

SİNERLENMİŞ TİTANYUM ALAŞIMLARININ AŞINMA PERFORMANSI VE BAZI MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Bekir YALÇIN ve Remzi VAROL*

Mekatronik Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 32260, Isparta,
bekir@tef.sdu.edu.tr

*Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta

(Geliş/Received: 10.03.2008 ; Kabul/Accepted: 20.01.2009)

ÖZET

Endüstriyel uygulamalarda titanyum (Ti), üretilmesi zor ve pahalı malzeme olarak nitelendirilir. Fakat, Ti alaşımları özgül özelliklerinden dolayı uçak konstrüksiyonları ve implant üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ti alaşımlarının döküm yöntemleri ile imal edilmesi durumunda, talaşlı işleme zorlukları ortaya çıkmaktadır. Maliyetin düşürülmesi ve talaşlı işlemeyi en aza indirmek için, toz metalürjisi yöntemi tercih edilmektedir. Bu çalışmada, uzay ve biyomedikal uygulamalarda sıklıkla kullanılan Ti-6Al-4V, Ti-5Al-2,5Fe ve Ti-6Al-7Nb alaşımları toz metalürjisi yöntemiyle, tek etkili kalıp içerisinde ortalama 530 MPa basınçla preslendikten sonra, 1250°C sıcaklıkta koruyucu argon gazı atmosferi ve 10^{-4} torr vakum ortamında sinterleme işlemi yapılmıştır. Sinterleme sonrası Ti alaşımı numunelerde oluşan sinter bağları, gözenek tipi, Widmanstatten yapının elde edilip edilemediği deneysel olarak araştırılmıştır. Gözenek yapısının aşınma ve eğme dayanımına etkisini belirlemek için aşınma ve eğme deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak, diğer alaşımlara göre Ti-6Al-7Nb alaşımında oluşan büyük gözenekli ve düşük sinter bağ oluşumuna sahip yapı, aşınma ve eğme dayanımını düşürmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sinterleme, aşınma, widmanstatten yapı, Ti alaşımları, toz metalürjisi.

DETERMINATION OF THE WEAR PERFORMANCE AND SOME MECHANICAL PROPERTIES OF SINTERED TITANIUM ALLOYS

ABSTRACT

Titanium in industrial applications has been described as costly material and difficult to manufacture. But, Ti alloys have been commonly used in aerospace constructions and implant production because of its specific properties. Machining difficulties are taken place in case of the manufacturing of Ti alloys by casting method. Powder metallurgy method for part production from Ti alloys is preferred for minimizing of production costs and machining difficulties. For this aim, Ti-6Al-4V, Ti-5Al-2,5Fe and Ti-6Al-7Nb alloys using in biomaterials and aerospace industries were produced from elemental powders by pressing at 530 MPa and sintering at 1250°C temperature at protective argon gas atmosphere under 10^{-4} torr vacuum. Pores structure, sinter neck formation, and widmanstatten structures were investigated experimentally. In order to determine of effect of the pores structure on wear and bending strength, wear and bending tests were performed. As a result, bigger porous and lower sinter neck formation of Ti-6Al-7Nb alloy than other Ti alloys decreased the wear strength and bending strength.

Keywords: Sintering, wear, widmanstatten structure, Ti alloys, powder metallurgy.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Toz Metalürjisi (TM) çeşitli metal ve seramik tozların imal edilmesi, karakterizasyonu ile bu tozların değişik ısıl ve mekanik deformasyon prensiplerinin uygulanarak birleştirilmesiyle kullanışlı mühendislik

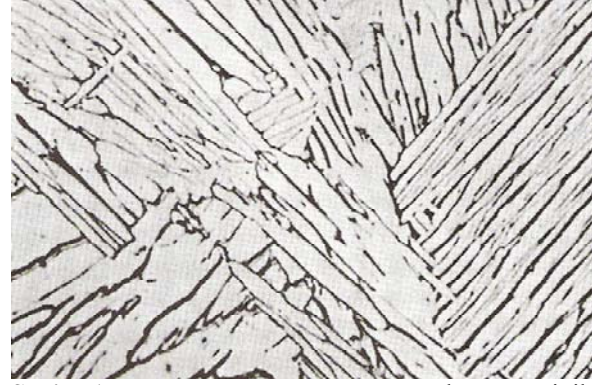
parçalara dönüştürülmesini amaçlayan bir imalat sürecidir. Özellikle Titanyum (Ti), Tantalum (Ta), Niyobyum (Nb) ve Zirkonyum (Zr) gibi pahalı malzemelerden ingot metalürjisi ile alaşım imal etmek, bazı ayrışım problemlerine neden olmakla birlikte alaşımların üretilebilmesi durumunda ise

talaşlı işleme, dövme gibi ikincil imalat süreçlerinin uygulama zorlukları ortaya çıkmaktadır. Bu imalat problemlerinin çözümü için, toz metalürjisi önerilmektedir [1, 2].

Titanyum alaşımlarının endüstride hızla yaygınlaşmasının temel nedeni, korozyon dayanımı ve metale göre % 56 daha düşük yoğunlukta olmasına rağmen yüksek mukavemetli (spesifik mukavemet) yapıya sahip olmasıdır. Genel olarak endüstriyel uygulamalarda titanyum alaşımının seçimi, mikro yapı dönüşümüne göre yapılmaktadır (Çizelge 1) [3].

Titanyum, sıcaklık ve alaşım elemanlarına göre iki allotropik kristal yapıya sahiptir. 882.5°C sıcaklığa kadar hegzagonal sıkı paket (HSP) yapıya sahip α fazı ve bu sıcaklıktan sonra hacim merkezli kübik (HMK) yapıya sahip β fazından oluşur. Ti alaşımları, oda sıcaklığındaki mikroyapılarına bağlı olarak α fazı, α fazına yakın, α/β yanıkaraklı β fazı veya yanıkaraklı β fazı şeklinde sınıflandırılmaktadır. α alaşımları, saf Ti alaşımı ve Al, Sn gibi α kararlaştırıcı elementlerin ilavesiyle oluşturulan alaşımlardır [4, 5]. α/β Ti alaşımları, α fazında yeterli β fazı kararlaştırıcı elementlerin (Ta, V, Mo vs) ilave edilmesi ile imal edilmektedirler. β kararlaştırıcı elementi oranının artmasıyla da yanıkaraklı β alaşımı oluşur. β faz dönüşümü, β fazı kararlaştırıcı elementlerin ilavesi ile sağlanabildiği gibi, malzemenin β fazı dönüşüm sıcaklığına ısıtılıp bu sıcaklıktan soğutulması ile de elde edilebilmektedir [6]. Şekil 1'de görülen widmanstatten yapı dönüşümü, soğutma hızına bağlı olarak β faz dönüşüm sıcaklığından yavaş soğuma ile martenzit (widmanstatten) ve dönüşmüş β fazı (iğnemi α), artan soğuma hızıyla da kaba lamel β fazı oluşmaktadır [6]. Çeliklerde bilinen martenzitten farklı olarak, Ti alaşımlarında kristal kafes sitesinin çarpılması ile dengelenmiş bir pekleşme karakteristiğinin elde edilebilmesi için Widmanstatten yapı dönüşümünün gerekli olduğu rapor edilmiştir [2].

