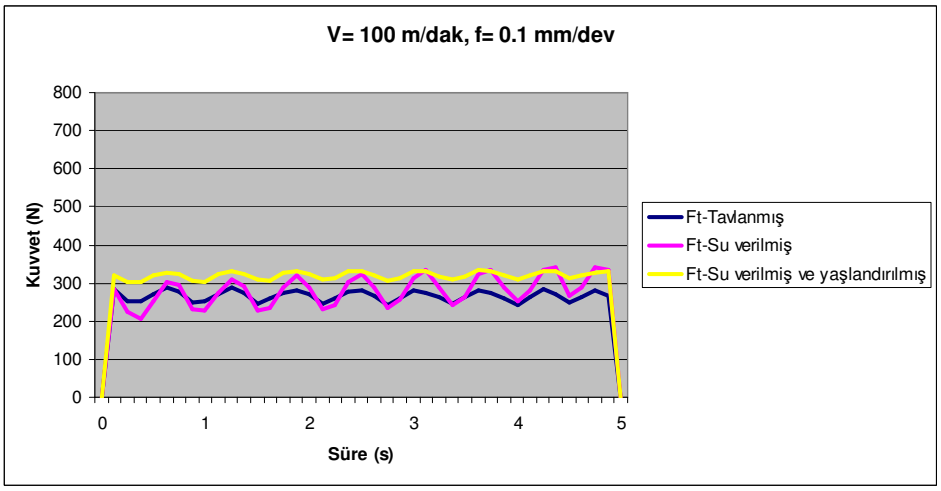
Tablo 9.1 Sertlik değerleri

	Tavlanmış	Su Verilmiş	Su verilmiş ve Yaşlandırılmış
$HV_{0.3}$	309	376	359
HRC	30,9	38,4	36,6

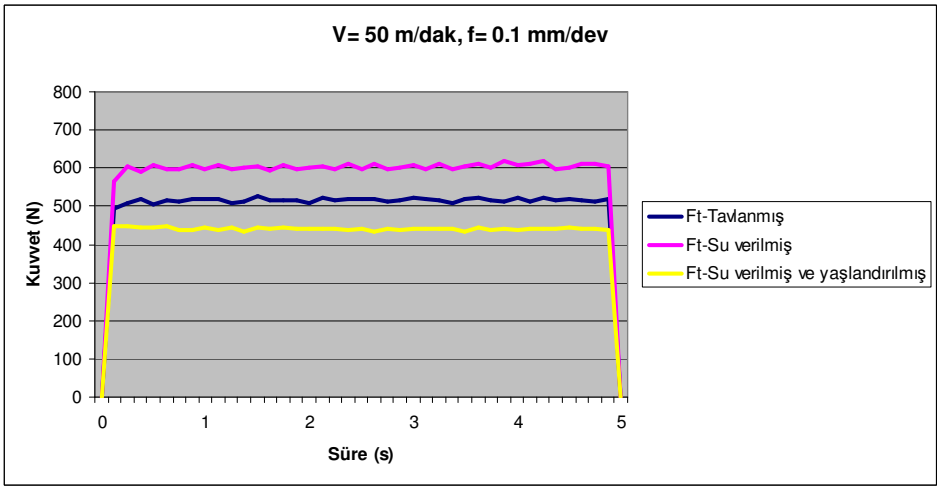
Elde edilen 3 farklı iç yapıdaki malzemelere ait 3 farklı kesme parametresi kombinasyonu ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen kesme kuvveti-zaman grafikleri Şekil 9.5 ve 9.6 ‘da verilmiştir. Kesme işlemlerinin hepsi kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiş olup takım ucu radyüs değerinin 0,8 mm olması ve minumum kesme derinliğinin radyüsten büyük olması gerekliliği nedeniyle paso miktarı 1 mm uygulanmıştır. Çok çeşitli geometrilere sahip talaş kırıcılı takımlar yerine işlemlerin talaş kırıcı geometrisi etkisinden bağımsız kalması istenmiş ve talaş kırıcısız takım tercih edilmiştir. Literatürden alınan bilgiler ışığında kaplamasız takım tercih edilmiştir. Bunun nedeni ise oluşan yüksek sıcaklıklar ve titanyumun kaplama malzemesi ile kimyasal bileşkesinin neden olacağı kopmaların doğuracağı kararsız kesme şartlarının ortadan kaldırılması isteğidir.



