

## TİCARİ SAF TİTANYUMUN YORULMA DAVRANIŞI

Mehmet CİNGİ, Onur MEYDANOĞLU, Murat BAYDOĞAN,  
Hüseyin ÇİMENÖĞLU ve E. Sabri KAYALI

İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü  
34469 Maslak, İstanbul - Türkiye

### ÖZET

Bu çalışmada, 600°C’de 60 saat süreyle uygulanan termal oksidasyonun ticari saflıktaki titanyumun (Cp-Ti) dönel eğmeli yorulma davranışına etkisi incelenmiştir. Termal oksidasyon, yüzeyde 1 µm kalınlığında bir oksit tabakası ve bunun hemen altında yaklaşık 25 µm kalınlığında bir oksijen difüzyon bölgesi oluşturmuştur. Termal oksidasyon sonucu, orijinal duruma göre akma ve çekme dayanımı ile süneklik değerlerinde önemli bir değişim olmaksızın yüzey sertliği 650HV<sub>0.01</sub> değerine ulaşmıştır. Dönel eğmeli yorulma dayanım sınırı orijinal durumda 275 MPa olup, termal oksidasyon sonrası 235 MPa değerine düşmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Oksidasyon, Titanyum, Yorulma.

### FATIGUE BEHAVIOR OF COMMERCIALY PURE TITANIUM

#### ABSTRACT

In this study, the effect of thermal oxidation on the rotating bending fatigue behavior of commercially pure titanium (Cp-Ti) was investigated. Thermal oxidation, which was performed at 600°C for 60 h in an air furnace, resulted in the formation of 1 µm thick oxide layer with a 25 µm oxygen diffusion zone beneath it. Thermal oxidation considerably improved surface hardness to 650HV<sub>0.01</sub> without any significant change in yield and tensile strengths as well as tensile ductility. Rotating bending endurance limit at 5x10<sup>6</sup> cycles decreased from about 275 MPa to about 235 MPa upon oxidation.

**Keyword:** Fatigue, Oxidation, Titanium.

## 1. GİRİŞ

Titanyum ve titanyum alaşımları, yüksek dayanım/ağırlık oranı ve yüksek korozyon direnci nedeniyle önemi son yıllarda giderek artan mühendislik malzemeleridir. Günümüzde özellikle havacılık sektöründe yaygın olarak tercih edilmelerinin yanı sıra, medikal, enerji, denizcilik ve kimya sektörlerinde de kullanılmaktadır [1,2]. Öte yandan, düşük aşınma direnci nedeniyle, sürtünme ve aşınmanın önemli olduğu mühendislik uygulamalarında tercih edilmemektedir [3-5].

Titanyum ve alaşımlarının düşük aşınma direnci, elektron düzeni, kristal yapı ve kayma dayanımı gibi iç yapı ile ilgili özelliklerden kaynaklandığından, ancak yüzey işlemleri ile geliştirilebilmekte ve bu amaçla, fiziksel buhar biriktirme, termal püskürtme, iyon aşılama ve yüzeyi, azot, karbon, bor ve oksijen gibi arayer atomlarınca zenginleştiren termo kimyasal difüzyon işlemleri kullanılmaktadır [1,6,7,8].

Titanyum ve alaşımları için oksijen difüzyonu en güvenilir termo kimyasal işlem olup, termal oksidasyon olarak isimlendirilmektedir. Son yıllarda titanyum ve alaşımlarının termal oksidasyonu konusunda çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda genellikle termal oksidasyon işlemi sonrasında titanyum ve alaşımlarının yüzey özellikleri, aşınma ve korozyon davranışları incelenmiştir [1,4,9-12]. Bu çalışmada ise aşınma ve korozyon direncinde önemli artışlar sağlayan termal oksidasyon işleminin ticari saf titanyumun yorulma davranışı üzerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Ticari saf titanyumun termal oksidasyon işlemi, numunelerin normal fırın atmosferinde 600°C sıcaklıkta 60 saat süreyle tutulmasıyla gerçekleştirilmiştir. Termal oksidasyon parametreleri daha önceki çalışmamızda elde edilen optimum aşınma ve korozyon direnci göz önüne alınarak belirlenmiştir [10,11].