Sinterlenmiş Ti alaşımlarında widmanstatten yapı oluşumu, sinterleme ısı işleminin yavaş soğutma ve



Şekil 1. Yavaş soğuma sonrası oluşmuş tipik Widmanstatten yapı (martenzit dönüşmüş β fazı veya iğnemi α fazı) [2]. (Widmanstatten structure after slow cooling)

ısıtma hızında yapılmasıyla sağlanabilmektedir. Özellikle Ti alaşımlarında sinterleme işleminin, widmanstatten yapının oluşması ile birlikte sinter boyun mekanizmasının gelişimi için daha kontrollü yapılması literatürde yapılan çalışmalarda vurgulanmıştır. Güden vd. (2005), biyomedikal uygulamalar için Ti-6Al-4V toz metal kompaktların basma testleri çalışmasında, deformasyon hızının artmasıyla basma mukavemeti ve akış gerilmelerinin her ikisinin de arttığını bildirmişlerdir [7]. Taneler arası bölgelerde boşluk birleşimi ile mikro çatlaklıklar ve sünek bölgelerde kırılmalar meydana geldiğini ortaya koymuşlardır. Lin vd. (2005), Ti 7,5Mo döküm alaşımı, CP Titanyum, Ti6Al4V ve Ti13Nb13Zr alaşımlarının yorulma davranışlarını karşılaştırmalı olarak araştırmışlardır [8]. Cp Titanyum ve Ti-6Al-4V alaşımlarının yorulma dayanımının, Ti-7,5Mo ve Ti-13Nb-13Zr alaşımlarından daha yüksek olduğunu, yorulma performansı üzerine gözenek morfolojisinin ve sinter boyun oluşumunun etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Archbold (1999), gözenekli kaplanmış Ti-6Al-4V ELI alaşımının mekanik özelliklerine sinterleme sıcaklığının etkisi konulu yüksek lisans tezinde, 150–250 μ m partikül büyüklüğündeki tozları kullanarak 1250°C, 1275°C, 1300°C ve 1315°C sıcaklıklarında 10⁻⁵ torr vakum ortamında sinterleme yapmıştır. Dört farklı

Çizelge 1. Bazı titanyum alaşımlarının endüstriyel uygulama alanları (Some industrial applications of titanium alloys)

Alaşım	Karakteristik	Önemli Uygulama Alanları
Alaşımsız Ti (α alaşımı)	Şekillendirilebilirliği ve kaynaklanabilirliği oldukça yüksek	Isı değiştirgeçleri, kimyasal-ışılme endüstrisi.
Ti-5Al2.5 Sn (α alaşımı)	İyi kaynaklanabilirlik ve kararlılık, 480° sıcaklığa kadar kararlı mukavemet	Jet motor ve türbin motor uygulamalarında.
Ti-6Al-2Sn-4Cr-2Mo (α 'ya yakın)	Mükemmel sürünme dayanımı, yüksek tokluk ve mukavemet	Gaz türbin motorlarında dövme ve haddeleme ürünlerinde, uçak dış kaplama parçalarında.
Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr0.7Nb-0.5Mo-0.3 Si (α 'ya yakın)	Kaynaklanabilirlik, yüksek sıcaklıkta geliştirilmiş yorulma dayanımları	Maksimum 590°C sıcaklıklardaki endüstriyel uygulamalarda
Ti-6Al-4V (α/β)	Mükemmel yorulma dayanımı, biyoyumluluk, 300°C sıcaklığa kadar ısı kararlılık.	Ortopedik implant, gaz türbin diskleri, kimyasal işlem üniteleri.
Ti-6Al-7Nb (α/β)	Mükemmel biyoyumluluk, yüksek mukavemet.	İmplant uygulamalarında.
Ti-5Al-2.5 Fe (α/β)	Yüksek mukavemet, biyoyumluluk.	İmplant uygulamalarında.
Ti-6Al-2.5Sn-4Zr-6Mo(α/β)	Yüksek sıcaklıkta uzun süreli yük taşıyıcı.	Kompresör fan kanatçıkları ve gaz türbin motor uygulamalarında.
Ti-35Nb-5Ta-7Zr (Meta stabil β)	Düşük elastisite modülü, biyoyumluluk.	İmplant uygulamalarında.
Ti-13Nb-13Zr (α/β)	Düşük elastisite modülü, biyoyumluluk.	İmplant uygulamalarında.
Ti-13V-11Cr-3Al (β)	İyi kaynaklanabilen yüksek mukavemetli.	Yüksek mukavemetli uçak konstrüksiyonda, misilleme uygulamalarında.

sinterleme sıcaklığında oluşan sinter boyun temas çapı ve alt malzeme ile kaplama arasındaki ara yüzey geometrisini elektron tarama mikroskobu ile belirlemiştir. Metalografik çalışması sonrası, yorulma ve kayma mukavemetini önemli oranda etkileyen sinter boyun temas çapının, sinterleme sıcaklığı ile arttığını tespit etmiştir. 1300–1315°C sinterleme sıcaklığında, sinter boyun temas çapının çok daha fazla arttığını ileri sürmektedir [9]. Ayrıca, sinter boyun temas çapının artmasıyla, yorulma ve kayma dayanımında önemli bir artışın sağlandığını bildirmiştir [9].

Bu çalışmada, TM yöntemiyle elementel tozlardan hazırlanan Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb ve Ti-5Al-2.5Fe alaşımlarından numuneler imal edilmiştir. Sinterleme sonrası % yoğunluk ve boyut değişimi ile birlikte sinter boyun oluşumu, gözenek yapısı metalografik olarak incelenmiştir. Elde edilen numuneler ile eğme, sertlik ve kuru kayma koşullarında aşınma testleri yapılmıştır. Gözenek büyüklüğü-tipinin ve sinter bağ oluşumlarının aşınma sonrası ağırlık kaybına etkisi deneysel olarak tespit edilmiştir. Bu sayede, aynı şartlarda imal edilen üç farklı titanyum alaşımının, gözenek yapısıyla aşınma ve eğme mukavemeti arasındaki ilişki belirlenmiştir.

2. MATERYAL METOD (MATERYAL AND METHOD)

2.1. Elementel Tozların Preslenmesi (Elementel Powder Pressing)

Çizelge 2, 3 ve 4'te kimyasal bileşimleri verilen, Ti-6Al-4V alaşımı ASTM Sınıf 5 standardına, Ti-6Al-7Nb alaşımı ASTM F 1295 standardına, Ti-5Al-2.5 Fe alaşımı ise ISO Part 10 standardına göre hazırlanmıştır. Her bir alaşım için hazırlanan toz karışımları, konik karıştırıcıda homojen bir şekilde 22 dev./dak. hızda 20 dak. süre ile karıştırılarak hazırlanmıştır.

Çizelge 2. Ti-6Al-4V alaşımını oluşturan tozların kimyasal bileşimi (Chemical composition of Ti-6Al-4V alloy)

Alaşım Elemanı	Ti	Al	V	Zn-S
Ağırlık (%)	90	6	4	0,6
Ergime Sıcaklığı (°C)	1668	660	1910	120-124
Ortalama Toz Boyutu (µm)	44	63	44	40
Toz Morfolojisi	%70 Köşeli+ %30 küresel	Köşeli	Küresel	Köşeli

Çizelge 3. Ti-6Al-7Nb alaşımını oluşturan tozların kimyasal bileşimi (Chemical composition of Ti-6Al-7Nb alloy)

Alaşım Elemanı	Ti	Al	Nb	Zn-S
% Ağırlık (%)	87	6	7	0,6
Ergime Sıcaklığı (°C)	1668	660	2477	120-124
Ortalama Toz Boyutu (µm)	44	63	44	40
Toz Morfolojisi	%70 Köşeli+ %30 küresel	Köşeli	Küresel	Köşeli

Çizelge 4. Ti-5Al-2.5Fe alaşımını oluşturan tozların kimyasal bileşimi (Chemical composition of Ti-5Al-2.5Fe alloy)

Alaşım Elemanı	Ti	Al	Fe	Zn-S
Ağırlık (%)	92,5	5	2,5	0,6
Ergime Sıcaklığı (°C)	1668	660	1538	120-124
Ortalama Toz Boyutu (µm)	44	63	44	40
Toz Morfolojisi	%70 Köşeli+ %30 küresel	Köşeli	Köşeli	Köşeli