(a)

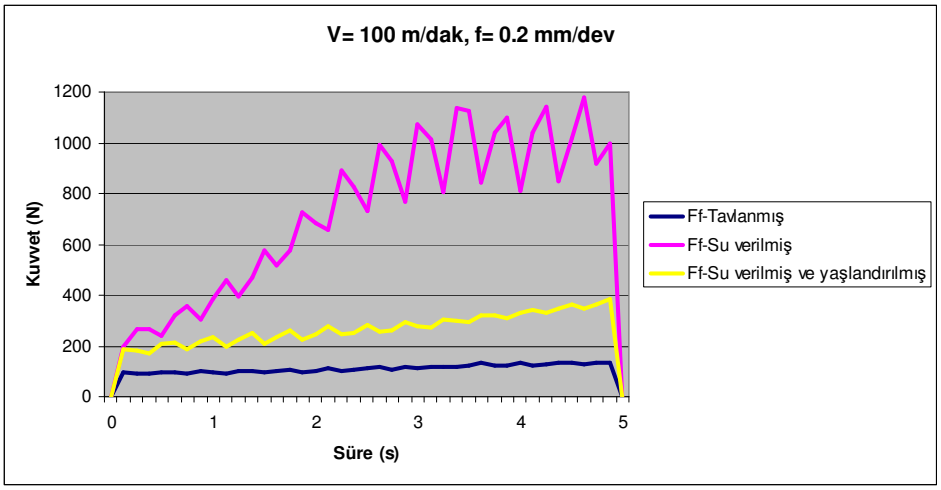


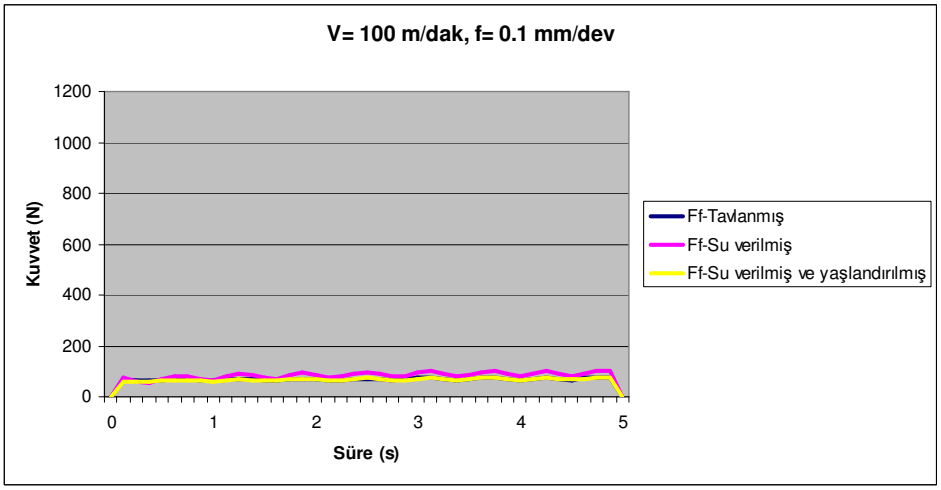
(b)

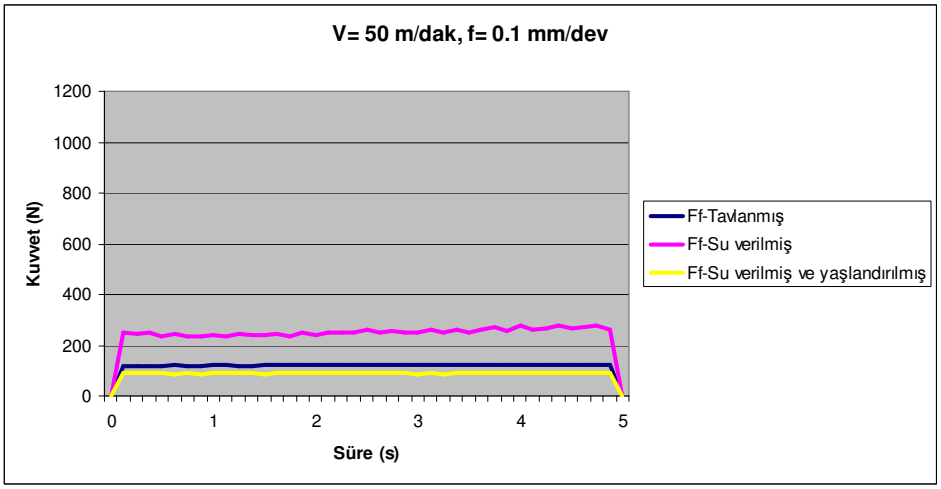


(c)