Termal oksidasyon sonrasında saf titanyumun yüzey karakterizasyonu, numunelerin kesit mikroyapısının incelemesi ve yüzey mikrosertlik değerinin ölçülmesi ile yapılmıştır. Mikroyapı çalışmalarında, termal oksidasyon uygulanmış numuneler kesit boyunca kalıplanmış, standart zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuş ve daha sonra %2'lik HF çözeltisi ile dağlanarak optik mikroskopla incelenmiştir. Numune yüzeylerinin mikrosertlik değerleri, Vickers batıcı uç kullanılarak CSM mikrosertlik cihazında 10 g yük altında ölçülmüştür.

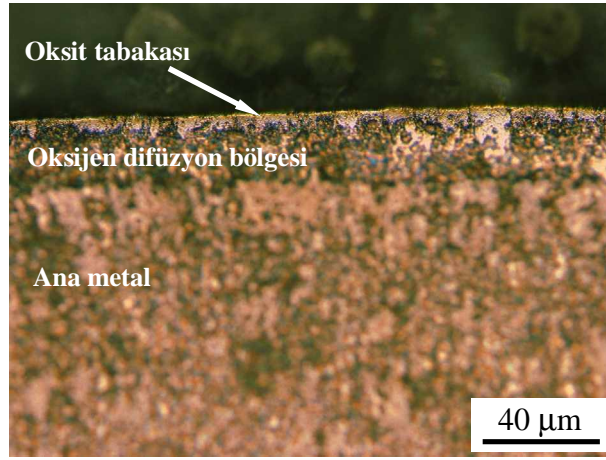
Termal oksidasyon öncesi ve sonrasında, numuneler çekme deneyine tabi tutularak, akma ve çekme dayanımı, kopma uzaması ve kesit daralması değerleri belirlenmiştir. Dönel eğmeli yorulma deneyleri için Walter Bai marka deney cihazı kullanılmış ve orijinal ile termal oksidasyon uygulanmış numuneler, 25 Hz frekansta farklı gerilme genliği değerlerinde dönel eğmeli yorulma deneylerine ( $R = -1$ ) tabi tutulmuştur. Hasar kriteri olarak numunelerin kırılmasının esas alındığı dönel eğmeli yorulma deneylerinde, her bir gerilme genliği için kırılma çevrim sayıları belirlenerek S-N eğrileri oluşturulmuş ve  $5 \times 10^6$  çevrimde numunelerin kırılmadığı gerilme genliği, yorulma dayanım sınırı olarak alınmıştır. Dönel eğmeli yorulma deneyleri sonrasında, numunelerin kırık yüzeyleri stereo mikroskop ile incelenmiştir.

## 3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Termal oksidasyon uygulanmış ticari saf titanyum numunesinin kesitine ait optik mikroyapı fotoğrafı Şekil 1'de verilmiştir. Termal oksidasyon sonucu, yüzeyde yaklaşık 1 µm kalınlığında oksit tabakası ve bu tabakanın hemen altında yaklaşık 25 µm kalınlığında oksijen difüzyon bölgesinin olduğu görülmektedir.

Orijinal ve termal oksidasyon uygulanmış numunelerin çekme deneyi ile yüzeylerinin mikrosertlik ölçüm sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir. Termal oksidasyon, akma ve çekme dayanımı ile süneklik (kopma uzaması ve kesit daralması) değerlerinde önemli bir değişime neden olmamış, ancak yüzey mikrosertlik değerini yaklaşık 2.5 kat arttırmıştır. Yüzey

sertliğinin bu şekilde artmasının, oksit tabakasının ve altında bulunan oksijen difüzyon bölgesinin oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