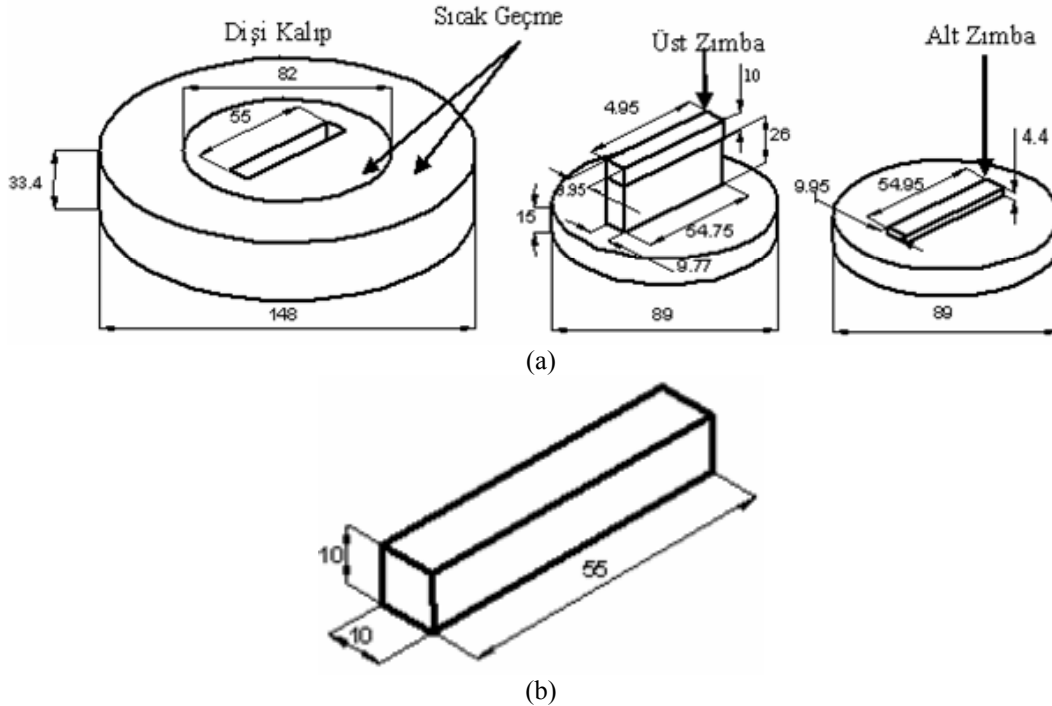
Şekil 2a'da görülen sıkıştırma kalıbı, deneylerde kullanılan tozların görünür yoğunluk değerlerine ve imal edilecek numune geometrisine göre (Şekil 2b) tasarlanmıştır. Üç farklı alaşımın temel elementi titanyum tozunun ham durumda kalıp doldurma yüksekliği, alt zımbanın matris kalıba giriş mesafesi ve üst zımbanın ise ilk eksenleme giriş mesafesi hesaplanmıştır. Yüksek mukavemetli Ti alaşım imal etmek için yaklaşık % 90 teorik yoğunluk değeri referans alınmış ve Şekil 3'de görülen sıkıştırma kalıbı ile literatür araştırması sonrası belirlenen [10] 530 MPa sıkıştırma kuvveti uygulanarak presleme gerçekleştirilmiştir.

2.2. Ham Toz Kompaktların Sinterlenmesi (Sintering of Green Compacts)

Sinterleme işlemi, ilk olarak 5°C/dak. ısıtma hızında 400°C sıcaklığa kadar yapılmış ve bu sıcaklıkta 20 dak. bekletilerek yağlayıcı giderilmiştir. Daha sonra, aynı ısıtma hızında 1250°C sinterleme sıcaklığına ısıtılıp bu sıcaklıkta iki saat süre bekletilerek sinterleme gerçekleştirilmiştir. Sinterleme, argon (koruyucu gaz) ortamında ve tüp fırın içerisinde 10⁻⁴ torr vakum ortamında yapılmıştır. Sinterleme sırasında altlık malzeme ile reaksiyonu önlemek için, numuneler grafit plakalar üzerinde sinterlenmiştir. Numuneler, 5°C/dak. soğutma hızı ile fırın ortamında oda sıcaklığına kadar bekletildikten sonra dış ortama alınmıştır.

2.3. Yoğunluk, Gözenek Morfolojisi ve Aşınmış Yüzeylerinin Karakterizasyonunun Belirlenmesi (Determination of Worn Surface Characterization, Porous Morphology, Density)

İmal edilen TM Ti alaşımı numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk ölçümleri Arşimed metoduyla belirlenmiştir. Sinterleme sonrası ortalama % boyut ve yoğunluk değişimi her bir alaşım için beş adet



Şekil 2. Sıkıştırma kalıbı konstrüksiyonu (a) ve numune geometrisi (b). (Pressing die construction and specimens geometry)

numune üzerinden ölçümler alınarak tespit edilmiştir. Boyutsal ölçümler, 0,01 mm hassasiyetinde mikrometre ve 0,02 mm hassasiyetinde kumpaslar ile belirlenmiştir. Mikroyapı incelemeleri için, her bir alaşımın numune ön hazırlık aşamasında, 400, 600, 800, 1250 ve 2000 numara zımpara ile zımparalanmış ve elmas macun ile parlatma işlemi yapılmıştır. Dağlama sıvısı olarak % 10 HF, % 5 HNO₃ ve % 85 H₂O kullanılmıştır.

TM ile imal edilen üç farklı Ti alaşımının mikroyapılarının incelenmesi için Olympus Bx51 model polarize optik mikroskop ve ZEISS marka Supra 50 VP model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Mikroskopik incelemelerde, ilk olarak her bir Ti alaşımını oluşturan elementlerin yapıda homojen olup olmadığı, gözenek morfolojisi ve daha sonra da aşınan yüzeylerin karakteristikleri belirlenmiştir.

2.4. Eğme Deneyi ve Sertlik Testleri (Bending Strength and Microhardness Tests)

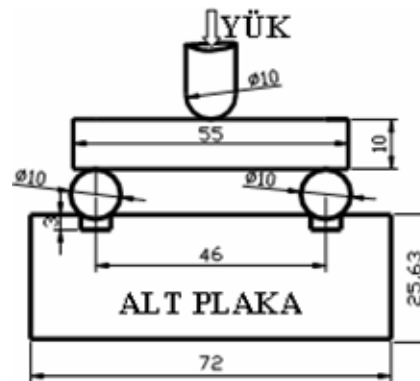
Üç farklı TM Ti alaşımı için beşer numune üzerinden mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikrosertlik ölçme işlemleri Metkon MH3 marka mikrosertlik cihazında vickers ucu kullanılarak, 200 g yük 20 s. uygulanarak yapılmıştır.