Şekil 9.5 Teğetsel kuvvetlerin kesme parametreleri ve ısıl işlemler etkisi ile değişimleri.







Şekil 9.6 İlerleme kuvvetlerinin kesme parametreleri ve ısıl işlemler etkisi ile değişimleri.

5.13, 5.14, 5.15 ve 5.18 denklemleri kullanılarak elde edilen normal kuvvet F_v, sürtünme kuvveti F_u ile bunların oranı olan μ sürtünme katsayısı ve özgül kesme enerjisi u_s değerleri Tablo 9.2 'de topluca verilmiştir. Bu değerlerin hesaplanmasında takımın talaş açısı $\alpha_r = 0$ olduğundan $F_v = F_t$ ve $F_u = F_f$ eşitlikleri vardır.

Tablo 9.2 Normal kuvvet F_v, sürtünme kuvveti F_u, sürtünme katsayısı μ ve özgül kesme enerjisi u_s değerleri.

		V=100m/dak, f=0.2mm/d	V=100m/dak, f=0.1mm/d	V=50m/dak, f=0.1mm/d
Tavlanmış	Normal Kuvvet, F_v (N)	502	265	516
	Sürtünme Kuvvet, F_u (N)	112	68	121
	Sürtünme Katsyısı, μ	0,22	0,26	0,23
	Özgül Kesme Enerjisi, u_s (MJ/ m^3)	2510	2650	5160
Su verilmiş	Normal Kuvvet, F_v (N)	595	281	603
	Sürtünme Kuvvet, F_u (N)	734	85	253
	Sürtünme Katsyısı, μ	1,23	0,30	0,42
	Özgül Kesme Enerjisi, u_s (MJ/ m^3)	2975	2810	6030
Su verilmiş ve Yaşlandırılmış	Normal Kuvvet, F_v (N)	530	320	441
	Sürtünme Kuvvet, F_u (N)	270	68	90
	Sürtünme Katsyısı, μ	0,51	0,21	0,20
	Özgül Kesme Enerjisi, u_s (MJ/ m^3)	2650	3200	4410

Kuvvet grafiklerinden ve Tablo 9.2 'den görüldüğü gibi en iyi kesme şartları hızın yüksek ve ilerlemenin düşük olduğu durum olan 100 m/dak kesme hızı ile 0.1 mm/dev ilerleme durumunda gözlenmiştir. Su verilmiş yapının tüm kesme koşulları için kararsız bir kuvvet grafiği verdiği de ayrıca göze çarpmaktadır. Kuvvet ölçümleri sırasında en az dalgalanma tavlanmış yapı ile yaşlandırılmış yapıda gözlenmiştir. Bununla beraber sürtünme kuvvetinin en düşük değeri yaşlandırılmış numunenin işlenmesinde elde edilmiştir.

Her kesme işleminin ardından ortalama yüzey pürüzlülük değerleri R_a ölçülmüştür ve sonuçları Tablo 9.3 'te verilmiştir. Ölçülen pürüzlülük değerlerinin beklenen