**Şekil 1.** Termal oksidasyon uygulanmış ticari saf titanyumun kesitinin optik mikroyapı fotoğrafı.

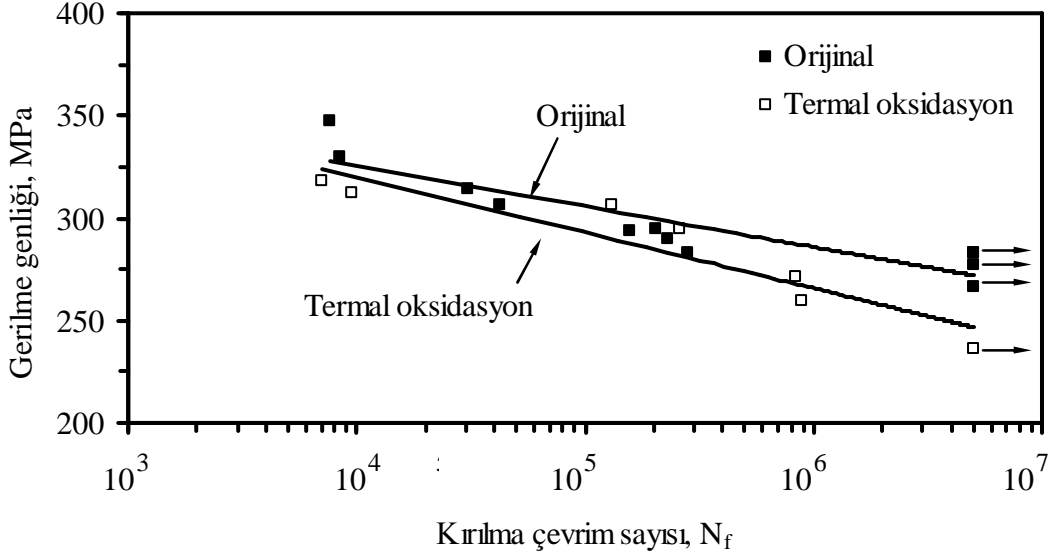
**Çizelge 1.** Orijinal ve termal oksidasyon uygulanmış Cp-Ti numunelerin mekanik özellikleri.

Mekanik özellik	Orijinal	Termal oksidasyon uygulanmış
Sertlik, HV <sub>0.01</sub>	240	650
Akma Dayanımı, MPa	361	360
Çekme Dayanımı, MPa	506	499
Kopma Uzaması, %	26.8	27.8
Kesit Daralması, %	44.8	45.0

Orijinal ve termal oksidasyon uygulanan numunelerin dönel eğmeli yorulma deneyleriyle elde edilen S-N eğrileri, Şekil 2’de verilmiştir. Genel olarak, her iki grup numune için kırılma çevrim sayısı, beklendiği gibi gerilme genliğindeki azalmaya paralel olarak artmıştır. Daha önce belirtildiği gibi, bu çalışmada kullanılan S-N eğrisi yaklaşımında, yorulma dayanım sınırı, numunelerin  $5 \times 10^6$  çevrimde kırılmadığı gerilme genliği olarak alınmış ve yorulma dayanım sınırı, orijinal numune için 275 MPa, termal oksidasyon uygulanmış numuneler için ise 235 MPa olarak belirlenmiştir. Buna göre termal oksidasyon işlemiyle yorulma dayanım sınırının yaklaşık % 15 oranında azaldığı görülmekle birlikte, yorulma dayanım sınırından daha yüksek gerilme genliği değerlerinde, orijinal ve termal oksidasyon uygulanmış numunelerin kırılma çevrim sayılarında önemli bir ayırt edici fark gözlenmemektedir. Bu durum, termal oksidasyon uygulanan numuneler için S-N eğrisinin eğiminin daha yüksek olmasına yol açmakta ve bunun sonucu olarak termal oksidasyon uygulanmış numunelerin yorulma davranışına gerilme genliğinin etkisinin, orijinal durumdaki numunelerden daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Dönel eğmeli yorulma deneylerine tabi tutulan orijinal ve termal oksidasyon uygulanmış numunelerin kırılma yüzeylerinin temsili stereo mikroskop fotoğrafları Şekil 3’de görülmektedir. İncelenen numunelerin kırılma yüzeylerinde, çatlakın yüzeyde başladığı ve numune kesiti boyunca ilerlediği ve nihai hasarın numunenin iç kesimlerinde olduğu görülmüştür. Bu yönüyle kırılma yüzeyleri, dönel eğmeli yorulma deneyine ait kırılma karakteristiklerini taşımaktadır. Gerek orijinal durumdaki gerekse termal oksidasyon