Eğme deneyleri Controls (Milano) marka, 3000 kgf. maksimum yük kapasitesine sahip eğme cihazında yapılmıştır. Her bir Ti alaşımının çapraz kırılma mukavemeti karakterizasyonu beş numune ile belirlenmiştir. MPIF 35-41 standardına göre [11], Şekil 3'de verilen ve iki noktadan mesnetlenerek tek noktadan eğme yükünün uygulanabilmesi için aparat imal edilmiştir. Mesnetlerde kesme gerilmesi

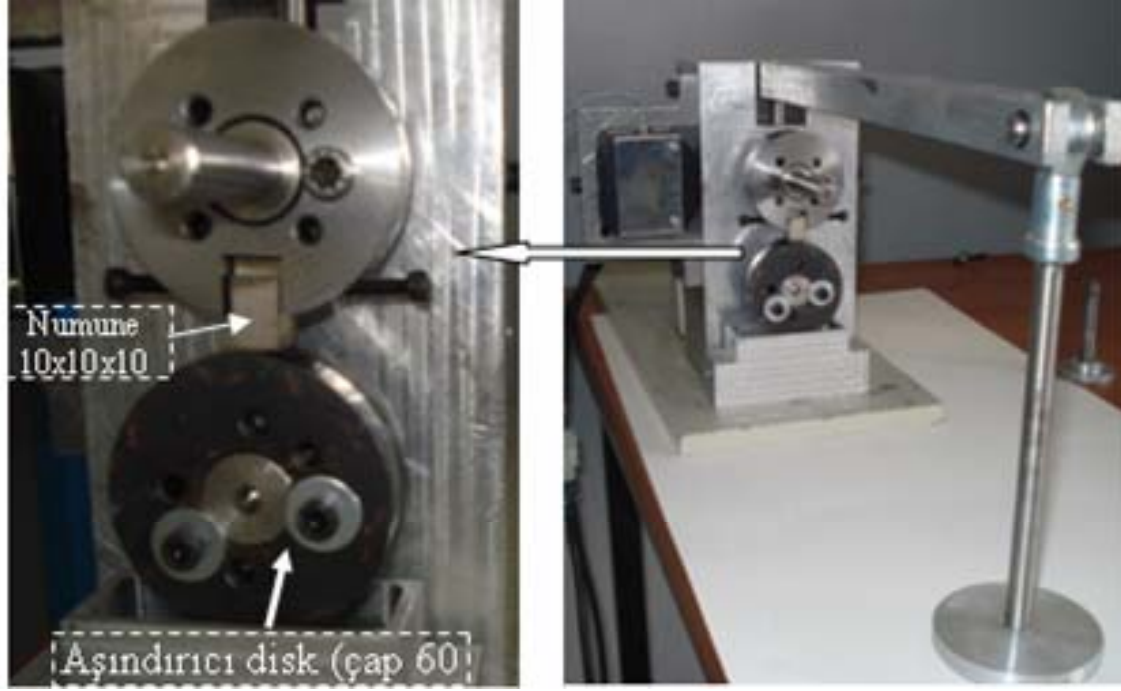
oluşumunu engellemek için mesnetlerin temas bölgelerinde radyüs oluşturularak önlem alınmıştır. Numunelerde kırılma olana kadar F yükü sabit bir hızla artırılmıştır.

2.5. Aşınma Deneyleri (Wear Tests)

TM Ti numunelerin aşınma performansları Şekil 4'de sistematığı verilen pin-on-disk sürtünme ve aşınma test ünitesinde tespit edilmiştir. Aşındırıcı disk olarak kullanılan DIN 1.2379 sertleştirilmiş soğuk iş takım çeliğine karşı kuru sürtünme durumunda 75 N yükleme ve 0,25 m/s disk dönme hızıyla, toplam 2400 m. sürtünme mesafesi uygulanarak ve her 400 m.'de ağırlık kaybı (g) ölçülerek belirlenmiştir. 2400 m toplam sürtünme mesafesinde, sinterlenmiş TM titanyum alaşımlarının kütle kaybı ölçülerek karşılaştırılmış ve daha az aşınan alaşım tespit edilmiştir.



Şekil 3. Eğme deney düzeneği ve numunesi (Bending strength test setup and test specimen)



Şekil 4. Pin-on-disk sürtünme ve aşınma test düzeneği (Pin-on-Disc friction and wear test setup)

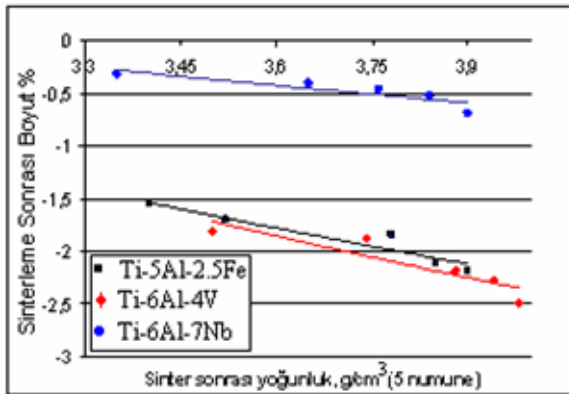
3. DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENTAL RESULTS)

3.1. Sinterleme Sonrası Yoğunluk-% Boyut

Değişimi (Density and % Dimension Alterations after sintering)

Beş numune ile belirlenen sinterleme sonrası ortalama % boyut değişimi ve yoğunluk değerleri Şekil 5'de verilmiştir.

Sinterleme sonrası beş numune ile tespit edilen yoğunluk-% boyut değişimine göre, Ti-6Al-7Nb alaşımında ortalama %-0,5 boyutta çekme gözlenirken, diğer iki alaşımında ise bu değer ortalama %-2 mertebesinde olduğu görülmüştür. Makroskobik olarak daha fazla boyutsal çekme meydana gelen Ti-6Al-4V ve Ti-5Al-2,5Fe alaşımlarında, Ti-6Al-7Nb alaşımına göre sinter mekanizmasının daha iyi geliştiği hakkında ilk bilgi elde edilmiştir.



Şekil 5. Sinterleme sonrası yoğunluk değeri ve % boyut değişimi arasındaki ilişki. (Relation between density and % dimension change)

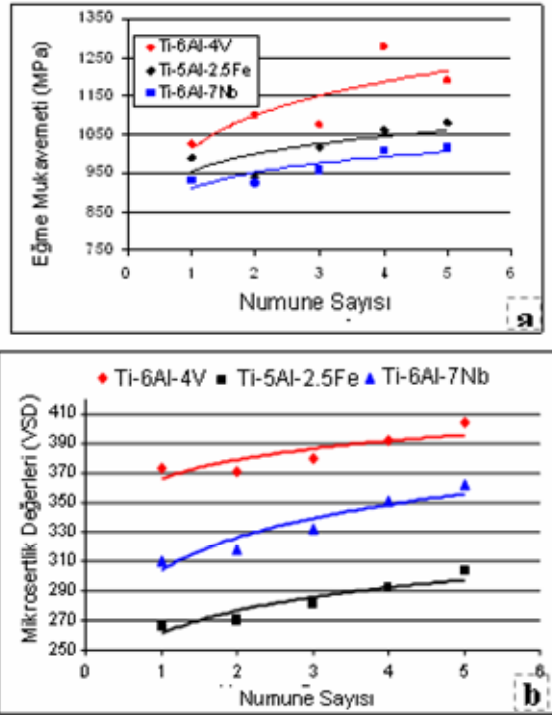
3.2. Eğme Mukavemeti ve Mikrosertlik Değerleri (Bending Strength and Micro Hardness Values)

Eğme deneyi ile kırılan numunelerin eğme dayanımları Şekil 6-a.'da verilmiştir. Toz metal parçalarda imal edilen parçaların sertlik ve eğme dayanımı gibi mekanik özellikleri, her preslemede farklılık gösterebilmektedir. Bundan dolayı, her bir alaşımın ortalama sertlik ve eğme mukavemet değerleri beşer numune ile tespit edilmiştir.

Her bir alaşım için eğme mukavemeti aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

$$\sigma_e = \frac{3 \times F \times L}{2 \times b \times h^2} \quad (1)$$

σ_e eğme mukavemeti (MPa), F kırılmayı oluşturan eğme yükü (N), L numunenin boyu (mm), b numunenin eni (mm) ve h ise numunenin yüksekliği (mm)'dir. Şekil 6a incelendiğinde, Ti-6Al-4V alaşımı aynı sinterleme koşullarında daha eğme mukavemetine sahip olduğu görülür. Sinterleme sonrası düşük yoğunluk değerine sahip Ti-6Al-7Nb alaşımı, Nb ilavesi ile beklenen yüksek eğme mukavemetini sağlamamıştır. Mukavemet değerinin düşük olması, % boyut değişiminin düşük olmasıyla düşük yoğunluk değerine sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ti-5Al-2,5Fe alaşımında ise beklenen mukavemet değerine ulaşılmıştır. Ti-6Al-4V alaşımı ortalama 380 HV sertlik değerine sahip iken, Ti-5Al-2,5Fe alaşımında ise ortalama 280 HV sertlik değeri elde edilmiştir. Ti-6Al-7Nb alaşımında ise, ortalama 330 HV sertlik değeri olduğu Şekil 6b'de görülmektedir.