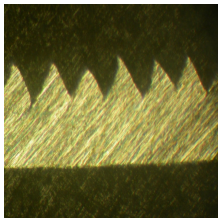
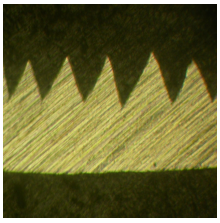
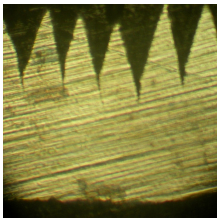
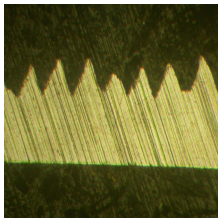
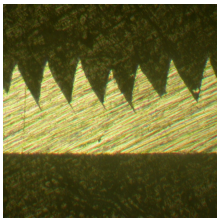
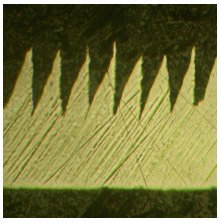
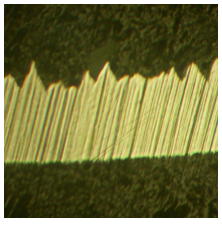
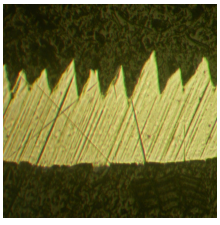
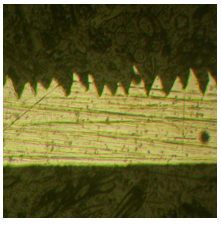
sonucu olarak en iyi yüzey kalitesi 100 m/dak kesme hızı ile 0.1 mm/dev ilerleme durumunda ölçülmüştür. Kesme hızının 100 m/dak ve ilerlemenin 0.2 mm/dev olduğu kesme koşulunda en iyi yüzey kalitesi yaşlandırılmış numuneden alınmıştır.

Tablo 9.3 Ortalama yüzey pürüzlülük değerleri

Kesme koşulu		V= 100 m/dak, f= 0.2 mm/dev	V= 100 m/dak, f= 0.1 mm/dev	V= 50 m/dak, f= 0.1 mm/dev
Tavlanmış	R_a (μm)	1,79	0,60	1,84
Su verilmiş	R_a (μm)	1,84	0,67	0,75
Su verilmiş ve Yaşlandırılmış	R_a (μm)	1,62	0,66	1,08

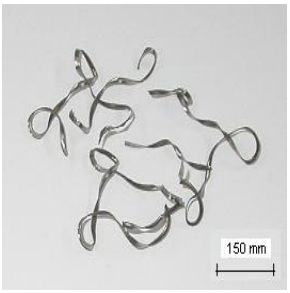
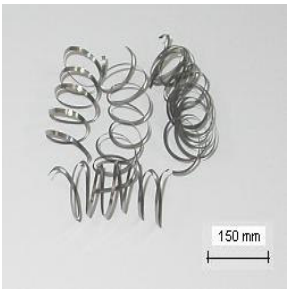
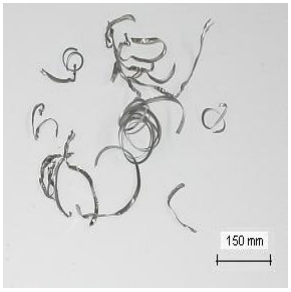
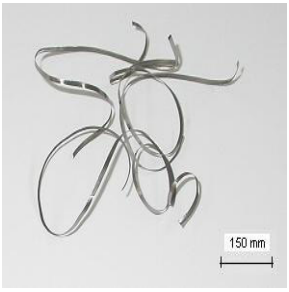
Tablo 9.4 ‘te bakalite gömülmüş talaşların kesit görünüşleri verilmiştir.

Tablo 9.4 Gömülmüş talaş kesit fotoğrafları

	Tavlanmış	Su verilmiş	Su verilmiş ve Yaşlandırılmış
V=100 m/dak, f=0,2 m/dev			
V=100 m/dak, f=0,1 mm/dev			
V=50 m/dak, f=0,1 mm/dev			

Kesme işlemleri sırasında oluşan talaşlara ait genel talaş formu resimleri Tablo 9.5 ’te verilmiştir.

