



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARA LAZER İLE YÜZEY
MODİFİKASYONUNUN AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİSİ

HÜSEYİN BAHAR

DANIŞMAN

DOÇ. DR. YILMAZ KÜÇÜK

BARTIN-2024



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARA LAZER İLE YÜZEY MODİFİKASYONUNUN
AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüseyin BAHAR

BARTIN-2024

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK danışmanlığında hazırlamış olduğum “ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARA LAZER İLE YÜZEY MODİFİKASYONUNUN AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİSİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

25.01.2024

Hüseyin BAHAR

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezinin bilimsel danışmanlığını üstlenen, çalışmanın gerçekleştirilme sürecindeki her aşamada bilgi ve tecrübesiyle bana destek veren, değerli fikirleri ile beni yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK'e saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Hazırlanan numunelerin deneylerinin yapılması aşamasında yardımlarını esirgemeyen LUMOS LASER firmasından Seydi YAVAŞ, Şakir GÜLÇE ve bu süreçte bana destek olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Hüseyin BAHAR



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARA LAZER İLE YÜZEY MODİFİKASYONUNUN AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİSİ

Hüseyin BAHAR

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK

Bartın-2023, sayfa: 38

Bu araştırmanın amacı lazer ile yüzey modifikasyonu işleminin şekil hafızalı alaşımın yüzey aşınma davranışına etkisini araştırmaktır. Bunun için NiTi şekil hafızalı alaşım femtosaniye lazer kullanılarak işlenmiş sonrasında da aşınma testleri yapılmıştır. Uygulanan lazer ablasyon işlemi ile yüzey desenlemede belirlenen desen alan yoğunluğu %34 olup, 1N yük altında lazer işlemi uygulanmamış numunelerin sürtünme katsayısı değerlerine göre yaklaşık % 17 lik düşüşe neden olmuştur. 3N yük altında COF değerindeki düşüş ise yaklaşık % 14 olmuştur. Bu sonuçlar gösteriyor ki femtosaniye lazer ile NiTi ŞHA'nın işlenmesi ve uygulanan yükün artması COF değerlerinde düşüşe neden olmaktadır. Lazer yüzey desenleme işlemi uygulanmış NiTi ŞHA'nın kuru ortamdaki aşınma miktarı lazer uygulanmamış numuneden daha yüksek çıkmıştır. Bu durumun ablasyon yüzey alanının fazla olmasının yol açtığı termal yumuşamadan kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, lazerle yüzey modifikasyonu, şekil hafızalı alaşımlar

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EFFECT OF LASER SURFACE MODIFICATION ON WEAR BEHAVIOR OF SHAPE MEMORY ALLOYS

Hüseyin BAHAR

Bartın University

Graduate School

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Yılmaz KÜÇÜK

Bartın-2023, pp: 38

The aim of this research is to investigate the effect of laser surface modification on the surface wear behavior of shape memory alloy. For this purpose, NiTi shape memory alloy was processed using a femtosecond laser and then wear tests were performed. The pattern area density determined in surface patterning with the applied laser ablation process was 34%, and under 1N load, it caused a decrease of approximately 17% compared to the friction coefficient values of the samples without laser treatment. The decrease in COF value under 3N load was approximately 14%. These results show that processing NiTi SHA with femtosecond laser and increasing the applied load causes a decrease in COF values. The wear rate of NiTi SMA with laser surface texturing applied in dry environment was higher than the sample without laser application. It has been evaluated that this situation is due to thermal softening caused by the large ablation surface area.

Keywords:Laser surface modification, Shape memory alloys, Wear

İÇİNDEKİLER

BEYANNAME	ii
ÖNSÖZ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
TABLolar DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Şekil Hafızalı Alaşımlar.....	1
1.1.1. Tarihçe.....	2
1.1.2. Şekil Hafıza Etkisi	3
1.1.3. Şekil Hafızalı Alaşım Türleri	3
1.1.4. Kullanım Alanları	3
1.1.5. Üretim.....	4
1.2. Lazerler	4
1.2.1. Lazer işleme teknikleri.....	5
1.2.1.1. Lazer yüzey ısı işlemleri	5
1.2.1.2. Lazer eritme	5
1.2.1.3. Lazer alaşımlama	5
1.2.1.4. Lazer kaplama	6
1.2.1.5. Lazer temizleme.....	6
1.2.1.6. Lazer şok işleme	6
1.2.1.7. Lazer ablasyon.....	7
1.2.2. Lazer işleme parametreleri	8
1.2.2.1. Lazer gücü.....	8
1.2.2.2. Işın boyutu	8
1.2.2.3. Darbe süresi.....	8
1.2.2.4. Lazer tarama hızı	8
1.3. Aşınma	8

1.3.1. Aşınma Türleri	9
1.3.1.1. Adhezif Aşınma	9
1.3.1.2. Abrazif Aşınma	10
1.3.1.3. Korozyif Aşınma	10
1.3.1.4. Yorulma Aşınması	11
1.3.2. Aşınmayı etkileyen faktörler	11
1.3.2.1. Malzeme seçimi	12
1.3.2.2. Yüzey pürüzlülüğü	12
1.3.2.3. Yüzey işlemleri	12
1.3.2.4. Temas geometrisi	12
1.3.2.5. Çevre	12
2. LİTERATÜR ÖZETİ	13
3. MATERİYAL VE METOT	17
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	18
4.1. Lazer uygulanmamış yüzeylerin aşınma davranışı	18
4.2. Lazer uygulanmış yüzeylerin aşınma davranışı	24
4.3. Lazer öncesi ve sonrası aşınma verilerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi	30
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	33
KAYNAKLAR	35

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1.1: ŞHA'a ait sıcaklık-faz grafiği (Otsuka vd., 2000).....	1
1.2: SMA aşamaları ve kristal yapıları (Sun vd., 2009)	2
1.3: Lazer eritme işlemi (Alrbaey vd., 2014)	5
1.4: Lazer yüzey kaplaması sırasında yer alan adımlar (Przybyłowicz, 1999)	6
1.5: Lazer şok işleme (Gujba ve Medraj, 2014)	7
1.6: Femtosaniye lazer ablasyon sistemi (Huang vd. 2015).....	7
1.7: Dört Aşınma Tipinin Şematik Gösterimi (Özel, 2004)	9
1.8: Adhezif Aşınma Aparatı Modeli (Özel, 2004)	10
1.9: Abrazif Aşınma Aparatı Modeli (Pei vd., 2005)	10
1.10: Korozyon Aşınma Aparatı Modeli (Wang vd., 2005)	11
1.11: Yorulma Aşınma Aparatı Modeli (Pei vd., 2005)	11
2.1: Test için kullanılan çeşitli disk yüzeylerinin optik mikrografları (Kovalchenko vd., 2011).....	14
2.2: Örneklerin yüzey morfolojisi: (a) P, (b) D-10, (c) D-20, (d) D-30, (e) D-40. (Xue vd., 2021).....	14
2.3: 1 N'deki farklı numunelerin sürtünme eğrileri: (a) P, (b) D-10, (c) D-20, (d) D- 30, (e) D-40. 1, 2 ve 3 N'deki ortalama COF: (f) (Xue vd., 2021).....	15
2.4: (a) P, (b) D-10, (c) D-20, (d) D-30, (e) D-40'ın 1 N'sindeki aşınma izinin temsili SEM mikrografı ve 3 boyutlu topografisi. 1, 2 ve 3 N'deki aşınma oranı: (f) (Xue vd., 2021).....	15
4.1: Lazer uygulanmamış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası aşınmış yüzey SEM ve EDS çizgi analizi görüntüleri (yük: 1N, test süresi: 30 dk, kayma hızı: 0.008 m/s) a)200x b) 500x c) 4kx d) Aşınma izi eni boyunca alınan çizgi EDS analizi	19
4.2: Lazer uygulanmamış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası aşınmış yüzey SEM ve EDS çizgi analizi görüntüleri (yük: 1N, test süresi: 90 dk, kayma hızı: 0.008 m/s) a)200x b) 500x c) 4kx d) Aşınma izi eni boyunca alınan çizgi EDS analizi	20
4.3: Lazer uygulanmamış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası aşınmış yüzey SEM ve EDS çizgi analizi görüntüleri (yük: 3N, test süresi: 30 dk,	

kayma hızı: 0.008 m/s) a)200x b) 500x c) 4kx d) Aşınma izi eni boyunca alınan çizgi EDS analizi	21
4.4: Lazer uygulanmamış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası aşınmış yüzey SEM ve EDS çizgi analizi görüntüleri (yük: 3N, test süresi: 90 dk, kayma hızı: 0.008 m/s) a)200x b) 500x c) 4kx d) Aşınma izi eni boyunca alınan çizgi EDS analizi	22
4.5: Lazer uygulanmamış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası 3B aşınmış yüzey profilometre görüntüleri a) 1N, 30dk b) 1N, 90dk	23
4.6: Lazer uygulanmamış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası 3B aşınmış yüzey profilometre görüntüleri a) 3N, 30dk b) 3N, 90dk	23
4.7: Lazerle yüzey desenleme işlemi sonrası NiTi ŞHA numunesinin OM yüzey görüntüsü.....	24
4.8: Lazer uygulanmış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası aşınmış yüzey SEM ve EDS çizgi analizi görüntüleri (yük: 1N, test süresi: 30 dk, kayma hızı: 0.008 m/s) a) 200x b) 500x c) 1kx d) Aşınma izi eni boyunca alınan çizgi EDS analizi.....	25
4.9: Lazer uygulanmış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası aşınmış yüzey SEM ve EDS çizgi analizi görüntüleri (yük: 1N, test süresi: 90 dk, kayma hızı: 0.008 m/s) a) 200x b) 500x c) 1kx d) Aşınma izi eni boyunca alınan çizgi EDS analizi.....	26
4.10: Lazer uygulanmış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası 3B aşınmış yüzey profilometre görüntüleri a) 1N, 30dk b) 1N, 90dk	27
4.11: Lazer uygulanmış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası aşınmış yüzey SEM ve EDS çizgi analizi görüntüleri (yük: 3N, test süresi: 30 dk, kayma hızı: 0.008 m/s) a) 200x b) 500x c) 1kx d) Aşınma izi eni boyunca alınan çizgi EDS analizi.....	28
4.12: Lazer uygulanmış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası aşınmış yüzey SEM ve EDS çizgi analizi görüntüleri (yük: 3N, test süresi: 90 dk, kayma hızı: 0.008 m/s) a) 200x b) 500x c) 1kx d) Aşınma izi eni boyunca alınan çizgi EDS analizi.....	29
4.13: Lazer uygulanmış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası 3B aşınmış yüzey profilometre görüntüleri a) 3N, 30dk b) 3N, 90dk	29
4.14: Aşınma deneyleri sonrasında hesaplanan aşınma hacim kaybı değerleri.....	31

4.15: Aşınma deneyleri sonrasında kaydedilen sürtünme katsayısı (COF) değerleri	31
4.16: Aşınma deneyleri sonrasında hesaplanan aşınma oranı değerleri	32



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
3.1: Aşınma deney parametreleri.....	16



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

N	: newton
W	: wat
Hz	: Hertz
µm	: micrometre
m	: metre
s	: saniye
dk	: dakika

KISALTMALAR

ŞHA	: Şekil Hafızalı Alaşım
ŞHM	: Şekil Hafızalı Malzeme
PTFE	: Politetrafloroetilen
LST	: Laser Surface Texture
COF	: Coefficient of Friction
EDS	: Energy Dispersive Spectrometry
OM	: Optik Mikroskop
ITAB	: Isı Tesiri Altındaki Bölgede
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu

1. GİRİŞ

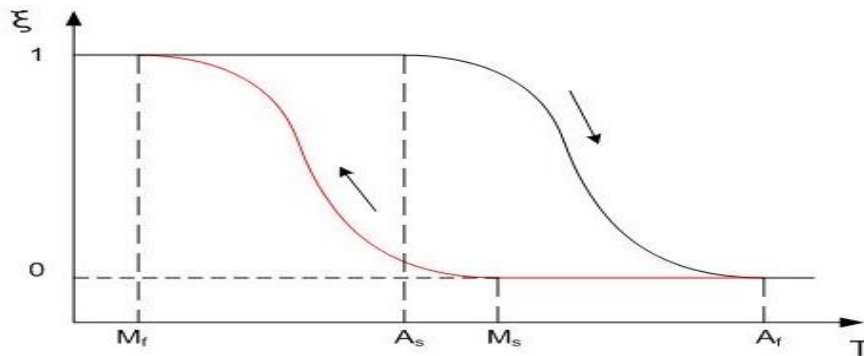
Lazer ile şekil hafızalı alaşımın yüzey modifikasyonu işlemi ile alakalı şekil hafızalı alaşımlar, lazerler ve aşınma ile ilgili temel bilgiler verilerek deney aşamasında yapılan işlemlerin anlaşılması istenmiştir.