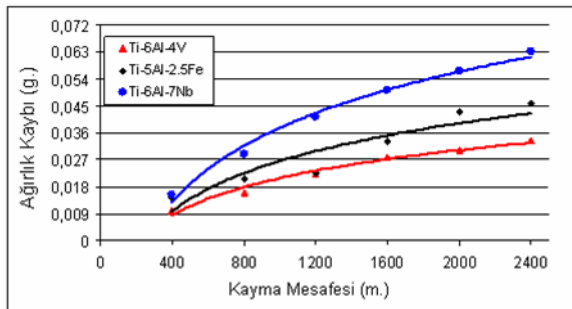


Şekil 6. Sinterlenmiş Titanyum Numunelerin Eğme Mukavemeti (a), Mikrosertlik Değerleri (b) (Bending strength and microhardness value measured these sintered Ti Alloys)

3.3. Kuru Kayma Şartlarında Aşınma Performansı (Wear Performance Under Dry Sliding Conditions)

Kuru kayma şartlarında yapılan pin-on-disk aşınma deneylerinde, Ti-6Al-7Nb alaşımı düşük aşınma performansı gösterirken, yüksek mukavemetli Ti-6Al-4V alaşımı en az ağırlık kaybı ile yüksek aşınma performansına sahip alaşım olarak nitelendirilmiştir. Ti-5Al-2.5Fe alaşımı ise Ti-6Al-7Nb alaşımından daha yüksek aşınma performansına sahip olduğu Şekil 7'de görülmektedir.

Ti-6Al-4V alaşımı, 2400 m. kayma mesafesi sonrası 0,032 g. ağırlık kaybı ile yüksek aşınma performansına sahipken, Ti-6Al-7Nb alaşımında ise 0,084 g. ağırlık kaybı gözlemlenmiştir. Ti-5Al-2,5Fe alaşımında ise, 2400 m. sürtünme sonrası toplam 0,048 g. ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Aşınma değerlerinin yoğunluk artışına bağlı olarak geliştiği görülmüştür. Düşük çekme payına sahip Ti-6Al-7Nb



Şekil 7. TM Ti alaşımlarının sürtünme mesafesi ve ağırlık kaybı (Sliding distance and weight lose for PM Ti alloys)

alaşımında, aşınma dayanımı diğer alaşımlara göre düşük olduğu tespit edilmiştir. Ti-5Al-2,5Fe alaşımının mikrosertliği Ti-6Al-7Nb alaşımına göre yaklaşık % 12 düşük olmasına rağmen, daha yüksek yoğunluk değeri ile daha iyi aşınma performansı göstermiştir.

3.4. Mikroyapı ve Kırık Yüzey Analizleri (Microstructure and Fracture Surface Analyses)

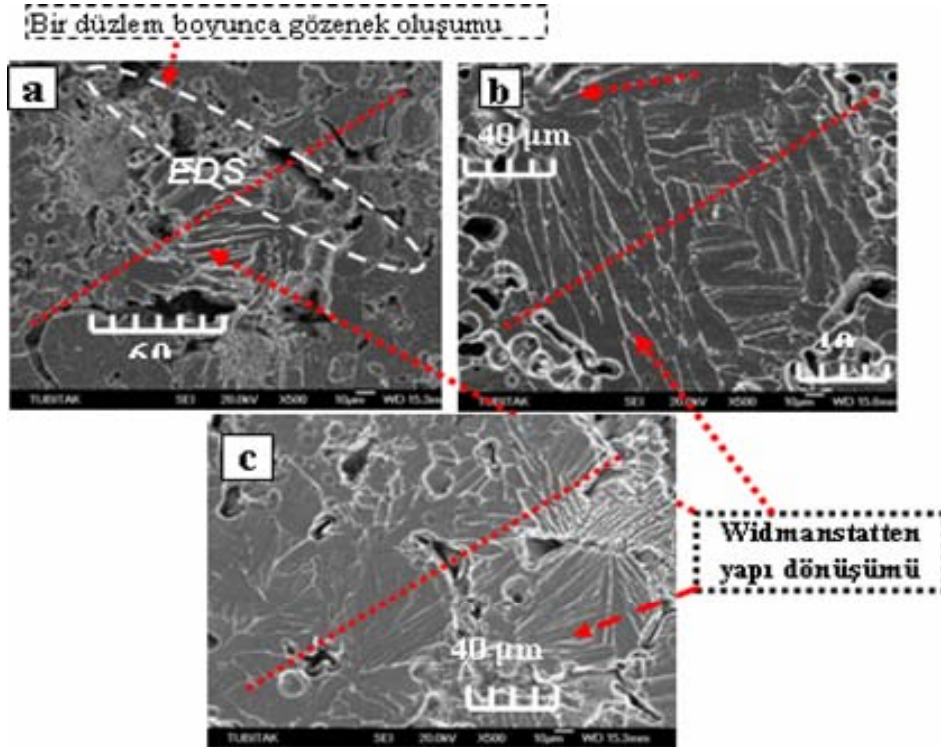
Aşınma performanslarının ve mukavemet değerlerinin daha iyi yorumlanabilmesi için, gözenek morfolojisi, eğme deneyi sonrası kırılan numunelerin kırık yüzeyleri incelenmiştir. Alaşımların mikroyapıları, oluşan gözenek morfolojisi Şekil 8'de ve yapıların EDS analizleri Şekil 9'da verilmiştir.

Şekil 8a'da görüldüğü gibi, aşınma dayanımı ve % boyut değişimi (shrinkage) düşük olan Ti-6Al-7Nb alaşımında, yaklaşık 60 µm gözenek büyüklüğü, karmaşık gözenek şekli ve dağılımı ve daha az sinter bağ oluşumu gözlemlenmiştir. Gözenek büyüklüğünün artmasıyla aşınma dayanımının düştüğü mikroskopik analizlerde görülmüştür. Diğer iki alaşımında ise uygun sinter mekanizması gözlemlenmiş olup, yaklaşık 40 µm gözenek büyüklüğü ve küresele yakın gözenek yapıları ile benzer aşınma karakteristiği ve % boyut değişimi tespit edilmiştir. Sinterleme sonrası düşük % boyut değişimi ile gözenek büyüklüğünün artması ve buna paralel olarak Ti-6Al-7Nb alaşımından beklenen daha yüksek aşınma performansı ve eğme mukavemeti sağlanamamıştır. Gözeneklerin küresele yakın ve sinter bağların yoğun olması ile aşınma dayanımının iyileştiği gözlemlenmiştir.

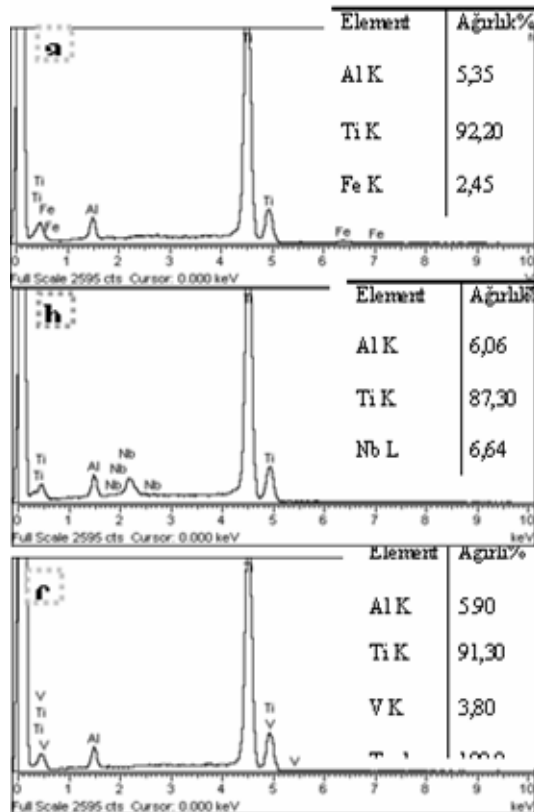
Eğme deneyi ile kırılan numunelerin kırık yüzeylerinden alınan EDS analizlerine göre, her bir alaşımın mikro yapılarının homojen olduğu Şekil 9'da görülmektedir.