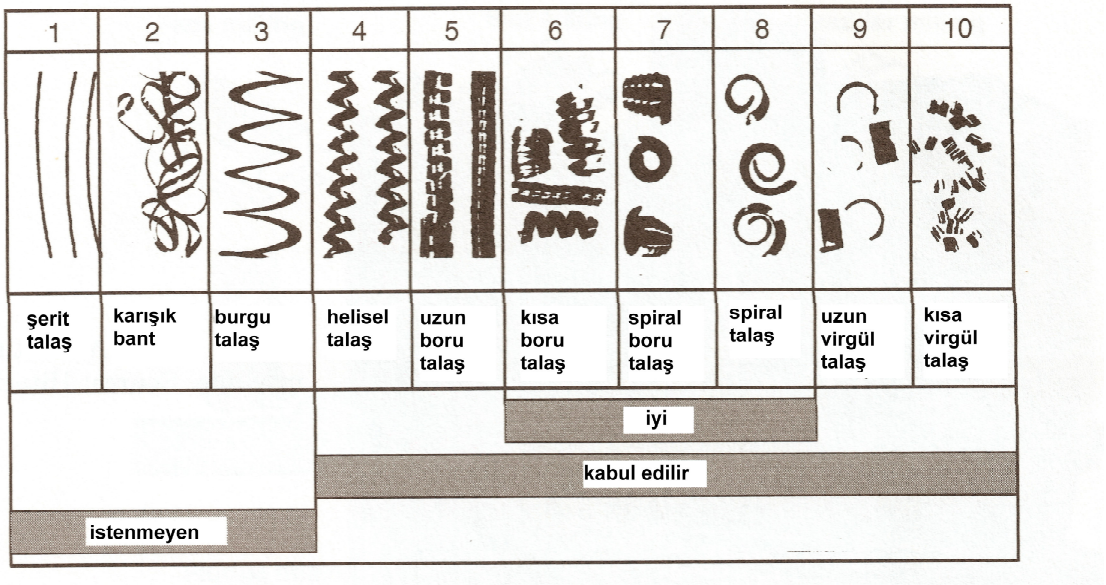
Tablo 9.5 Talaş formları

	Tavlanmış	Su verilmiş	Su verilmiş ve Yaşlandırılmış
V=100 m/dak, f=0,2 mm/dev			
V=100 m/dak, f=0,1 mm/dev			
V=50 m/dak, f=0,1 mm/dev			

Tablo 9.5 deki genel talaş formların Şekil 9.7 ‘deki literatürden alınan talaş formları ile karşılaştırmak gerekirse, istenmeyen talaş formu grubunda olan karışık bant talaş formunun su verilmiş numunenin işlenmesi sırasında 1, ve 3. kesme koşullarında oluştuğu görülmektedir. 2. kesme şartlarında ise yine istenmeyen talaş tipi olan burgu talaş tipine benzer talaş formu elde edilmiştir. Tavlanmış numune ile yaşlandırılmış numunenin işlenmesinde ise hemen tüm kesme koşullarında helisel