1.1. Şekil Hafızalı Alaşımlar

Şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA); belirli bir dış kuvvete martenzitik fazda bulunurken maruz kaldıklarında deforme olup, östenit faza geçiş sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklara ulaştığında deformasyon öncesi ilk halini geri kazanan alaşımlardır. Daha basit açıklamak gerekirse soğuk halde deforme olan, ısıtıldığında ise eski bulunduğu gerçek şekline ya da boyutuna geri gelme özelliği olan malzemelerdir.

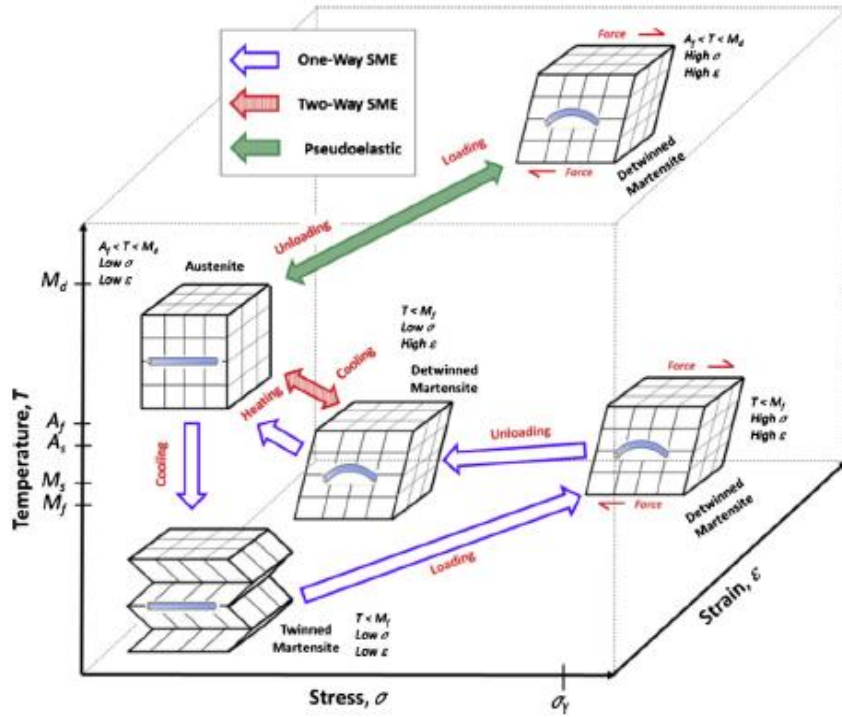
Manyetik veya Termomekanik gibi özel uyaranlar tarafından etkilendiğinde 'ezberleme' veya eksi hallerini koruma özelliği olan şekil hafızalı malzeme (ŞHM) sınıfına aittir (MohdJani, 2014).

Faz geçişleri rastgele değil belirli bir yolu takip ederek gerçekleşir. Soğuma ile oluşan martenzitik yapı yeniden ısıtıldığında östenit faza geçerken aynı yolu takip etmeyerek bir histerisis oluşturur ve daha düşük seviyedeki sıcaklıklarda faz geçişini gerçekleştirir. Şekil 1.1'de, M_s : Martenzitik başlangıç sıcaklığı (% 100 östenit); M_f : Martenzitik bitiş sıcaklığı (% 0 östenit); A_s : Östenit başlangıç sıcaklığı (% 100 martenzitik); A_f : Östenit bitiş sıcaklığı (% 0 martenzitik)



Şekil 1.1: ŞHA'a ait sıcaklık-faz grafiği (Otsuka vd., 2000)

Alaşımların şekil hafıza özelliği, izotermal şeklinin termoelastik martensit dönüşüm hali göstermelerinden ve kaymayla değil, ikizlenme ile deformasyonun gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. En basit olarak ŞHA'lar, üç farklı kristal yapıya (ikizlenmiş martenzitik, ikizlenmemiş martenzitik ve östenit) ve altı farklı dönüşüme sahip iki olası fazda mevcut olabilir (Sun vd., 2009). Östenit yapı yüksek sıcaklıklarda stabildir, martenzitik yapı ise düşük sıcaklıkta stabildir.



Şekil 1.2: SMA aşamaları ve kristal yapıları (Sun vd., 2009)

1.1.1. Tarihçe

Şekil hafızalı alaşımlar ilk olarak 1938’lerde gözlemlendi. Bu olay 1951 yılında AuCd alaşımında ve 1953 de NiTi alaşımında gözlemlenmiştir. Uygulamada kullanılması 1963 yılında NiTi alaşımında gerçekleşmiştir. 1970’lerde ise diş telleri, stent, implant gibi biyomedikal alanda kullanımına başlandı. 1980’den sonra ise otomotiv, havacılık, uzay gibi birçok sektörde kullanımı başladı. 2000 yılından sonra araştırmacılar bu malzemelere daha çok yoğunluk göstermeye başladı ve farklı şekil hafızalı alaşımlar ortaya çıktı. Araştırmacılar hala bu malzemenin daha da iyileştirilmesi için üzerine birçok araştırma yapmaya devam etmektedir.

1.1.2. Şekil Hafıza Etkisi

Şekil hafıza etkisi tek ve çift yönlü olmak üzere iki farklı şekilde olabilir. Malzemenin ısıtılması sonucu östenit faza geçer ve malzeme ilk halini alır. Malzeme sıcaklığı martenzitik faz sıcaklığının altına düşmesi ile deforme haline gelmeme durumu tek yönlü, deforme haline gelme durumu ise çift yönlü şekil hafıza etkisi diye isimlendirilir.

Çift yönlü şekil hafıza etkisi ile kazanılan geri kazanım gerinimi tek yönlü şekil hafıza etkisi ile kazanılan geri kazanım geriniminden tahmini %50'si daha az olması sebebiyle ticari olarak kullanımı daha düşüktür.

1.1.3. Şekil Hafızalı Alaşım Türleri

Ni alaşımları (NiTi, NiAl), bakır alaşımları (CuSn, CuZn, CuAlNi), Fe Alaşımları (FePt, FeMnSi, FeMnC), AuCd, AgCd, MnCu, TiNb gibi farklı çok sayıda şekil hafızalı alaşım vardır.

1.1.4. Kullanım Alanları

ŞHA'lar çok sayıda sektörde kullanılmaktadır. Sağlık (diş teller, ortodonti, stent, endodonti alanı için üretilen gözlük, alet, ortopedik ürün vb.), robot endüstrisinde, otomotiv sanayinde, sönümleme malzemelerinde, havacılık ve uzay alanında, inşaat gibi sanayi alanları bunlardan bazılarıdır. Makine-ekipman ve yapı malzemeleri ŞHA'ların çok kullanıldığı sektörlerdir. Sıcaklığın etkisiyle mekanik davranım gösteren malzemelerde hissettiği ısıya tepki veren sensör olarak kullanılırlar (Otsuka, 1997).

En bilinen şekil hafızalı alaşım olan NiTi alaşımı, şekil hafıza ve süper elastiklik gibi üstün özellikleri olduğu için tıp alanında ve yapısal çalışmalarda sık olarak kullanılmaktadır (Otsuka vd., 1999). NiTi ŞHA alaşımları, şekil hafıza etkisi, süper esneklik, iki yönlü şekil hafıza etkisi (çok yönlü şekil hafıza etkisi olarak bilinir) vb. özelliklerden dolayı başka ŞHA'larla çok fazla ortak karakteristiğe sahip olmasına rağmen, birçok başka özelliklere de sahiptirler. Bu ŞHA'lar bir çeşit intermetalik bileşik olmasına rağmen fazlasıyla sünektir ve belirli şartlarda %60 oranında soğuk işleme yapmak mümkün olur.

Bu inanılmaz yüksek sünekliğin sebeplerinden bir tanesi alaşımın düşük elastik anizotropi özelliğidir (Otsuka, 2005). Korozyon ve aşınma dirençleri mükemmeldir. Ni-Ti genel anlamda diğer ŞHA'lerden pahalıdır ancak üstün termo-mekanik özellikleri sayesinde daha çok tercih edilmektedir.

1.1.5. Üretim

ŞHA'ların dönüşüm sıcaklığı malzemenin işleme ve üretimi sırasında uygulanan yöntemlere bağlı olarak değişir. Örnek olarak, NITINOL içindeki nikel-titanyum atomlarının kompozisyonlarındaki %1'lik değişim dönüşüm sıcaklığında 10 °C kaymaya neden olur. İşleme sırasında oluşabilecek oksitleri ve sisteme katılabilecek safsızlıkları önleme amacı ile genelde vakum ortamında eritme gerçekleştirilir ve oluşan külçe bilinen dövme, haddeleme, ekstrüzyon gibi diğer yöntemlerle işlenir. Fakat bu tür klasik yöntemler genelde yeterli olmadığından sıcak işlemi takip eden soğuk işleme yöntemi kullanılır. Bu sayede aşamalı olarak ısıtarak kontrollü şekillendirilen malzeme, şekil hafıza veya süperelastisite özelliği kazanır (Stoeckel, 2001).

1.2. Lazerler

Lazerler ilk olarak 1960 yılında Amerika'da yakut lazer ile bilim alanına giriş yapmıştır. Daha sonra Polonyalı araştırmacılar tarafından He-Ne gaz lazerleri icat edilmiş ve bunu Nd:YAG lazerleri takip etmiştir. Şimdiki zamanda lazer imalatı yapan firmalar kızılötesinden ultraviyole radyasyona kadar olan aralıktaki dalga boyunda, yüksek veya çok düşük güç yoğunluğuna sahip sürekli veya darbeli lazerler sunmaktadırlar. Lazerler iletişim, tıp, kimya, savunma sanayi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Lazer ile malzeme işleme içerisinde kaynak, kesme, delme, yüzey işleme, alaşımlandırma, şoklama ve ablasyon gibi işlemler bulunmaktadır. Lazer ile malzeme işleme yöntemlerinden her birinde lazer gücü yoğunluğu ve lazer süresi malzemedeki istenen ısınma ve faz geçişlerine göre belirlenmelidir. Lazer ile malzeme işleme; eritme ile (kaynak, yüzey ertitme vb.), eritme olmaksızın (şoklama, bükme vb.) veya buharlaşma (ablasyon, kesme, delme vb.) olmak üzere üç şekilde gerçekleşir.

1.2.1. Lazer işleme teknikleri

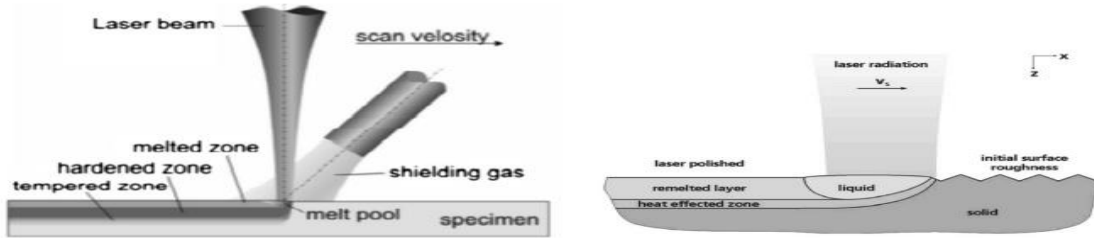
Lazer işleme şekilleriyle alakalı birçok işleme tekniği bulunmaktadır. Bunlardan bazıları;

1.2.1.1. Lazer yüzey ısıtma işlemi

Isıl işleme, malzemenin şekli değişmeksizin fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için malzemenin ısıtılması ve soğutulmasıdır. Yüzey sertleştirilmesi için lazer işleme yapılarak malzemenin aşınma ve yorulma özelliklerinin iyileştirilmesi gibi Bu işlemde malzemenin termal özelliği, lazer gücü, lazer tarama hızı, lazer çapı vb. en önemli parametrelerdir (Kusinski vd., 2012).