EDS analizleri, sinterleme ortamının saflığını ve homojen alaşımın sağlanabildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, kırılmanın heterojen yapıdan kaynaklanmadığı da EDS analizleri ile ortaya konulmuştur. Başlangıçta, elementel olarak hazırlanan alaşımlar, sinterleme sonrası herhangi bir elementle reaksiyona girmemiş ve homojen Ti alaşımları üretilebilmiştir. Eğme ile kırılan numune yüzeyinde, herhangi bir impürte veya heterojenite oluşmadığı, alaşımların EDS analizleri ile tespit edilmiştir. Ayrıca, belirlenen sinterleme şartlarında, çalışılan Ti alaşımlarında literatüre [2] benzer widmanstatten yapının elde edilebildiği Şekil 8'de görülmektedir.

Eğmeye tabi tutulan Ti-6Al-4V alaşımında yoğun sinter bağ oluşumu ve gözeneklerin küresel forma dönüştüğü Şekil 10c'de görülmektedir. Kırılma çoğunlukla taneler arası sinter bağlarda meydana gelmiştir. Ti-6Al-7Nb alaşımında ise, karmaşık şekil ve daha büyük gözeneklerden dolayı tanelerde ayrışma meydana gelmiştir (Şekil 10a). Ayrıca, sinter bağ oluşumunun zayıf olmasıyla birlikte büyük



Şekil 8. Alaşımların mikro yapısı ve gözenek morfolojisi, Ti-6Al-7Nb (a), Ti-6Al-4V (b), Ti-5Al-2,5Fe (c) (Microstructure and pores morphology of Ti alloys)



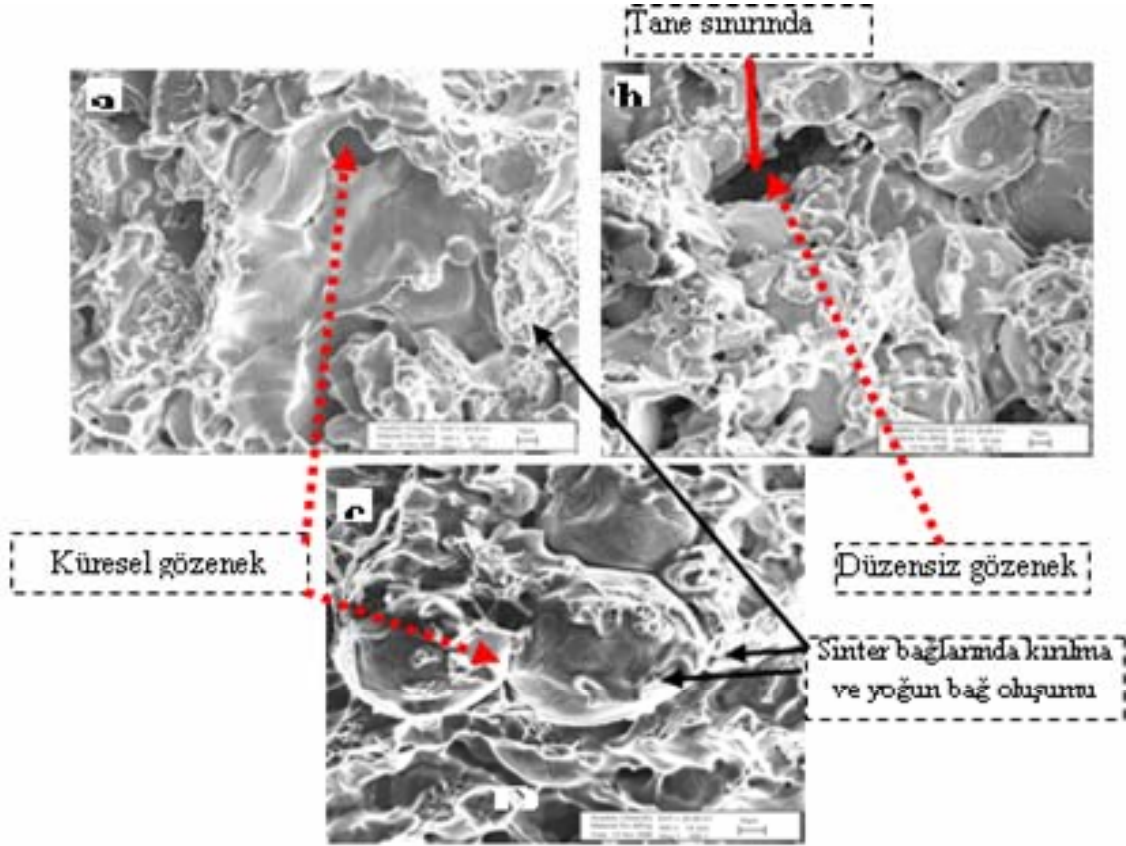
Şekil 9. Alaşımların eğme deneyi sonrası kırık yüzeylerinden alınan EDS analizleri, Ti-5Al-2.5Fe(a), Ti-6Al-7Nb(b), Ti-6Al-4V (c). (EDX analyses from fracture surface after bending test for sintered Ti alloys)

gözenek oluşumu Şekil 10b'de görülmektedir. Bu durum, taneler arası bağ mukavemetini düşürerek, eğme durumunda daha düşük eğme mukavemetine neden olmuştur. Sinter difüzyon mekanizması yoğun bir şekilde gelişen Ti-5Al-2.5Fe alaşımında ise küresel formda ve daha küçük gözenek ve sıklıkla sinter bağlarında kırılma meydana gelmiştir ve yoğun sinter bağ oluşumu Şekil 11a'da gözlemlenmektedir. SEM analizleri, Ti-6Al-7Nb alaşımında oluşan sinter mekanizmasının diğer alaşımlara göre elverişsiz olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 10b).