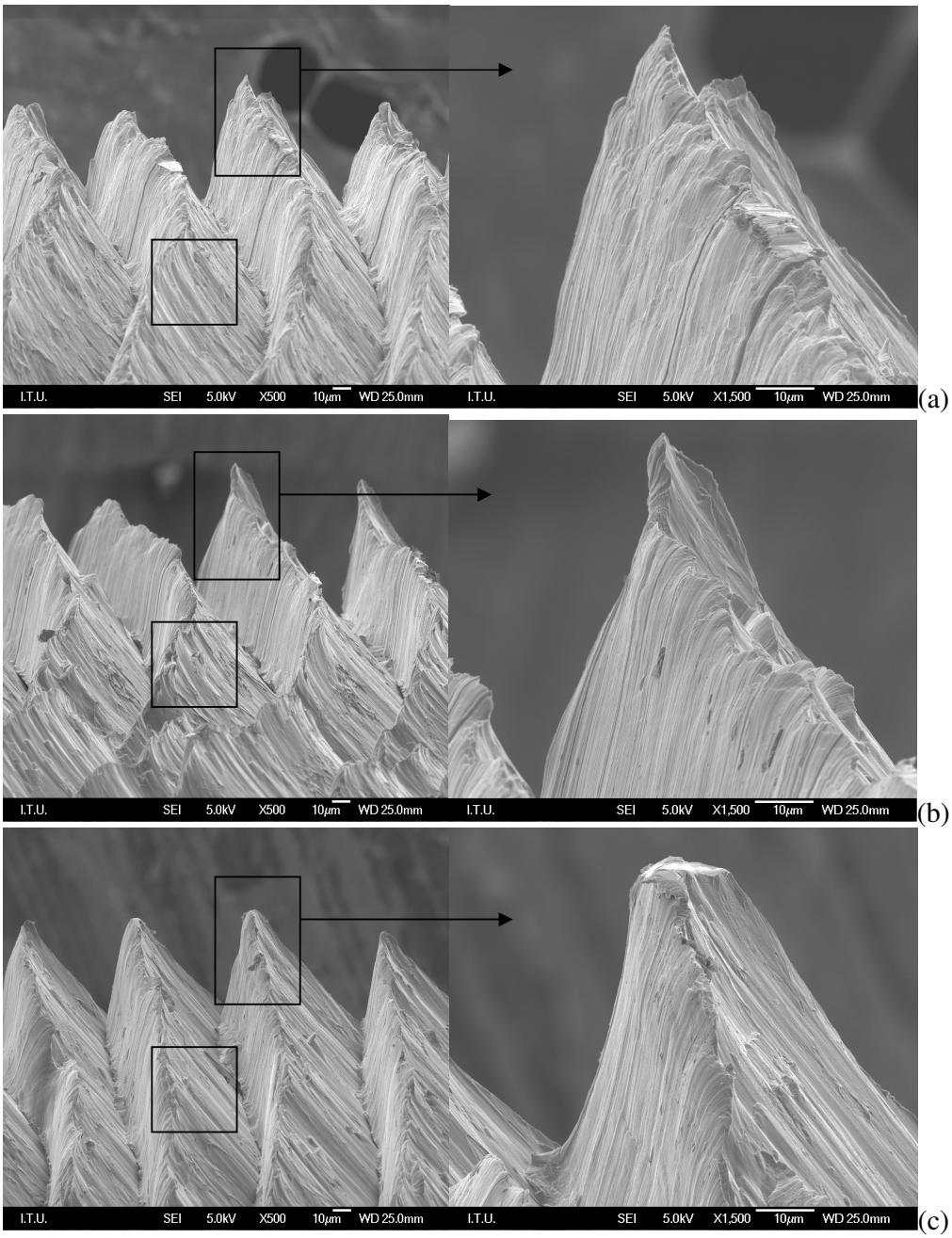
talaş (4) ile uzun boru talaş (5) tipi gözlenmiş olup, bunlar kabul edilebilir talaş tipi sınıfında yer almaktadır.

Literatürden alınan genel talaş formlarının sınıflandırılmasına ait bir şekil de Şekil 9.7 ‘de gösterilmektedir.



Şekil 9.7 Talaş formlarının sınıflandırılması.

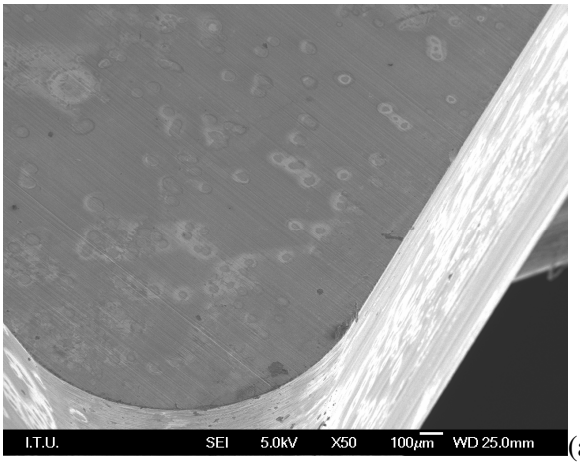
Talaş kesitinden alınan SEM fotoğrafları Şekil 9.8 de verilmiştir. Şekillerde kare çerçeve içine alınan bölgelere dikkat edilecek olursa plastik deformasyona uğramış yüzeyler içinde en temiz yüzey su verilmiş ve yaşlandırılmış deney numunesinden alınan talaşta görülmektedir. Bu da düşük sürtünme kuvveti değeri ile paralellik göstermektedir. Ayrıca bu düzgünlük aynı zamanda su verilmiş ve yaşlandırılmış numunenin plastik şekil değişimine daha yatkın olduğu söylenebilir.