1.2.1.2. Lazer eritme

Lazer eritme yüzey katmanında kimyasal özellikleri değiştirmeden sert ve ince bir yapı oluşturulmasıdır. Bu sayede malzeme aşınma ve korozyon direnci gibi özelliklerin iyileşmesi sağlanır. Isıl işlem ile sertleşmeyen malzemeleri sertleştirebilir (Kusinski vd., 2012).



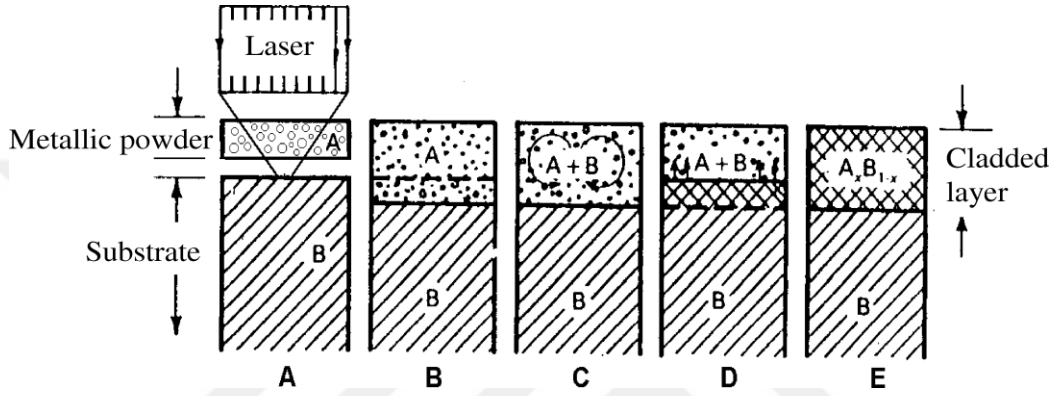
Şekil 1.3: Lazer eritme işlemi (Alrbaey vd., 2014)

1.2.1.3. Lazer alaşımlama

Lazer alaşımlama, lazer eritmeye benzer ancak malzeme yüzeyinin kimyasal özelliklerinde değişikliğe neden olur. Kimyasal özelliğin değiştirilebilmesi için eriyik malzeme içerisine istenen alaşım elementleri eklenir. İşlem parametrelerinin doğru seçimi sayesinde daha kaliteli yüzey katmanları elde edilir. Yüksek maliyetli alaşım elementlerinin kullanımını azaltmak için iyi bir yöntemdir (Singh, 1994).

1.2.1.4. Lazer kaplama

Lazer kaplama, malzeme üzerine konulan toz veya toz kaplamanın füzyon yoluyla malzeme üzerinde yeni bir katman oluşturmaları işlemidir. Çeşitli yüzey alaşımları ve kompozitleri oluşturabilir. Bu işlemde birden fazla katman oluşturulabilir. Bu işlem sayesinde malzeme yüzey kalitesinin iyileşmesi sağlanmaktadır. Böylece daha ucuz malzemeler ile çalışmak mümkün hale gelebilmektedir (Przybyłowicz, 1999).



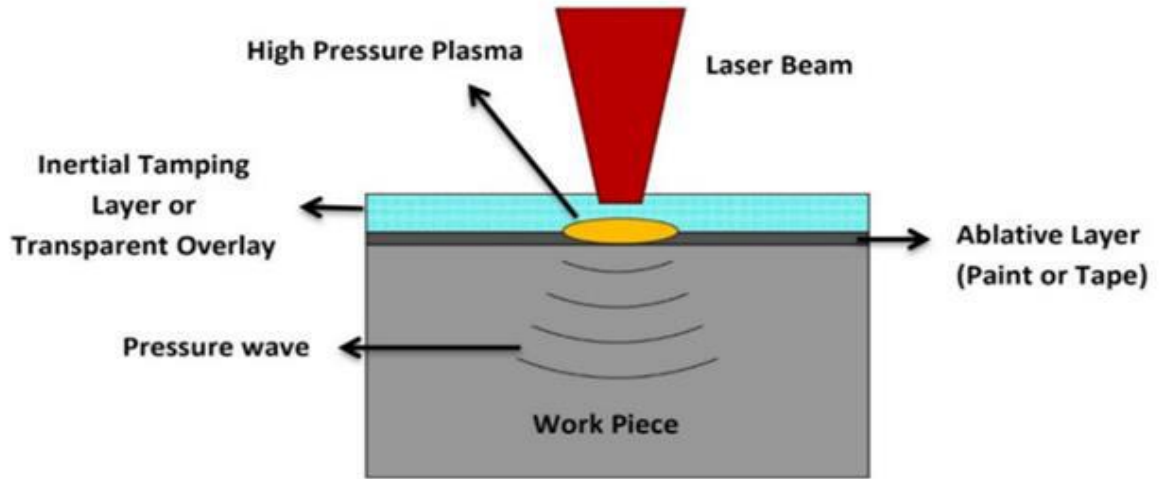
Şekil 1.4: Lazer yüzey kaplaması sırasında yer alan adımlar (Przybyłowicz, 1999)

1.2.1.5. Lazer temizleme

Lazer temizleme, alt tabaka ile yüzeydeki kirletici katmanın sahip olduğu özelliklerin farklılığına göre seçilen lazer parametreleri ile alt tabakayı hiç etkilemeden sadece yüzeydeki kir tabakasının lazer radyasyonu ile çıkarılma işlemidir. Tarihi eserlerin temizlenmesi ve restorasyon işlemlerinde yaygın olarak kullanılmakta olup daha düşük maliyeti sebebiyle tercih edilmektedir. Bunun dışında malzeme üzerindeki yağ, kir ve oksit tabakanın temizlenmesi için kullanılmaktadır (Marczak vd., 2008).

1.2.1.6. Lazer şok işleme

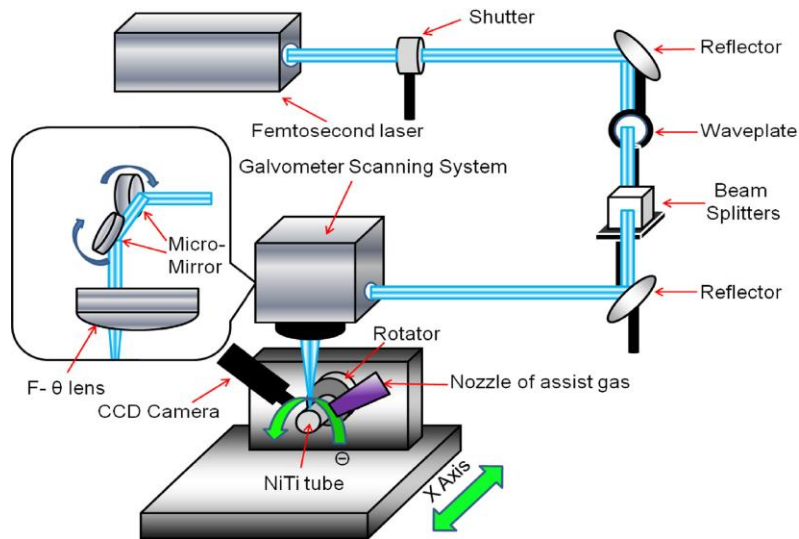
Lazer şok işleme, malzeme yüzeyinde termal etkilerden yararlanmadan şok dalgası oluşturarak malzeme yüzeyinin temizlenmesini veya yüzey özelliklerinin iyileştirilmesini sağlayan işlemdir. Bu işlem sırasında termal etkileri önlemek için şeffaf bir kaplama kullanılmakta olup yeni gelişen teknoloji ile kaplama olmaksızın bu işlem yapılmaya başlamıştır. Otomotiv ve havacılık sektörlerinde daha sık tercih edilir. (Ye ve Cheng, 2010)



Şekil 1.5: Lazer şok işleme (Gujba ve Medraj, 2014)

1.2.1.7. Lazer ablasyon

Lazer ablasyon, malzemelerin lazerle buharlaştırılması işlemidir. Genelde yüksek enerjili lazer ışınları kullanılır. Malzeme yüzeyine etkiyen yüksek enerjili lazer ışınları ile yüzeyin bir kısmında parçacıklar çıkartılır ve istenen desen, oluk, delik vb. yüzeyler oluşur. Lazer darbe sürelerine bağlı olarak nanosaniye, pikosaniye ve femtosaniye lazer ile işlem yapılabilir Femtosaniye lazerlerde darbe süresi daha kısa olduğu için enerjinin iyonlara aktarılacak zamanı olmaz ve kafes sisteminin sıcaklığı düşük kalır. Böylece soğuk ablasyon meydana gelir. (Huang vd. 2015)



Şekil 1.6: Femtosaniye lazer ablasyon sistemi (Huang vd. 2015)

1.2.2. Lazer işleme parametreleri

Lazerlerin neden olduğu sertlik, sürtünme, aşınma gibi özellikler lazer işleme parametreleriyle orantılıdır. En önemli lazer parametreleri lazer gücü, ışın boyutu, darbe süresi ve tarama hızıdır.

1.2.2.1. Lazer gücü

Lazer gücü, lazerin malzemenin yüzeyine lazer ışını tarafından iletilen enerji miktarıdır. Malzeme birikmesi, lazer derinliği ve çatlama kusurları gibi parametreleri etkiler.

1.2.2.2. Işın boyutu

Işın boyutu, lazer ışınının çapıdır. Genellikle mikrometre cinsinden ifade edilir. Lazer gücünü etkileyerek lazerin nüfuz ettiği derinliği etkiler ve daha hassas işlemler sağlayabilir.

1.2.2.3. Darbe süresi

Darbe süresi, lazer darbesinin malzeme yüzeyine ne kadar süre uygulandığını göstergesidir. Malzeme yüzeyindeki termal etkileri ve etki bölgesinin derinliği ile malzemenin yapısındaki değişikliklerde etkili olur.

1.2.2.4. Lazer tarama hızı

Lazer tarama hızı, lazerin malzeme yüzeyi boyunca yaptığı hareketin hızıdır. Tarama hızı azaldıkça malzeme yüzeyinde derine nüfuz eden büyük ısıdan etkilenen bölgeyi artırır. Buda soğuma hızını etkiler. Bu parametrelerin optimize edilmesi yüzey kalitesinin iyileşmesini ve istenilen yüzey özelliklerinin kazanılmasını sağlayacaktır.

1.3. Aşınma

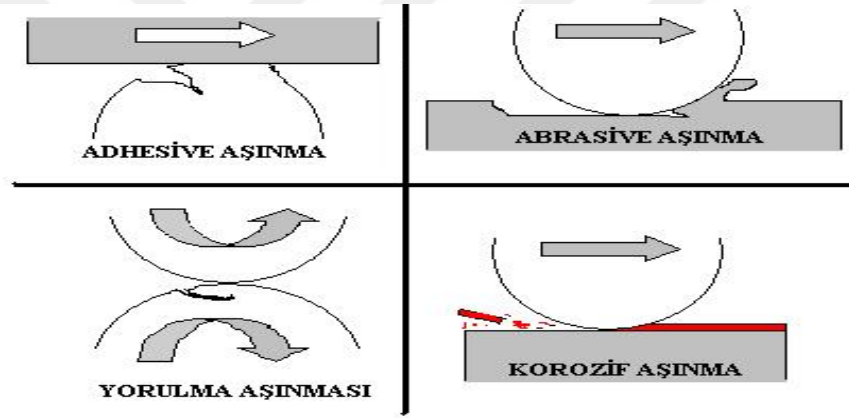
Aşınma genel olarak birbirine temas eden ve birbirine göre izafi hareket eden cisimlerin

sürtünmesiyle oluşan malzeme ve kütle kaybıdır. Aşınmanın tam olarak tanımını yapmak zordur ancak dünyada kabul görmüş birkaç tanım bulunmaktadır. Örnek vermek gerekirse DIN 50320 standardında mekanik etkiler ile malzeme yüzeyinden küçük parçacıkların ayrılması şeklinde oluşan değişiklik olarak tanımlanır (Sevim, 1998).