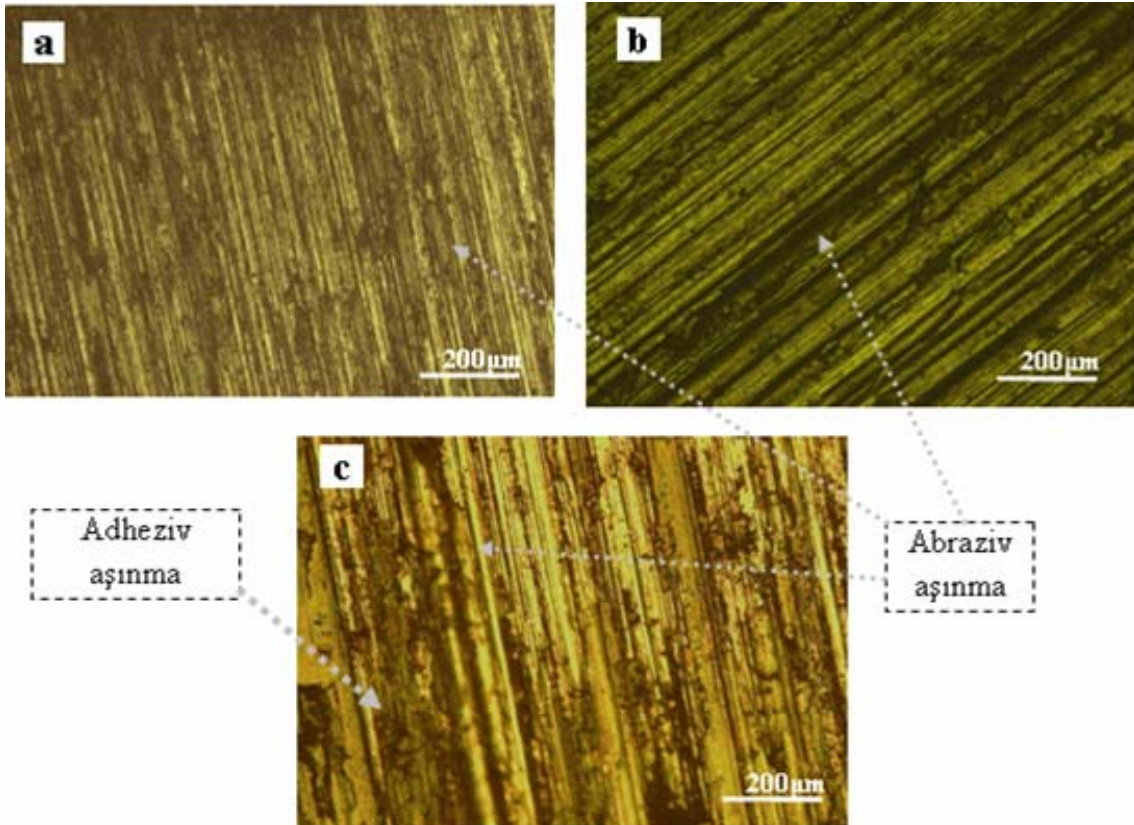
Aşınma performansını ve eğme mukavemetini arttırması beklenen Nb ilavesi, sinter difüzyonunun elverişsiz bir şekilde olmasından dolayı diğer alaşımlara göre düşük mukavemet ve aşınma performansına neden olmuştur.

3.5. Aşınmış Yüzeylerinin Analizi (Worn Surface Analyses)

Pin-on disk aşınma deneyine tabi tutulan sinterlenmiş titanyum alaşımlarının aşınmış yüzey karakteristiği aşınma çizik yoğunluğu ve tipine bağlı olarak belirlenmiştir ve bu durum Şekil 11'de görülmektedir.



Şekil 10. Eğme deneyi sonrası elde edilen kırık yüzey analizlerinin SEM mikroskopunda analizleri a) Ti-5Al-2.5Fe, b) Ti-6Al-7Nb, c) Ti-6Al-4V (c) (Fracture surface analyses for Ti-5Al-2.5Fe, Ti-6Al-7Nb and Ti-6Al-4V alloys)



Şekil 11. Aşınmış yüzeylerin optik mikroskopta görüntüsü, Ti-6Al-4V (a), Ti-6Al7Nb (b), Ti-5Al-2.5Fe (c) (Image of the worn surface at optical microscope)

Bütün alaşımlarda abrazyon aşınma mekanizması gözlemlenmiştir. Toplam 2400 m. sürtünme mesafesi sonrası Ti-6Al-4V alaşımı, diğer alaşımlara göre daha az aşınma meydana gelmiştir. Bu alaşımda, numunede oluşan çizikler daha yüzeysel ve ince formda gelişmiştir. Ti-6Al-7Nb alaşımında ise, aşınmış yüzeydeki çizikler daha derin ve kalın bir şekilde olduğu Şekil 11b'de görülmektedir. Ti-6Al-7Nb alaşımında oluşan karmaşık şekilli ve büyük gözenekli yapı, yüzeylerde aşınmayı yoğunlaştırmıştır.

Sinter bağlarının zayıf olması ile ilişkili olarak da oluşan abrazyon aşınma mekanizmasının yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Ti-5Al-2.5Fe alaşımında, Ti-6Al-4V alaşımından yüksek, Ti-6Al-7Nb alaşımından ise düşük kütle kaybı meydana gelmiştir. Bu alaşımda aşınmış yüzeylerdeki izlerin oluşumu da, kütle kaybı ile uyumlu olduğu Şekil 11b'de görülmektedir. Ti-5Al-2.5Fe alaşımında, mikrosertlik değerinin düşük olmasından dolayı kısmen adheziv aşınma mekanizması oluşmakla birlikte abrazyon aşınma da meydana gelmiştir. Bu alaşımda, abrazyon çizikler Ti-6Al-7Nb alaşımına göre daha ince, Ti-6Al-4V alaşımına göre daha kaba bir formda oluşmuştur (Şekil 11c).

4. SONUÇLARIN YORUMLANMASI (DISCUSSION OF RESULTS)

İleri mühendislik malzemesi olarak bilinen titanyum alaşımlarının toz metalurjisi yöntemiyle imal edilebilmesi için yapılan bu deneysel çalışmada, gözenek yapısının aşınma ve bazı mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb ve Ti-6Al-2.5Fe alaşımları ile TM yöntemi kullanılarak numuneler imal edilmiş ve mikrosertlik, eğme ve kuru kayma şartlarında aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 8 ve Şekil 10'da görüleceği üzere, TM malzemelerde eğme dayanımı gözenek şekli ve büyüklüğü ile doğrudan ilişkilidir. Ti-6Al-7Nb alaşımı daha büyük ve karmaşık şekilli gözenekler dolayı, eğme durumunda mukavemet değerinde belirgin düşüş gözlenmiştir. Diğer iki alaşımda ise birbirine yakın eğme mukavemeti tespit edilmiştir. Ti-6Al-7Nb alaşımında tespit edilen daha büyük ve karmaşık şekilli gözenek oluşumu ile diğer alaşımlara göre daha yoğun abrazyon aşınmaya maruz kaldığı Şekil 11b'de açık bir şekilde görülmektedir. Makroskobik anlamda, Ti-6Al-7Nb alaşımı için % boyutsal çekme ile öngörülen düşük sinter bağ oluşumunun elverişsizliği, SEM analizleri ile tespit edilen büyük gözenekli yapı ve bir doğrultu boyunca gelişmemiş sinter bağları ile de açık bir şekilde görülmüştür (Şekil 8a). Bu yapı, Ti-6Al-7Nb alaşımının hem mukavemetini hem de aşınmaya dayanımını düşürmüştür.

İmal edilen Ti alaşımlarında literatürle [12, 13, 14] uyumlu sertlik değerleri elde edilmiş ve Ti-5Al-2.5Fe

alaşımının sertliği Ti-6Al-7Nb alaşımına göre daha düşük fakat küresel şekle yakın ve gözeneklerin daha küçük olmasıyla aşınma dayanımının daha yüksek olduğu Şekil 8'de verilen kayma mesafesi-kütle kaybı grafiğinde görülmektedir. Sertliği Ti-5Al-2.5Fe alaşımına göre daha yüksek olan Ti-6Al-7Nb alaşımında, daha büyük gözenek oluşumu ile yüksek sertliğe rağmen düşük aşınma performansı görülmüştür. Bunun temel nedeni, zayıf sinter bağ oluşumundan dolayı yapıdan sert partiküllerin kolayca ayrışması ve disk ile numune arasında abrazyon etkiyi arttırdığı düşünülmektedir. Ti-6Al-7Nb alaşımı aşınmış yüzey morfolojisi incelendiğinde (Şekil 11b), Ti-6Al-4V alaşımına göre (Şekil 11a) daha derin ve geniş abrazyon çiziklerin meydana geldiği görülür. Derin ve geniş abrazyon çiziklerin, Ti-6Al-4V alaşımına göre daha fazla kütle kaybı meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, TM Ti alaşımlarında aşınma dayanımı gözenek büyüklüğünün artmasıyla azalmıştır. Aşınma deneyinde, mikrosertlik değerinin düşmesiyle adheziv aşınma mekanizması (Şekil 11c), sertliğin artmasıyla da abrazyon aşınma mekanizması (Şekil 11b) etkili olmuştur. Ti-6Al-7Nb ve Ti-6Al-4V alaşımında yüksek mikrosertlikten dolayı abrazyon aşınma mekanizmasının, Ti-5Al-2.5Fe alaşımında ise düşük mikrosertlikten dolayı abrazyon aşınma ile birlikte adheziv aşınma mekanizmasının da olduğu Şekil 11c'de görülmektedir. Şekil 11a ve Şekil 11b'de görüleceği üzere, abrazyon aşınma, numune sertliğinin artmasıyla disk ile numune arasına giren sert partiküllerin oluşturduğu abrazyon çiziklerden oluşmaktadır. Ancak, Ti-5Al-2.5Fe alaşımında diğer alaşımlara göre sertliğin düşük olması, abrazyon çiziklerle birlikte lokal kütle kaybının olduğu bölgelerde de adheziv aşınma mekanizmasının etkili olduğu Şekil 11c'de görülmektedir. Aslında, bu alaşımda abrazyon ve adheziv aşınmanın birlikte olduğu karmaşık (catastrophic) aşınma ile kütle kaybı meydana geldiği de söylenebilir.