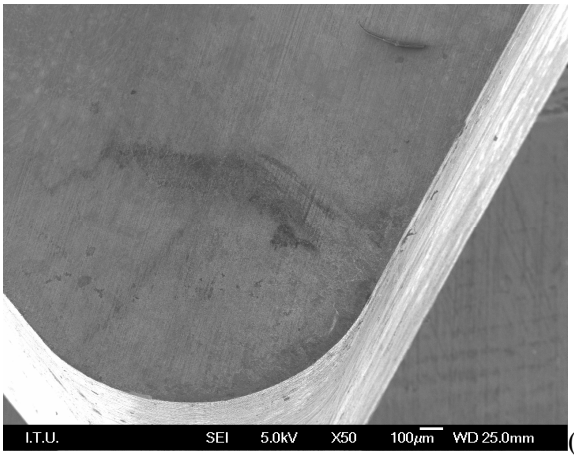
Şekil 9.8 Talaş SEM fotoğrafları (a) Tavlanmış numuneden alınan talaş, (b) Su verilmiş numuneden alınan talaş, (c) Su verilmiş ve yaşlandırılmış numuneden alınan talaş (V=100 m/dak, f = 0.1 mm/dev, a=1mm)

Takım ucuna ait SEM fotoğrafları Şekil 9.9 'da verilmektedir. Burada aşınmanın en çok yaşlandırılmış numunenin işlenmesinde meydana geldiği görülmektedir. Ancak aşınma deneyi 40 s gibi kısa bir sürede yapıldığından bu durum tam bir sonuç

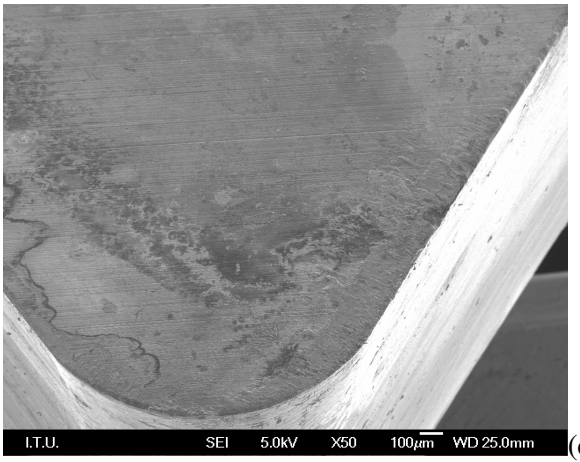
olamaz. Çünkü takım aşınmasının kesmenin başlangıcında aniden arttığı sonra kararlı bir hal aldığı bilinmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 9.9 Takım uçlarına ait SEM fotoğrafları (a) kullanılmamış takım, (b) Tavlanmış Ti6Al4V işlenmesinde kullanılan takım, (c) Su verilmiş ve yaşlandırılmış Ti6Al4V işlenmesinde kullanılan takım. *a=1mm, V=50 m/dak, f=0.1 mm/dev.

10. SONRAKİ ÇALIŞMALARA TAVSİYELER

Bu çalışmada TiAl6V malzemeye 3 farklı ısıl işlem uygulamış, kuru kesme şartları altında 3 farklı kesme parametresi kullanılarak kuvvetler ölçülmüştür. Çalışmalar sırasında tek tip kesici uç kullanılmıştır.

Bundan sonraki aynı kapsamlı çalışmalarda; kesme hızı, ilerleme, paso miktarı gibi kesme parametrelerinin değiştirilmesi ve bu koşullarda kesme işlmelerinin izlenmesi uygun olacaktır. Bir diğer yandan kesici uç malzeme ve geometrilerinin de etkisinin irdelenmesi gerekmektedir. Bu amaçla farklı takım malzemeleri (PCD, CBN, HSS, Kaplamalı WC, vb.) ve farklı takım geometrileri (talaş kırıcılı, değişik talaş açılı takımlar, vb.) kullanılarak deneyler yapılabilir.

Takım ucunda oluşan sıcaklığın ölçülmesi de takım aşınmasının derecelendirilmesi açısından faydalı olacaktır. Kesme sıvılarının etkisi de ayrıca incelenmelidir. Bu bağlamda etkin soğutma ve yağlama yapılabilmesi için değişik kesme sıvıları kullanılarak sıcaklık ve kuvvet ölçümleri gerçekleştirilebilir. Bu sonuçlar irdelenerek elde edilecek sonuçlar kuşkusuz ki çok faydalı olacaktır.

Takım ömrü çalışmalarının da titizlikle gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla değişik ısıl işlemlerin uygulanması da faydalı olabilir. Burada ısıl işlem parametreleri değiştirilerek farklı sıcaklık ve soğutma hızları ile işlenebilirliği daha uygun iç yapılar elde edilerek kesme deneyleri tekrarlanabilir.