Aşınmanın düşük olması birçok özelliği etkilemektedir. Malzeme masrafları, kayıp zamanlar, doğal kaynaklar vb. örnekler verilebilir (Terkeşli, 2017).

1.3.1. Aşınma Türleri

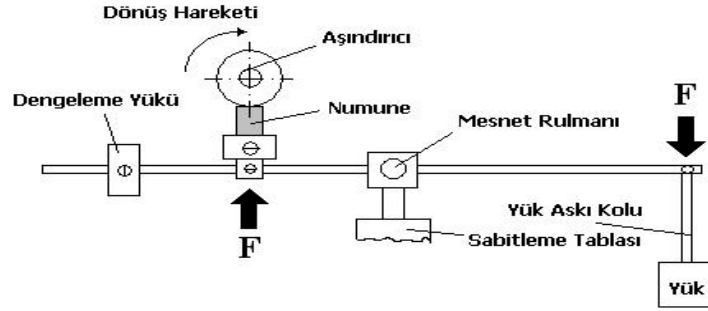
Geleneksel olarak kabul edilen dört aşınma tipi vardır. Bu aşınma tiplerine dayalı aşınma mekanizmaları, detaylı olarak açıklanmaktadır (Özel, 2004).



Şekil 1.7: Dört Aşınma Tipinin Şematik Gösterimi (Özel, 2004)

1.3.1.1. Adhezif Aşınma

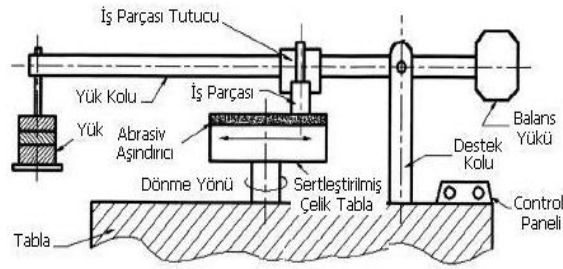
Temas eden iki yüzeydeki temas ara yüzeyinde nispi kayma direnci için yeterli yapışkan gücüne sahip olmasıyla, geniş plastik deformasyonunun sıkıştırma ve kırılma altında temas bölgesi içinde ortaya çıkmak suretiyle aşınma meydana gelmektedir. Bu sayede temas bölgeleri içerisindeki bu geniş deformasyon, bir çatlama başlamasına ve gerilme ile kırılmanın bileşik çatlama tarzında üretilmesine neden olmaktadır. Temas ara yüzeyindeki çatlak uzandığında, aşınan parça, yapışkan transferinin tamamlanmasıyla şekillenmektedir. Temas ara yüzeyinde yeterli yapışma meydana geldiğinde ortaya çıkan bu aşınma tipi, adhezif aşınma olarak adlandırılmaktadır (Koji, 2000).



Şekil 1.8: Adhezif Aşınma Aparatı Modeli (Özel, 2004)

1.3.1.2. Abrazif Aşınma

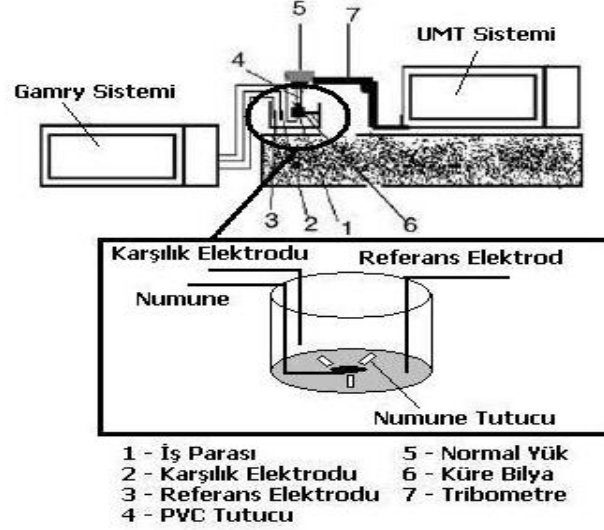
İki yüzey arasında bulunan temas ara yüzeyi meyilli veya eğri bir temasa sahipse, aşınma bu kayma içerisinde yer almasıyla meydana gelir. Abrazif aşınma türü, bütün aşınma maliyetlerinin yaklaşık %63'ünü oluşturur. Abrazif aşınma, sert partiküllerinin veya sert çıkıntıların katı bir yüzey boyunca hareket etmesi ve karşı koymasından dolayı oluşan aşınma tipi abrazif aşınma olarak adlandırılır (Koç ve Mutlu, 2005).



Şekil 1.9: Abrazif Aşınma Aparatı Modeli (Pei vd., 2005)

1.3.1.3. Korozyon Aşınma

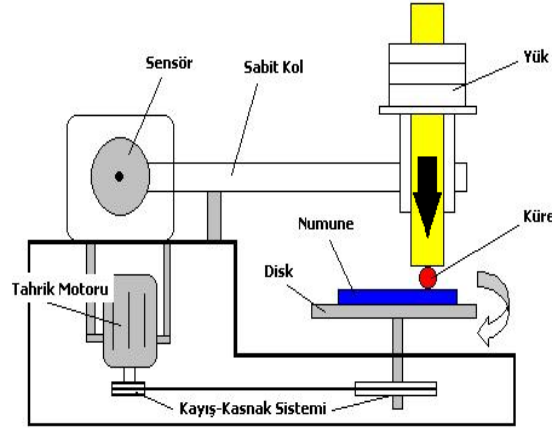
Metal ve alaşımları ile ortam arasında kimyasal, elektrokimyasal olarak bir etkileşim oluşturması sonucunda farklı bileşikler oluşur. Oluşan bu bileşikler parçalanarak yüzeyden kopar ve bu korozyon aşınma olarak adlandırılır (Owsalou, 2012).



Şekil 1.10: Korozyon Aşınma Aparatı Modeli (Wang vd., 2005)

1.3.1.4. Yorulma Aşınması

Yüzey üzerine uygulanan yük sürekli ve değişken ise yüzeyin hemen altında mikro çatlakların oluşmasına ve bu çatlakların yüzeye doğru ilerleyerek yüzeyden pul şeklinde parçacıkların koparak uzaklaşmasına neden olur. Bu şekildeki temas dönüşleri sonrası oluşan aşınmalar yorulma aşınması olarak adlandırılır (Pei vd., 2005).



Şekil 1.11: Yorulma Aşınma Aparatı Modeli (Pei vd., 2005)

1.3.2. Aşınmayı etkileyen faktörler

Aşınmayı etkileyen birçok faktör mevcuttur. Aşağıda bu faktörlerden en önemli olabilecekler hakkında kısa bilgiler mevcuttur.

1.3.2.1. Malzeme seçimi

Malzemelerin aşınma özelliklerini arttırabilmek için malzemelerin mekanik özellikleri iyi seçilmelidir (Keskin, 2012). Malzeme seçerken dikkat edilmesi gereken özelliklere örnek vermek gerekirse; özgül yük (nominal basınç), malzemenin elastik özellikleri (elastisite modülü), malzemenin mukavemet özellikleri sayılabilir. (Oğuz, 1993).

1.3.2.2. Yüzey pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü aşınma özelliğini en çok etkileyen parametrelerden biridir. Pürüzlü yüzey temas eden ilk bölge olması nedeni ile adhezyon kuvvetlerini arttırmaktadır (Keskin, 2012). Yüzey üzerinde pürüzlerin çok olması nedeniyle sürtünme kuvveti artmaktadır. Sürtünme kuvvetinde meydana gelen artış daha fazla plastik deformasyona sebep olabilir ve aşınma derinliğini arttırabilir (Uçurum vd., 2021).

1.3.2.3. Yüzey işlemleri

Malzemenin aşınma özelliklerini iyileştirmek için birbiri ile temas eden iki malzemenin sürtünme katsayısı ve malzemelerin tutunabilmesi azaltılmalıdır. Bunun için malzeme yüzeyinde kimyasal, elektrokimyasal veya termokimyasal yüzeyler oluşturulmalıdır (Keskin, 2012).

1.3.2.4. Temas geometrisi

Birbiri ile temas eden yüzeylerin temas bölgesinin geometrisi aşınma miktarını etkilemektedir. Aşınmayı azaltmak temas sonucu oluşan parçacıkların için temas bölgesinden uzaklaştırılması sağlanmalıdır (Keskin, 2012).

1.3.2.5. Çevre

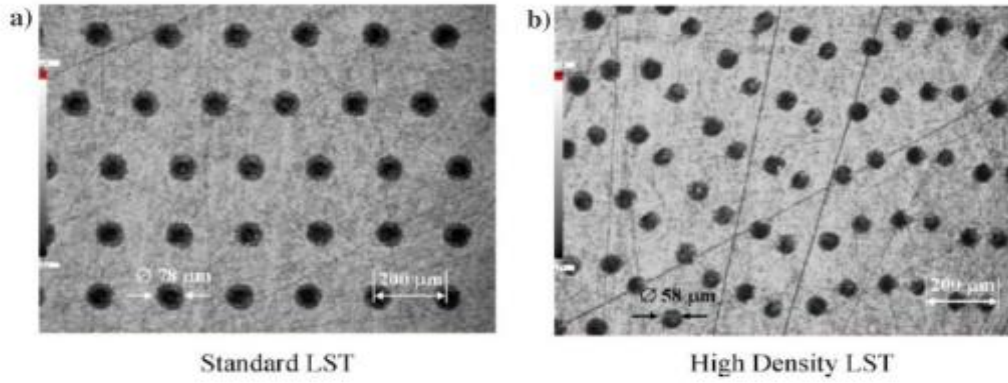
Çevrede bulunan nem ve oksijen aşınma oranını etkiler. Ortamdaki nem ve oksijen miktarı arttığında koruyucu tabaka oluşturarak aşınmayı azaltır. Oksijen bulunan ortamda soy gaz varsa oksit miktarı az olacağından adezyon aşınması meydana gelebilir (Keskin, 2012).

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Lazer Surface Texturing(LST) ile yüzey üzerindeki doku özelliklerinin sahip olduğu modifikasyonun malzemelerin tribolojik performansı üzerinde çok fazla etki ettiği görülmüştür. Desen ve kayma yönlerindeki bağıl yönelim, kayma esnasındaki sürtünme kuvvetlerini, doğal olarak tribolojik özellikleri değiştirmektedir (Gachod vd., 2013). Örnek olarak, yüzeylerdeki tek yönlü kaymanın, kayma yönlerinin etkisiyle farklı olması gerekir, bu da "sürtünme anizotropisi" olarak adlandırılan duruma yol açmaktadır (Ito vd., 2019).