SEM analizleri ile tespit edilen büyük ve karmaşık şekilli gözenekli yapıya sahip Ti-6Al-7Nb alaşımında, sinter mekanizmasının iyi gelişmediği anlaşılmaktadır. Henriques vd. (2001) yaptıkları çalışmada, Ti-6Al-7Nb alaşımında 1300°C sıcaklıkta sinterleme ile Widmanstatten yapının gelişmeye başladığını ve Nb elementinin 1500°C sıcaklıkta sinterleme ile difüzyon mekanizmasının elverişli olduğunu rapor etmişlerdir [15].

Liu vd. (2006), sinterlenmiş titanyum esaslı alaşımlarda 1250 °C sıcaklıkta sinterleme sonrası % -1,5 ve %-2,5 aralığında lineer bir boyutsal küçülme olabileceğini ifade etmişlerdir [8]. Bu çalışmada da, Ti-6Al-4V ve Ti-5Al-2.5Fe alaşımlarında sinterleme sonrası ortalama %-2 boyut değişimi gözlenirken, Ti-6Al-7Nb alaşımında % -0,5 boyutta çekme olduğu Şekil 6'da görülmektedir. Sinterleme sonrası daha düşük % boyutta azalma ile daha az sinter bağ oluşumuna ve büyük gözenekli yapıya sahip Ti-6Al-

7Nb alaşımında, düşük eğme mukavemeti ve aşınma performansı tayin edilmiştir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Aynı presleme ve sinterleme koşullarında imal edilen üç farklı titanyum alaşımında aşınma dayanımı, sertlik ve eğme mukavemet değerleri elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışma ile aşağıdaki sonuçlar çıkartılmıştır:

- Sinterleme sonrası gözenekli parçalarda aşınma dayanımını gözenek büyüklüğü ve şekli etkilemektedir. Küresel şekle yakın ve küçük gözenekli yapının aşınmaya dayanımının yüksek olduğu söylenebilir.
- Makroskobik anlamda sinterleme sonrası % boyut değişimi, sinterlemenin elverişli olup olmadığı konusunda ilk bilgiyi vermektedir. Ti-6Al-4V ve Ti-5Al-2.5Fe alaşımlarında olduğu gibi, daha yüksek boyutsal küçülme ile daha yoğun sinter bağ oluşumunun gerçekleştiği Şekil 11’de görülmektedir.
- Ti-6Al-7Nb alaşımında olduğu gibi, sinterleme sonrası büyük gözeneklere sahip yapılarda gözenek büyüklüğü, taneler arası bağların mukavemetini düşürmesiyle düşük eğme mukavemeti ve sürtünme durumunda ise kolay ayrışmadan dolayı abrazyon etkiyi arttırdığı sonucuna varılmıştır. Alaşımlarda sertliğin artmasıyla abrazyon aşınması, azalmasıyla da adheziv aşınma (yapışma eğilimi) yoğunlaşmaktadır.
- Titanyum alaşımlarında sinterlemenin vakum ve koruyucu gaz atmosfer ortamında yapılmasıyla kimyasal olarak homojen yapılar elde edilebilir. Bu alaşımlarda, 5°C/dak. ısıtma-soğutma hızında yapılan sinterleme işleminin, gerekli Widmanstätten yapı dönüşümünü sağladığı söylenebilir. Metalografik çalışmalar sonrası, Ti-6Al-7Nb alaşımında gözlemlenen zayıf sinter bağ oluşumu ve büyük gözenekli yapı, literatürle [15, 16] uyumlu olarak bu alaşımda 1250°C sıcaklıkta sinterlemenin elverişli olmadığını ortaya koymuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGE)

Çalışmayı destekleyen TÜBİTAK ve SDÜ BAP birimine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERANCES)

1. ASM Metals Handbook, “Powder Metallurgy and Applications”, Vol. 7, ASM International, USA, 1998.
2. Donachie, M.J., “Titanium a Technical Guide, The Material Information Society”, Second Edition, USA, 2000.

3. Titanium Industries, 2006. İnternet Sitesi.http://www.titanium.com/titanium/applics.cfm. Erişim Tarihi: 12.07.2006.
4. Leyen, C., Peters, M., “Titanium and Alloys, Fundamentals and Applications”, Wiley-Vch, Köln, Gemany, 2003.
5. ASM Metals Handbook, “Properties and Selections: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials”, Vol. 2, ASM International, USA, 1991.
6. Erdoğan, M., “Mühendislik Alaşımların Yapı ve Özellikleri”, 2. Baskıdan Çeviri, Cilt 2, Ankara, 2001.
7. Güden, M., Çelik, E., Akar, E., Çetiner, S., “Compression Testing of a Sintered Ti6Al4V Powder Compact for Biomaterials Applications”, Materials Characterization, 54, 399-408, 2005.
8. Lin, W.C., Ju, P.C., Chern Lin, J.H., “A Comparison of the Fatigue Behavior of the Cast Ti 7.5Mo with Cp Titanium, Ti-6Al-4V and Ti-13Nb-13Zr Alloys”, Biomaterials, 26, 1899-2907, 2005.
9. Archbold, J., “Sintering Temperature Effects on the Mechanical Properties of Porous-Coated Ti-6Al-4V ELI Alloy”, Master Degree of Applied Science, Graduate Department of Metallurgy and Material Science, University of Toronto, Canada. 90-106, 1999.
10. Froes, F.H., Eylon, D. and Bombergers Eds., “Titanium Technology: Presents Status and Future Trends”, TDA, Dayton, OH, 1985.
11. MPIF Standard 35, “Materials Standards for P/M Structural Parts”. MPIF, USA, 2000.
12. Aoki, T., Okafor, I.C.I., Watanabe, I., Hattori, M., Oda, Y. And Okabe, T., “Mechanical Properties of Cast Ti-6Al-4V-XC Alloy”, Journal of Oral Rehabilitation, 31, 1109-1114, 2004.
13. Niinomi, B., “Mechanical Properties of Biomedical Alloys”, Materials Science and Engineering A 243, 231-236, 1998.
14. Vinicius, A.R., Henriques, Bellinati, E.C., Silva, C.R.M., “Production of Ti-6Al-7Nb Alloy by Powder Metallurgy”, Journal of Materials Processing Technology, 118, 212-215, 2001.
15. Henriques, V.A.R., Campos, P.P., Cairo, C.A.A., Bressiani, C.J., “Production of Titanium Alloys for Advanced Aerospace Systems by Powder Metallurgy”, Material Research, 8 (4), 443-446, 2005.
16. Yalçın, B., Toz Metalurjisi Yöntemiyle İmal Edilen Ti Alaşımı İmplantların Temel Özelliklerinin Araştırılması, SDÜ., Fen Bil. Enst., Makine Mühendisliği A.D., Isparta, 2007.