KAYNAKLAR

[1]ASM Handbook, 10. Edition, Volume 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Intorduction to Titanium and Titanium Alloys, 1770

[2]Leyens, C. and Peters, M., 2003, Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications, Wiley VCH, Weinheim,

[3]Boyer, R., Welsch, G., Collings, E.W., 1994, Materials Properties Handbook: Titanium Alloys, ASM International, Metals Park, USA

[4] Brooks, R. C., 1982, Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys, ASM International, Metals Park, USA

[5]Moiseyev, V.N., 2006, Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Applications, CRC Pres, Boca Raton

[6]Williams, J. C., Belov, A. F., 1982, Volume 2, Titanium and Titanium Alloys, Plenum Pres, New York

[7]M. J. D. R., Jr., 1988, Titanium: A Technical Guide, ASM International, Metals Park, USA

[8]İşler, A., 1999, Titanyum Alaşımlarının Isıl İşlem ve Mekanik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

[9]ASM Handbook, 10. Edition, Volume 4, Heat Treating, Heat Treating of Titanium and Titanium Alloys, 2043

[10]Çakır, M. C., Ensarioğlu, C., 2005, Titanyum ve Alaşımlarının İşlenebilirlik Etüdü, Mühendis ve Makine, Cilt:46, Sayı: 546-547

[11]Ribeiro, M. V., Moreira, M.R.V., Ferreira, J.R., 2003, Optimization of titanium alloy (6Al–4V) machining, Journal of Materials Processing Technology 143–144, 458–463

[12]Ohkubo, C., Watanabe, I., Ford, J.P., Nakajima, H., Hosoi, T., Okabe, T., 2000, The machinability of cast titanium and Ti6Al4V, Biomaterials 21, 421-428

[13] Jovanovic, M.T., Tadic, S., Zec, S, Miskovic, Z.,Bobic, I., 2006, The effect of annealing temperatures and cooling rates on microstructure and mechanical properties of investment cast Ti–6Al–4V alloy, Materials and Design 27, 192–199

[14]Ezugwu, E.O., Wang,Z.M., 1997, Titanium alloys and their machinability a review, Journal of Materials Processing Technology 68, 262-274

[15]Venugopal, K.A., Paul, S., Chattopadhyay, A.B., 2007, Growth of tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy under cryogenic cooling, Wear 262, 1071–1078

[16] Altıntaş, Y., 2000, Manufacturing Automation, Cambridge University Press

[17] Akkurt, M., 1998, Talaş Kaldırma Yöntemleri veTakım Tezgahları, Birsen Yayınevi

[18] Astakhov, P.V., 1999, Metal Cutting Mechanics, CRC Pres

[19] Stephenson, D.A., Agapiou, J.S., 2006, Metal Cutting Theory and Practise, CRC Pres, Boca Raton, Boca Raton

[20] Nabhani, F., 2001, Robotics and Machining of Aerospace Titanium Alloys, Computer Integrated Manufacturing 17, 99-106

[21] http://www.msm.com.ac.uk/phase-trans/2004/titanium/titanium.html

[22] http://timaxip.com/turkce/default_urun.asp?gb=urun&id=75

[23] http://www.kobelco.co.jp/english/titan/index.html

[24] http://www.espi-metals.com/tech/Tech-TitaniumMachining.htm

[25] http://www.supraalloys.com/Machining_titanium.htm

[26]http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/aerospace/gas_turbines/C_2920_18_ENG_043_074.pdf

[27] http://www.titanium.org

ÖZGEÇMİŞ

Sedat AKYOL, 1983 yılında İstanbul'da doğdu. İlköğretimini İstanbul' da tamamladıktan sonra Kadir Has Anadolu Lisesi' nde eğiteme hak kazandı. 2001 yılında Kadir Has Anadolu Lisesi' ni başarıyla tamamlayarak aynı yıl Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümüne giriş yaptı. 2005 yılında Makine Mühendisliği ünvanını alarak mezun oldu ve aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı İmalat Programı' nda yüksek lisans çalışmasına başladı. İngilizce bilmekte olup, hobileri arasında satranç oynamak, kitap okumak, çeşitli konularda araştırma yapmak yer almaktadır.