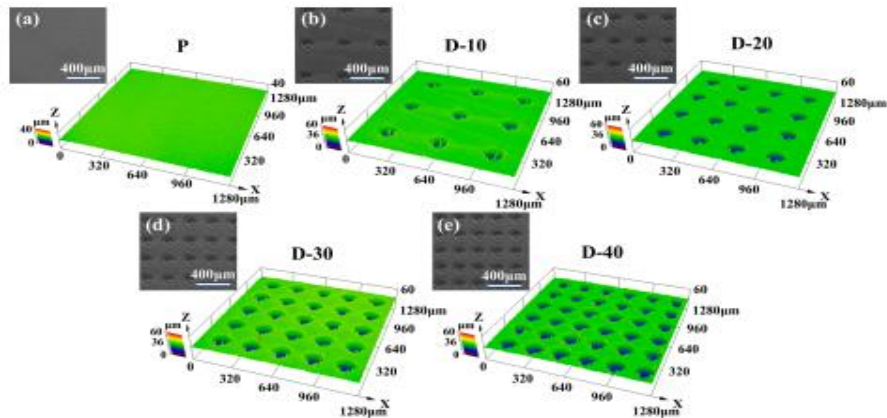
Literatürde belirtilen LST işlemleri araştırıldığında çoğunlukla daire, küre, elips, üçgen gibi farklı geometrik desen ve şekillere sahip yüzey dokusu uygulandığı görüldü. İşlenen şekiller ile, LST uygulanan malzemeler üzerinde tribolojik özelliklerini değiştirmeye yönelik üstün bir etkisi olduğu kanıtlandı. Örnek olarak, Yu ve ark. (2010) eliptik veya üçgen dokuya sahip bir malzeme yüzeyinin, aynı durumda (boyutuna ve derinliğe) olması şartıyla, dairesel dokuya sahip malzemeye göre daha düşük yük taşıma özelliğine sahip olduğunu söylemiştir.

Zeng S. vd.(2020) PTFE özellikli malzemenin stator yüzeyinde üretilmiş olan 1-Gözlü ve 3-Gözlü numune yüzeylerinde deneyler yaptı. 100 saat süren deney sonunda çukur miktarı artmasıyla stator yüzeyinde bulunan transfer malzemesi azalmıştır. Textüre paralel şekilde sürtünme malzemesinin yapışma aşınmasında azalma meydana geldi. Kuru sürtünme sırasında 1 N yük ile yapılan testlerde, düşük miktarda çukur olan yerlerde aşınmanın arttığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan artan çukur yoğunluğu ile aşınma ve sürtünme katsayısının azaldığı tespit edilmiştir (Demircan vd., 2021). Kovalchenko vd. (2011) disk üstü sürtünme makinesinde değişik viskoziteleri olan yağ çeşitleri kullanımı ile yaptıkları tribolojik testlerde çukurlu düz parçalar kullanmışlardı. Çukur miktarı daha yüksek olan 5100 çelik bilyalı disklerde abrasif aşınmanın arttığı gözlemlenmişti.

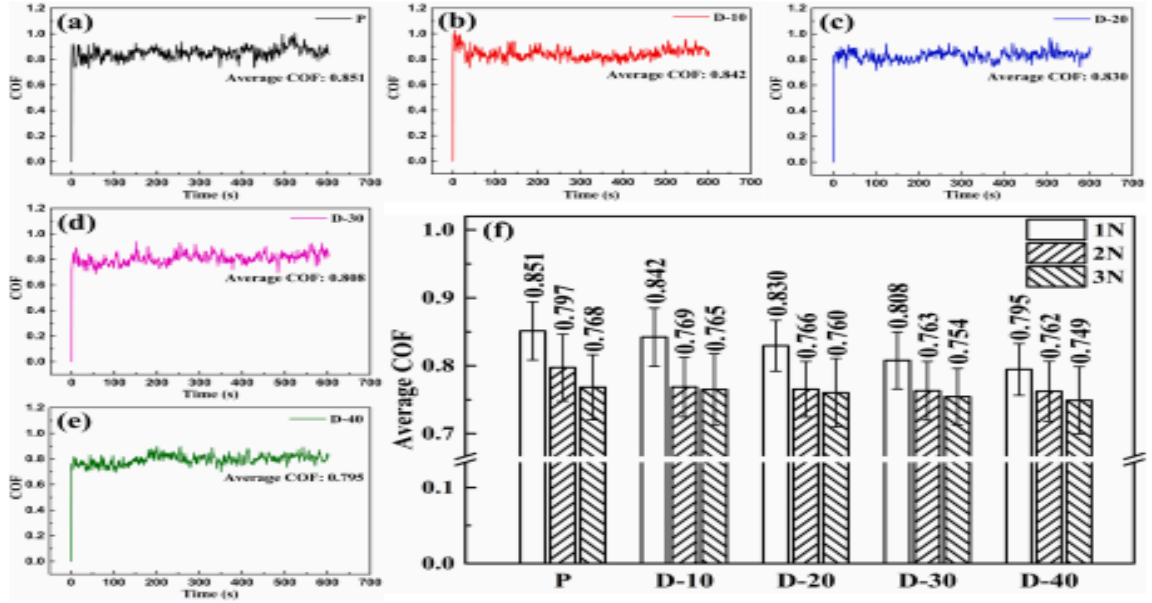


Şekil 2.12: Test için kullanılan çeşitli disk yüzeylerinin optik mikrografları (Kovalchenko vd., 2011)

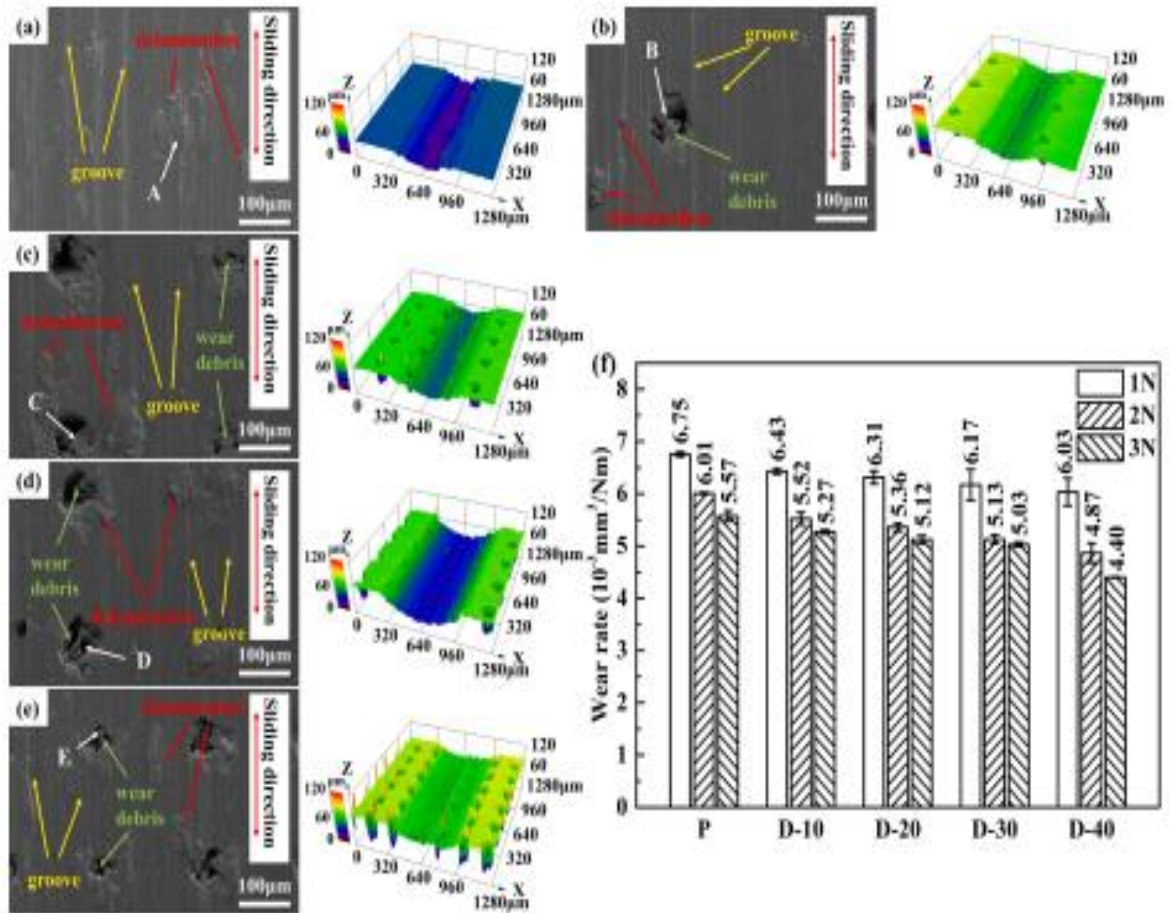
Yapılan sürtünme ve aşınma deneylerinde, tüm çukur dokulu Ti-20Zr-10Nb-4Ta'nın (TZNT) sürtünme katsayısının (COF) ve aşınma oranının aynı yük altında işlenmemiş TZNT'ye göre düştüğü bulundu. Aynı yükte değişik alan yoğunluğuna sahip olan tüm lazer ile işlenmiş TZNT'lerin COF değerleri işlenmemiş TZNT'ye göre azaldığı görülmüştü. Alan yoğunluğu aynı olan TZNT alaşımı için uygulanan yük arttıkça COF değerleri azalmıştır. Ayrıyeten alan yoğunluğunun %10'dan %40'a çıkması, yük ister 1, ister 2, ister 3 N olsun COF değerini düşürdüğü görüldü. Bu bulgular ışığında çukur yoğunluklarının önemli bir aşınma önlemesi sağladığı ve TZNT'nin aşınma direncinde artış sağladığı görülmüştür. (Xue vd., 2021)



Şekil 2.13: Örneklerin yüzey morfolojisi: (a) P, (b) D-10, (c) D-20, (d) D-30, (e) D-40. (Xue vd., 2021)



Şekil 2.14: 1 N'deki farklı numunelerin sürtünme eğrileri: (a) P, (b) D-10, (c) D-20, (d) D-30, (e) D-40. 1, 2 ve 3 N'deki ortalama COF: (f) (Xue vd., 2021)



Şekil 2.15: (a) P, (b) D-10, (c) D-20, (d) D-30, (e) D-40'nın 1 N'sindeki aşınma izinin temsili SEM mikrofrafı ve 3 boyutlu topografisi. 1, 2 ve 3 N'deki aşınma oranı: (f) (Xue vd., 2021)

LST yüzey işleme ile malzeme yüzeyleri arasında bulunan temas alanının azaltılması ve işlem esnasında yüzey sertliğinin artırılması, malzemelerin aşınma direncinde artış sağlamaktadır (Mao vd., 2020).

Ge vd. (2018) değişik lazer yoğunlukları ile Mg_3Al_1Zn alaşımının aşınma direncindeki değişiklikleri karşılaştırmış ve alaşımın sahip olduğu aşınma direncinde lazer yoğunluğu ile artış olduğunu görmüştür.

Şimdilerde, lazer uygulanmış NiTi'nin korozyon performansını ve biyouyumluluğunu detaylı araştıran sadece sınırlı sayıda uygulama bulunmaktadır, ancak yüzeyini tamamen karakterize etmeye yönelik girişim yapanların miktarı çok daha azdır (Chan vd., 2012).

3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada NiTi alaşımlı(%51 Ni-%49 Ti) şekil hafızalı alaşım numuneleri kullanılmıştır. Test numuneleri 25 mm çapında dairesel numune şeklinde hazırlanmıştır. İşlem öncesi malzemenin yüzeyi alkol ile temizlenmiştir.

NiTi numuneleri, 400 kHz frekans, 1,25 W ortalama güç, 10 mm/s tarama hızı, 15 µm ışın boyutu, 250 fs lazer dalga boyuna sahip femtosaniye lazer ile yüzey ablasyon işlemine tabi tutulmuştur. Lazer işlemi normal atmosfer koşullarında gerçekleştirilmiş olup, herhangi bir koruyucu ortam uygulanmamıştır. Lazer işleme sonrası aşınma deneyleri parametreleri belirlemek için ön aşınma testlerine tabi tutulduktan sonra Tablo 3.1’de verilen aşınma deney parametreleri seçilmiştir. Aşınma testleri kuru ortamda ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Yüzey desenleme işleminin aşınma davranışına etkisi, aşınma hacim kaybı, spesifik aşınma oranı ve aşınma izi yüzeyinin SEM ve 3B profilometre görüntüleri ile sürtünme katsayısı (coefficient of friction-COF) değerlerinin lazer uygulanmamış yüzeyle karşılaştırıldı.