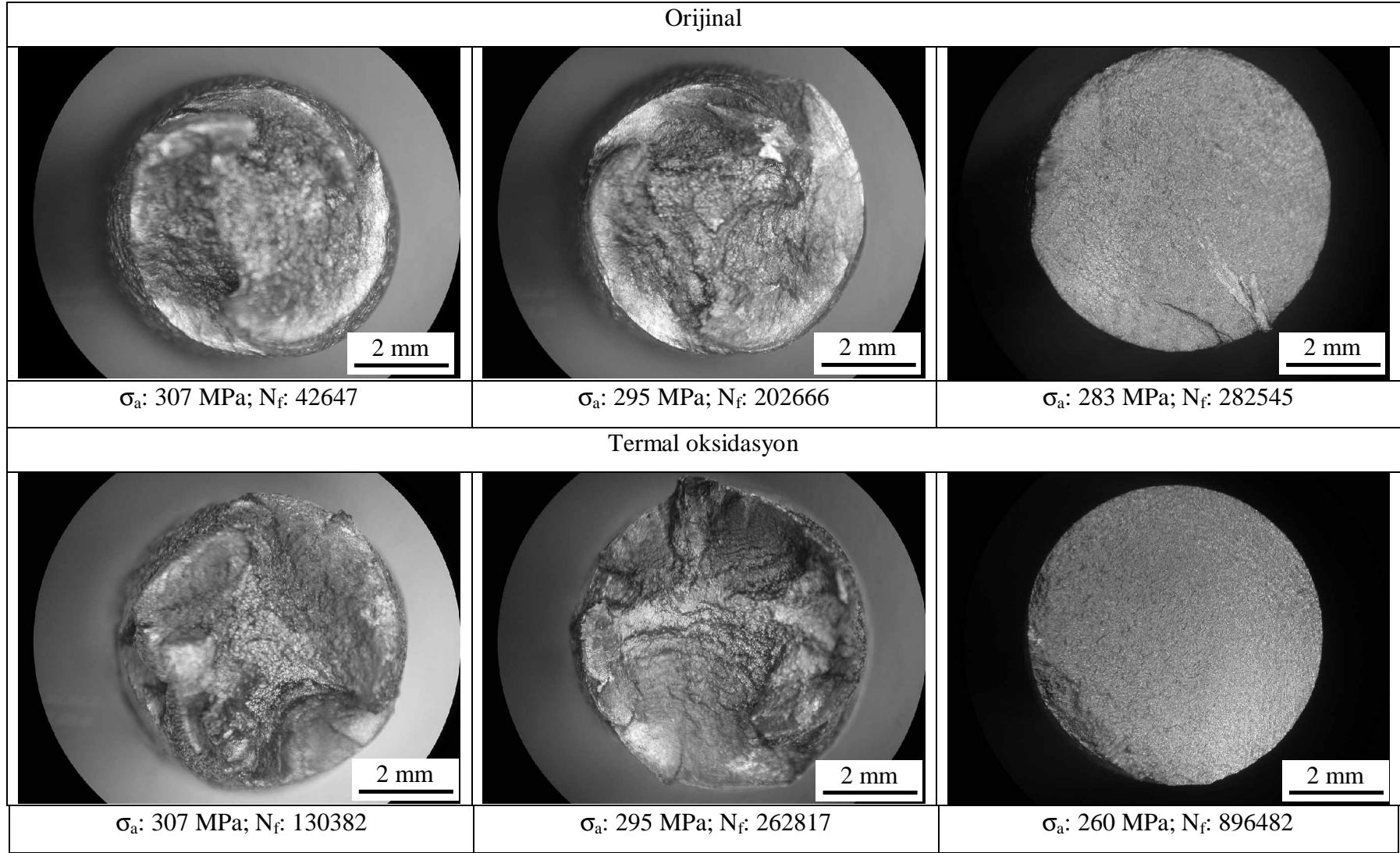
uygulanmış numunelerin kırılma yüzeyleri, yüksek gerilme genliği değerlerinde ( $\sigma_a$ : 307 MPa ve 295 MPa), birbirine benzerdir ve nispeten düz ve dar bir çatlak ilerleme bölgesi ile geniş ve engembeli bir nihai kırılma bölgesine sahiptir.



**Şekil 2.** Orijinal ve termal oksidasyon uygulanmış ticari saf titanyum numunelerin dönel eğmeli yorulma deneyleriyle belirlenen S-N eğrisi. (Oklar,  $5 \times 10^6$  çevrimde kırılmayan numuneleri göstermektedir)

Yorulma dayanım sınırına yakın düşük gerilme genliği değerlerinde ise ( $\sigma_a$ : 283 MPa ve 260 MPa), her iki numune yüzeyinin de oldukça büyük ve düz bir çatlak ilerleme bölgesi içermesi, yorulma ömrünün büyük kısmının çatlak ilerlemesi aşamasıyla geçtiğini ve numunelerin nispeten küçük bir nihai kırılma yüzeyi verecek şekilde kırıldıklarını göstermektedir.