Tablo 3.1. Aşınma deney parametreleri

Aşındırıcı bilya	Yük (N)	Kayma hızı (m/s)	Test süresi (dk)
Ø6 mm	1	0.008	30
WC-Co bilya			
Sertlik 19 GPa	3		90

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

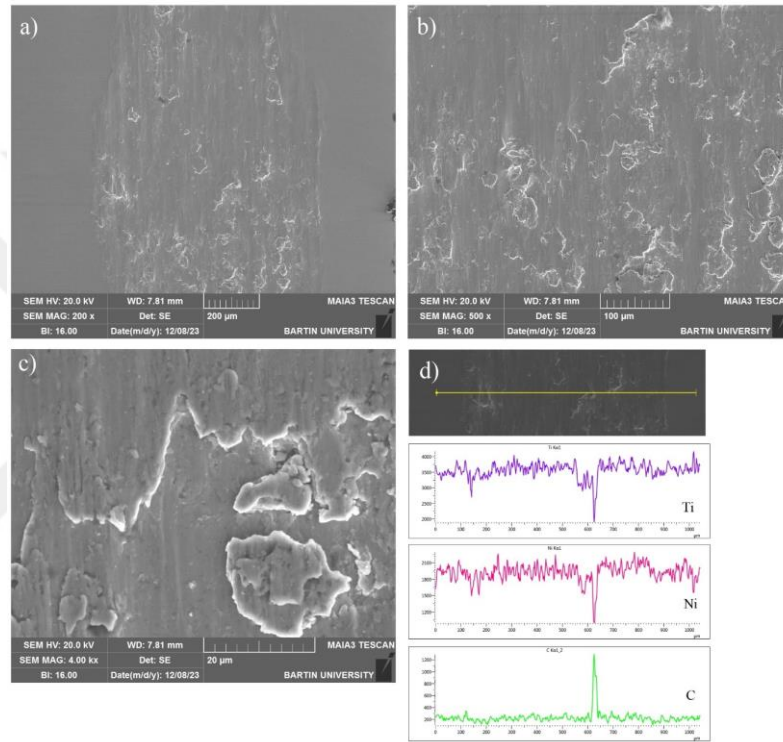
Aşınma test parametrelerinin seçiminde ön aşınma deneyleri yapılmıştır. Ön deneme aşınma testlerinde 1N ve 5N yüklerde 60 dk ve 180 dk süreler kullanıldığı durumda izlerin tamamen silindiği görülmüştür. Lazer uygulanmamış yüzeyle gerek aşınma oranının ve gerekse aşınma mekanizmaları ile COF değerlerinin karşılaştırılabilmesi için iz derinliklerinin tamamen ortadan kalkmadığı ve istikrarlı bir COF eğrisinin sağlanabildiği deney parametrelerinin seçilmesi gerektiği açıktır. Bu nedenle son olarak yük değeri 1N ve 3N seçilirken test süreleri de 30 dk ve 90 dk olarak belirlenmiştir.

Lazer ile yüzey desenleme işleminin aşınma davranışına etkisi, aşınma hacim kaybı, spesifik aşınma oranı ve aşınma izi yüzeyinin SEM ve 3B profilometre görüntüleri ile sürtünme katsayısı (coefficient of friction-COF) değerlerinin lazer uygulanmamış yüzeyle karşılaştırılmasıyla değerlendirilecektir.

4.1. Lazer uygulanmamış yüzeylerin aşınma davranışı

Lazer uygulanmamış NiTi ŞHA numuneye ait aşınmış yüzey görüntüleri ve EDS analizi Şekil 4.1.'de verilmiştir. Şekil 4.1. incelendiğinde 1N yük altında 30 dk süreyle gerçekleştirilen kuru kayma aşınma testi sonunda WC bilya tarafından oluşturulan iz genişliğinin yaklaşık olarak 800 µm olduğu görülmektedir (Şekil 4.1.a). Şekil 4.1.b'de verilen 500x büyütme SEM yüzey mikrografında temas basıncının en fazla olduğu ve dolayısıyla plastik deformasyonun en şiddetli şekilde olduğu orta bölgenin görüntüsü verilmiştir (Küçük, 2020, 2021). Buna göre şiddetli plastik deformasyona bağlı delaminasyon oluşumu ve aşınma atığı transferinin varlığı dikkati çekmektedir. Şekil 4.1.c'de verilen 4kx büyütmedeki SEM görüntüsünde transfer edilen ve sıvanım aşınma atıkları net şekilde görülürken, ayrıca aşınmış yüzeyde mikro ölçekli aşınma atıkları da gözlenmektedir. Genel olarak yüksek büyütmede dahi herhangi bir mikroçatlak oluşumuna rastlanmamıştır. Bu durumun elbette ki temel etkeni öncelikle normal yük değerinin 1 N gibi oldukça düşük bir değerde olmasıdır. Buna ek olarak, teste tabi tutulan NiTi ŞHA'nı (Ni51Ti49) oda sıcaklığında kararlı östenit fazında (B2 fazı) olması da diğer bir etkidir.

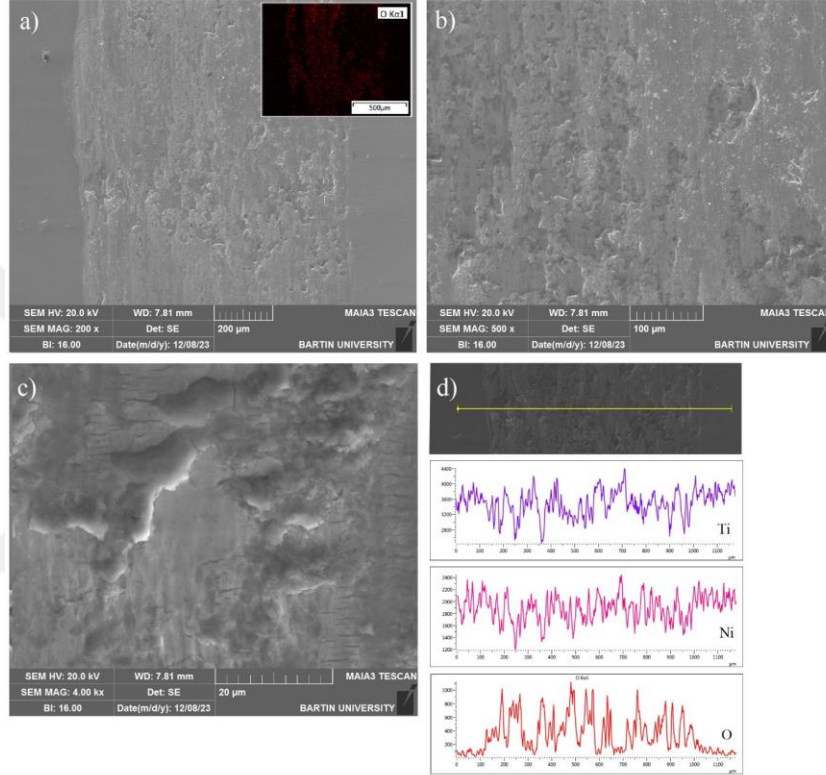
Çünkü oda sıcaklığında yapılan deneylerde temas bölgesinde sürtünmeden kaynaklanan sıcaklık artışı ile birlikte östenit faz dönüşümü bitiş sıcaklığına (A_f) rahatlıkla erişilebildiği için mevcut yapı yüksek oranda östenittir. Dolayısıyla test numunesi yüksek elastik geri-kazanım kabiliyetine sahip olduğundan kalıntı uzama (residual elongation) da oluşmamaktadır (Strnadel et al., 1995). Böylece ileri-geri aşınma testinin doğası gereği her bir çevrimsel yükleme-boşaltma hareketinin kümülatif etkisiyle yorulma çatlaklarına yol açmasının bu şekilde önlenmiş olabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 4.16: Lazer uygulanmamış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası aşınmış yüzey SEM ve EDS çizgi analizi görüntüleri (yük: 1N, test süresi: 30 dk, kayma hızı: 0.008 m/s)
a)200x b) 500x c) 4kx d) Aşınma izi eni boyunca alınan çizgi EDS analizi

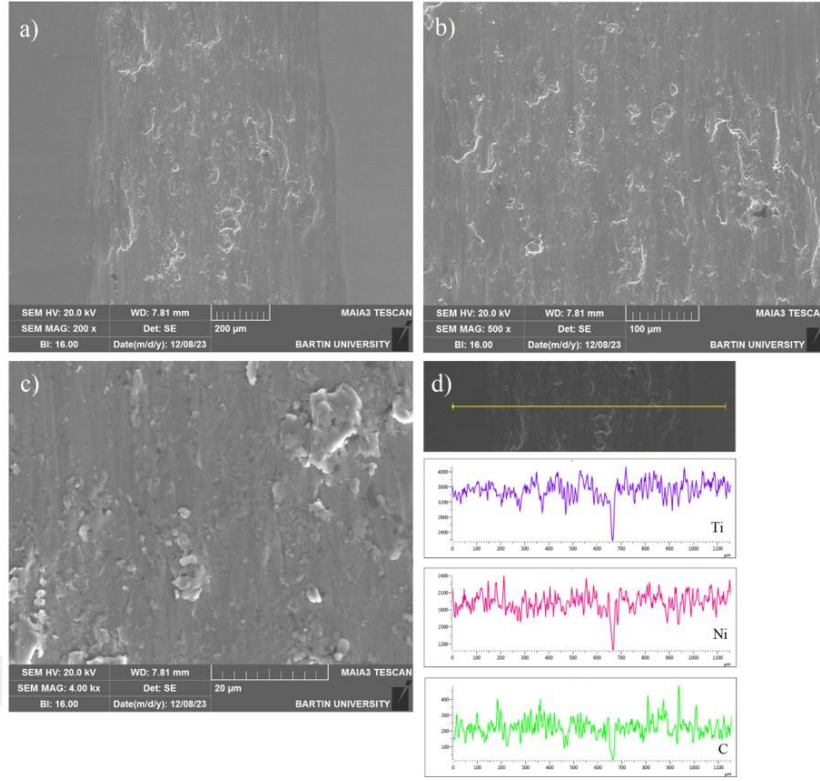
Şekil 4.2.'de 1N yük altında 90 dk test süresi sonunda elde edilen aşınmış yüzey SEM ve EDS analiz görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.2.a'da oluşan iz genişliğinin yaklaşık olarak 1000 μm olduğu görülmektedir. Buradan artan süre ile birlikte iz genişliğinin de arttığı anlaşılmaktadır. 30 dk test süresinden farklı olarak 90 dk test süresi sonunda hem kayma doğrultusuna dik yönde radyal mikro çatlak oluşumu (Şekil 4.2.c) hem de aşınmış yüzey üzerinde oksit oluşumu dikkati çekmektedir (Şekil 4.2.d) (Liu et al., 2022). Oksit oluşumunun sürtünme kaynaklı olduğu ve yükleme çevrim sayısının artmasıyla (üç kat) meydana geldiği söylenebilir. Oksit oluşumunda temas yüzeyi içeriğindeki Ti'nin O'ye olan yüksek afinitesinin etkili olduğu düşünülmektedir. Artan test süresi (yükleme çevrim

sayısı) ile temas yüzeyinde gevrek karakterli oksit oluşumunun ortak etkisiyle mikroçatlak oluşumunun gerçekleştiği değerlendirilmektedir. Bununla birlikte özellikle maksimum temas basıncının meydana geldiği iz merkezinde baskın şekilde yorulma kaynaklı delaminasyon aşınma mekanizması dikkati çekmektedir. Delaminasyona bağlı malzeme katmanı kaybının oksitlenmiş yüzeyin gevrek ve kırılgan yapısı ve mikro çatlak oluşumu sonucu ortaya çıktığı söylenebilir.



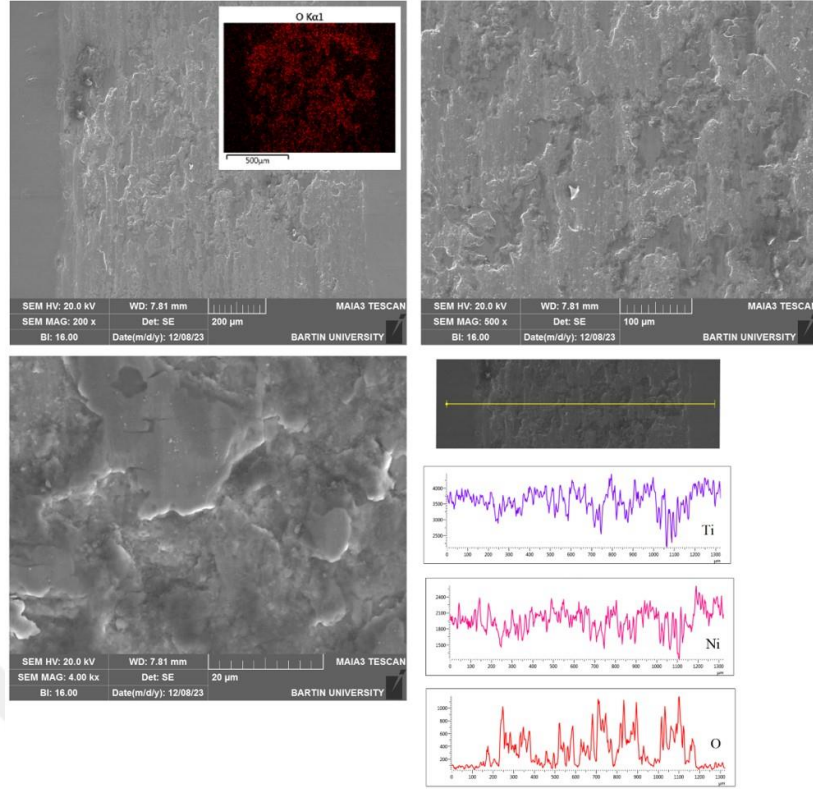
Şekil 4.17: Lazer uygulanmamış NiTi ŞHA numuneyle ait aşınma testi sonrası aşınmış yüzey SEM ve EDS çizgi analizi görüntüleri (yük: 1N, test süresi: 90 dk, kayma hızı: 0.008 m/s)
a)200x b) 500x c) 4kx d) Aşınma izi eni boyunca alınan çizgi EDS analizi

Şekil 4.3.'te 3N yük altında 30 dk test süresi sonunda elde edilen aşınmış yüzey SEM ve EDS analiz görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.3.a'da oluşan iz genişliğinin yaklaşık olarak 900 μm olduğu görülmektedir. 1N yük uygulanan iz genişliği ile karşılaştırıldığında artan yük (3N) ile birlikte iz genişliğinin de arttığı anlaşılmaktadır. İz üzerinde şiddetli plastik deformasyona ve abrazyon ile delaminasyona ait aşınma izleri görülmektedir (Şekil 4.3.b). Şekil 4.3.c'de 4kx büyütmede dahi herhangi bir mikroçatlağa rastlanılmamıştır. Test süresinin 30 dk olduğu durumda artan yükün oksit oluşumuna etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır (Şekil 4.3.d).



Şekil 4.18: Lazer uygulanmamış NiTi ŞHA numuneyle ait aşınma testi sonrası aşınmış yüzey SEM ve EDS çizgi analizi görüntüleri (yük: 3N, test süresi: 30 dk, kayma hızı: 0.008 m/s)
a)200x b) 500x c) 4kx d) Aşınma izi eni boyunca alınan çizgi EDS analizi

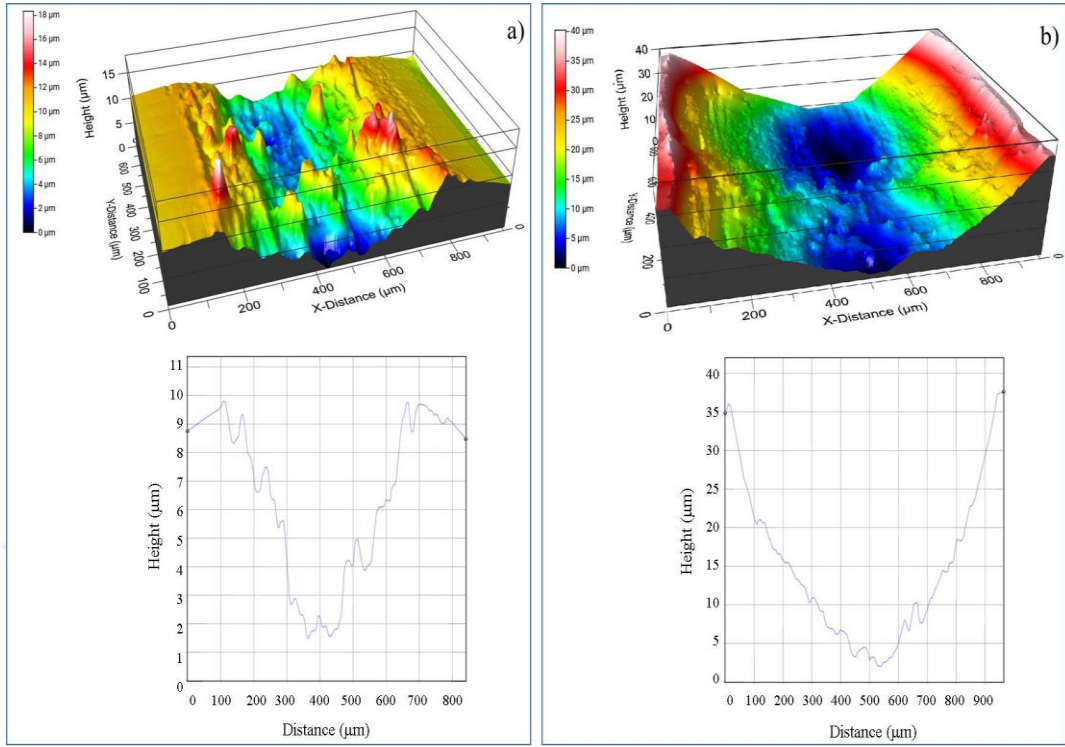
Şekil 4.4.'te 3N yük altında 90 dk test süresi sonunda elde edilen aşınmış yüzey SEM ve EDS analiz görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.4.a'da oluşan iz genişliğinin yaklaşık olarak 1100 µm olduğu görülmektedir. Artan yük ve süre ile birlikte iz genişliğinin de arttığı görülmektedir. 3N yük altında 30 dk test süresinden farklı olarak 90 dk test süresi sonunda 4kx büyütmede de açıkça görüldüğü gibi aşınmış yüzey üzerinde mikro çatlaklar oluşmuştur (Şekil 4.4.c). Bunların artan yük ve test süresince çevrimsel yükleme etkisiyle oluşan yorulma kaynaklı mikro çatlaklar olduğu söylenebilir. Bununla birlikte şiddetli plastik deformasyon etkisiyle abrazyon mekanizmasının baskın olduğu ve delaminasyona bağlı lokal ablasyon olduğu gözlenmektedir (Şekil 4.4.b). Diğer bir dikkat çeken husus ise aşınmış yüzey üzerinde oksit oluşumunun açıkça görülebilecek şekilde ortaya çıkmış olmasıdır (Şekil 4.4.d).



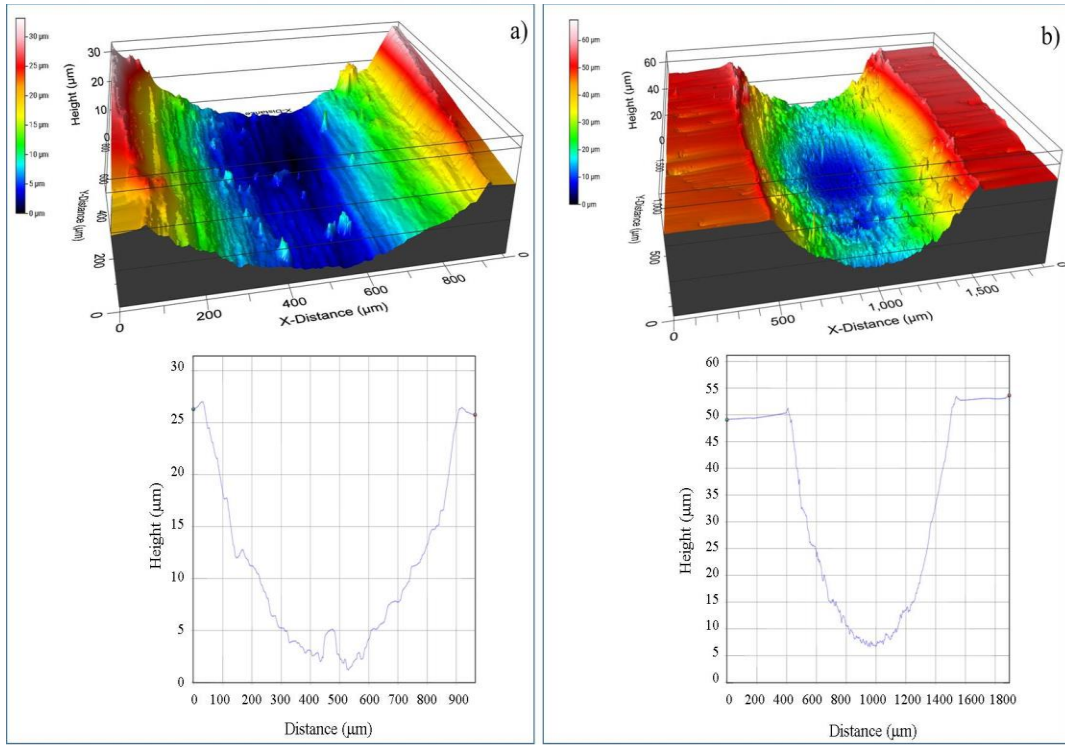
Şekil 4.19: Lazer uygulanmamış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası aşınmış yüzey SEM ve EDS çizgi analizi görüntüleri (yük: 3N, test süresi: 90 dk, kayma hızı: 0.008 m/s)
a)200x b) 500x c) 4kx d) Aşınma izi eni boyunca alınan çizgi EDS analizi

Lazer uygulanmamış NiTi ŞHA numuneye ait 1N yük altında aşınmış yüzey 3B profilometre görüntüleri Şekil 4.5.'te verilmiştir. Şekil 4.5.'te açıkça görüldüğü üzere test süresinin 30 dk olduğu durumda oluşan iz derinliği ve genişliği değerleri sırasıyla yaklaşık olarak 7 µm ve 600 µm olmuştur. Aşınmış iz yüzeyinde kaba abrasiv aşınma izlerinden oluşan oldukça pürüzlü bir görünüm mevcuttur. Test süresinin 90 dk olduğu süre sonunda ise oluşan aşınmış iz yüzeyinin daha az pürüze sahip düzgün konturlu iz olduğu görülmektedir. Artan test süresiyle birlikte iz derinliği yaklaşık 30 µm'ye, iz genişliği ise 900 µm'ye ulaşmıştır.

Lazer uygulanmamış NiTi ŞHA numuneye ait 3N yük altında aşınmış yüzey 3B profilometre görüntüleri Şekil 4.6.'da verilmiştir. 30 dk test süresi sonunda oluşan iz derinliği ve genişliği değerleri sırasıyla yaklaşık olarak 22 µm ve 850 µm olmuştur. Aşınmış iz yüzeyi düzgün kontura sahip olup kaba abrasiv aşınma izleri mevcuttur. Test süresinin 90 dk olduğu süre sonunda ise oluşan aşınmış iz yüzeyi ise daha az pürüze sahip düzgün kontura sahip olduğu görülmektedir. 90 dk test süresi sonunda iz derinliği yaklaşık 52 µm'ye, iz genişliği ise 1150 µm'ye ulaşmıştır.