Yüksek ve düşük gerilme genliği bölgelerinde yorulma deneyine tabi tutulan numuneler çatlak başlangıç noktası açısından kıyaslandığında, gerilme genliğinin yüksek olduğu numunelerde, yüzeyde çok sayıda çatlak başlangıç noktasının bulunduğu, düşük gerilme genliği değerlerinde deneye tabi tutulan numunelerde ise daha az sayıda çatlak başlangıç noktasının bulunduğu gözlenmiştir. Öte yandan, yüksek gerilme genliği değerlerinde, termal oksidasyon uygulanmış numunelerin kırılma yüzeyinde, orijinal durumdaki numunelerin yüzeyine göre nispeten daha fazla sayıda çatlak başlangıç noktasının bulunduğu görülmüştür. Bu durum, termal oksidasyon uygulanmış numunelerin yüzeyindeki sert oksit tabakasının ve altındaki oksijen difüzyon tabakasının, yüzeyde çatlak başlangıcını teşvik edici bir etkisi olduğuna işaret etmektedir.



**Şekil 3.** Dönel eğmeli yorulma deneyleri sonucu, numunelerin kırık yüzeylerin stereo mikroskop fotoğrafları.  
( $\sigma_a$ : Gerilme genliği,  $N_f$ : Kırılma çevrim sayısı)

#### 4. SONUÇLAR

Ticari saf titanyuma (Cp-Ti), 600°C’de 60 saat süreyle uygulanan termal oksidasyon ve daha sonra yapılan dönel eğmeli yorulma deneylerinde aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir:

1. Atmosferik koşullarda 600°C’de 60 saat süreyle yapılan termal oksidasyon işlemi, ticari saf titanyumun yüzeyinde 1µm kalınlığında oksit tabakası ve bu tabakanın hemen altında 25 µm kalınlığında bir oksijen difüzyon bölgesi oluşturmuştur.
2. Termal oksidasyon sonucunda orijinal duruma göre akma ve çekme dayanımı ve süneklikte önemli bir değişim olmaksızın yüzey sertliği orijinal duruma göre önemli oranda artmış ve 650HV<sub>0.01</sub> değerine ulaşmıştır.
3. Dönel eğmeli yorulma deneyi sonucunda, orijinal durumdaki ticari saf titanyum numunelerin yorulma dayanım sınırı 275 MPa, termal oksidasyon uygulanmış numunelerin ise 235 MPa olarak belirlenmiştir. Bu durum 600°C’de 60 saat süreyle yapılan termal oksidasyonun, ticari saf titanyumun dönel eğmeli yorulma dayanım sınırını yaklaşık % 15 düşürdüğünü göstermektedir.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 105M062 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında sağlanan destekle gerçekleştirilmiştir.

#### KAYNAKLAR

1. Boyer, R., Welsch, G., Collings, E.W., **Materials properties hand- book: titanium alloys**. Materials Park, OH: ASM International; 1994.
2. Donachie, M.J., **Titanium: a technical guide**. Materials Park, OH: ASM International; 1989.
3. Dong, H., Bell, T., **Wear**, 238 (2000), s.31.
4. Long, M. ve Rack, H.J., **Biomaterials**, 19 (1998), s.1621.
5. Molinari, A., Straffelini, G., Tesi, B., Bacci, T., **Wear**, 208 (1997) 105.
6. Imam, M.A., Fraker, A.C., Brown, S.A., Lemons, J.E., ASTM, Philadelphia s.3, 1996.
7. Boettcher, C., Bell, T., Dong, H., **Metallurgical and Materials Transactions A**, 33 (2002), s.1201.
8. Qi, P.-Y., Li, X.Y., Dong, H., Bell, T., **Materials Science and Engineering A**, 326 (2002), s.330
9. Dearnley, P.A., Dahm, K.L., Çimenoğlu, H., **Wear**, 256 (2004) s.469.
10. Güteryüz, H., Çimenoğlu, H., **Biomaterials**, 25 (2004) s.3325.
11. Güteryüz, H., Çimenoğlu, H., **Surface and Coatings Technology**, 192 (2005) s.164.
12. Güçlü, F.M., Çimenoğlu, H., Kayalı, E.S., **Materials Science and Engineering C**, 56 (2006) s.1367.