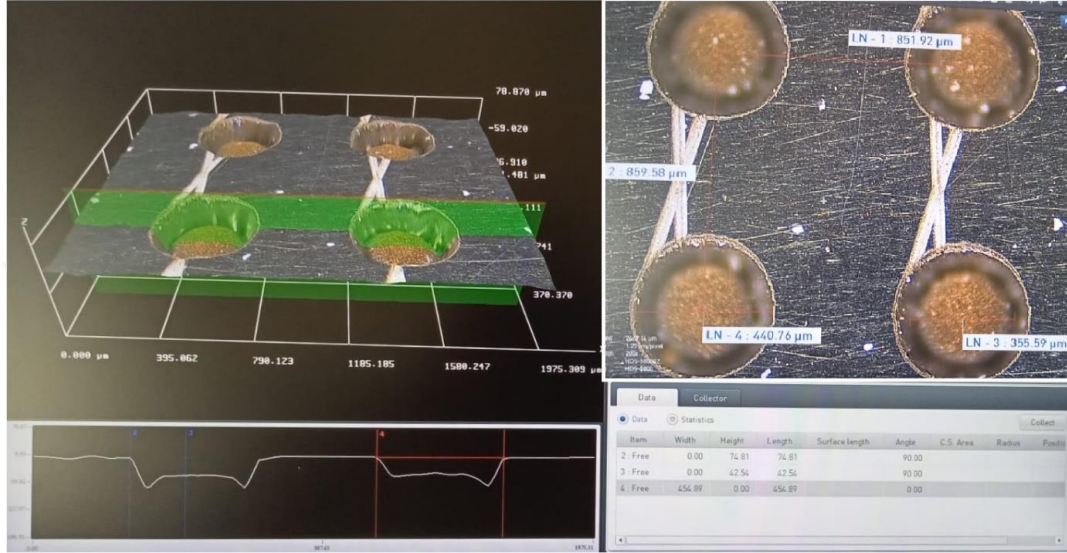
Şekil 4.20: Lazer uygulanmamış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası 3B aşınmış yüzey profilometre görüntüleri a) 1N, 30dk b) 1N, 90dk



Şekil 4.21: Lazer uygulanmamış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası 3B aşınmış yüzey profilometre görüntüleri a) 3N, 30dk b) 3N, 90dk

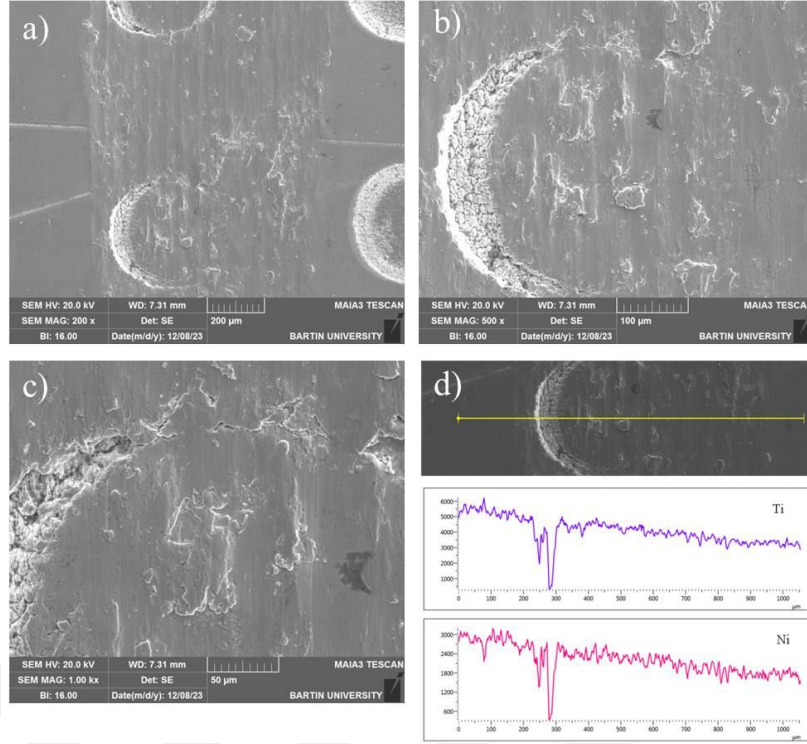
4.2. Lazer uygulanmış yüzeylerin aşınma davranışı

Fiber lazerle dairesel şekilli ablastyon işlemi ile gerçekleştirilen yüzey desenleme (surface texturing) işlemleri sonrası NiTi ŞHA'nın yüzeyine ait optik mikroskop (OM) görüntüsü Şekil 4.7.'de verilmiştir. Alansal lazer desen yoğunluğu % 34 olarak hesaplanmıştır.



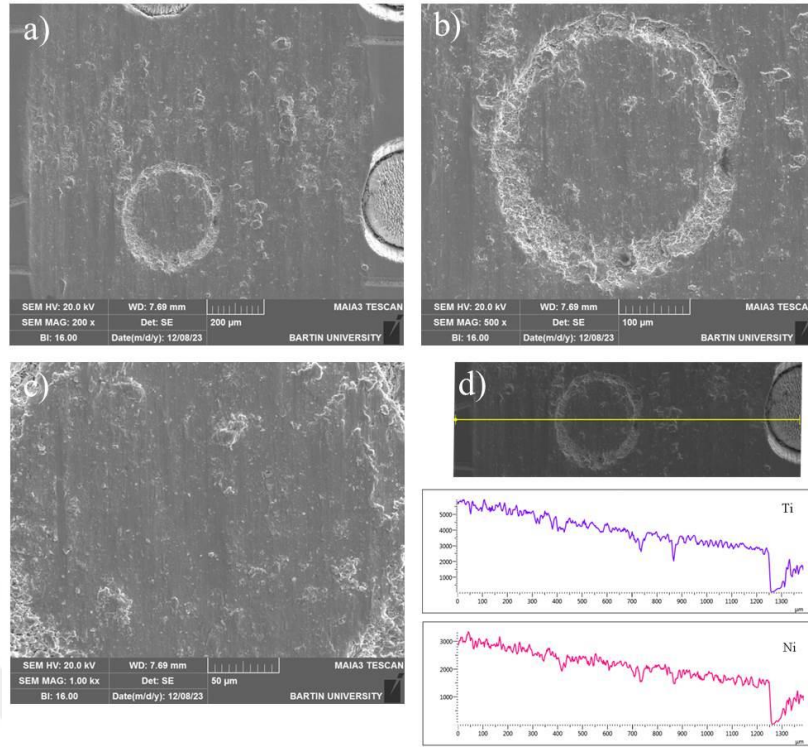
Şekil 4.22: Lazerle yüzey desenleme işlemi sonrası NiTi ŞHA numunesinin OM yüzey görüntüsü

Şekil 4.7. incelendiğinde lazer işlemi sonrasında yüzeyde dairesel olarak ablastyon yapılmış 440 μm çapında çukurlar ve aralarında merkezden merkeze 850 μm mesafe olacak şekilde tüm yüzey alanında matris yapıda dağıtılmış yüzey desenlerinin olduğu görülmektedir. Dairesel çukur deseninin ise aşağı yöne daralan konik yapıda ve 42 μm orta yüzey derinliğine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Dairesel lazer yolunun iz oluşumu esnasında çapla teğet derinlik yönünde ise yaklaşık 72 μm derinliğinde ekstra girinti oluştuğu dikkati çekmektedir. Bu durumun lazer takip yoluyla dar alana odaklanan yoğun lazer enerji girdisi sonucu oluştuğu düşünülmektedir.



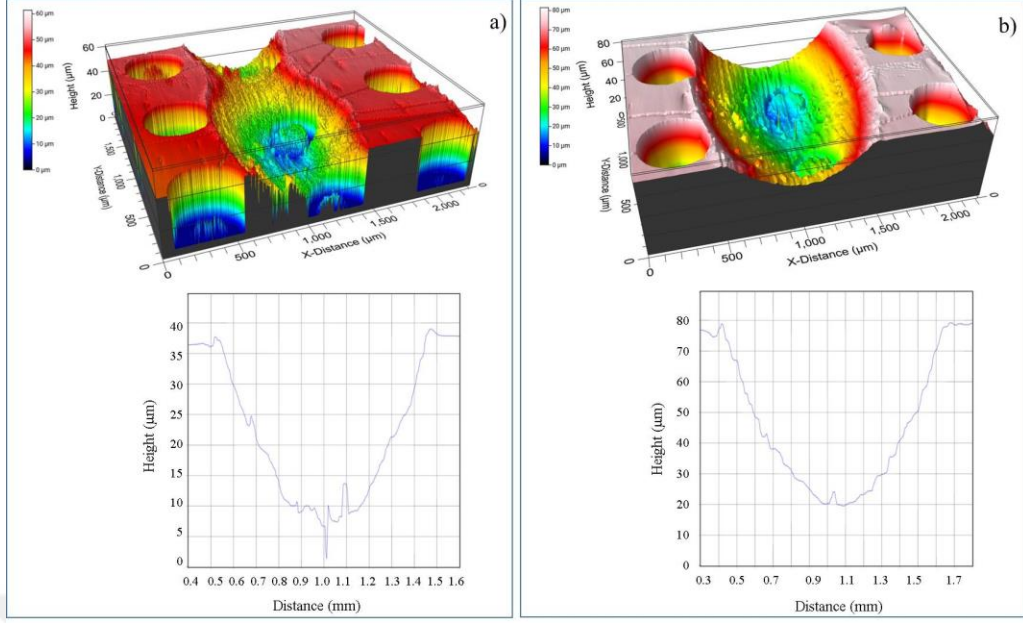
Şekil 4.23: Lazer uygulanmış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası aşınmış yüzey SEM ve EDS çizgi analizi görüntüleri (yük: 1N, test süresi: 30 dk, kayma hızı: 0.008 m/s) a) 200x b) 500x c) 1kx d) Aşınma izi eni boyunca alınan çizgi EDS analizi

Şekil 4.8.'de lazer ablasyon işlemi yapılmış yüzeyin 1N yük altında 30 dk boyunca kuru kayma aşınma deneyi sonucu alınan aşınmış yüzey SEM mikrografi görüntüleri verilmiştir. Oluşan iz genişliğinin yaklaşık olarak 800 μm olduğu görülmektedir (Şekil 4.8.a). Şekil 4.8.b'de verilen 500x büyütmeli SEM yüzey mikrografında abrazyon etkisiyle pulluklama (ploughing) etkisiyle aşınma izleri mevcut olmakla birlikte delaminasyona ait izler görülmektedir. Şekil 4.8.c'de verilen 1kx büyütmedeki SEM görüntüsünde lazer izinin çevresinde plastik deformasyona bağlı düzgün ve pürüzsüz bir aşınma olduğu görülürken, herhangi bir mikroçatlak oluşumuna rastlanmamıştır. Ayrıca, aşınma süresi boyunca iz bölgesinde oksit oluşumu meydana gelmemiştir (Şekil 4.8.d).



Şekil 4.24: Lazer uygulanmış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası aşınmış yüzey SEM ve EDS çizgi analizi görüntüleri (yük: 1N, test süresi: 90 dk, kayma hızı: 0.008 m/s) a) 200x b) 500x c) 1kx d) Aşınma izi eni boyunca alınan çizgi EDS analizi

Şekil 4.9.'da lazer ablasyon işlemi yapılmış yüzeyin 1N yük altında 90 dk boyunca aşınma deneyi sonucu alınan aşınmış yüzey SEM mikrografi görüntüleri verilmiştir. Oluşan iz genişliğinin yaklaşık olarak 1250 μm olduğu görülmektedir (Şekil 4.9.a). Şekil 4.9.b'de verilen 500x büyütmeli SEM yüzey mikrografında lazer izinin kaybolmadığı iz halkası etrafında ve iç bölgede yoğun şekilde aşınma atığının varlığı dikkati çekmektedir. Bununla birlikte delaminasyona ait izler de mevcuttur. Şekil 4.9.c'de verilen 1kx büyütmedeki SEM görüntüsünde plastik deformasyona bağlı düzgün ve pürüzsüz bir aşınma oluştuğu görülürken, herhangi bir mikroçatlak oluşumuna rastlanmamıştır. Lazer uygulanmamış yüzeylerde 90 dk boyunca aşınma testi sonrasında iz yüzeyinde oluşan oksit katmanının lazer uygulanmış yüzeydeki iz üzerinde oluşmadığı saptanmıştır (Şekil 4.9.d).

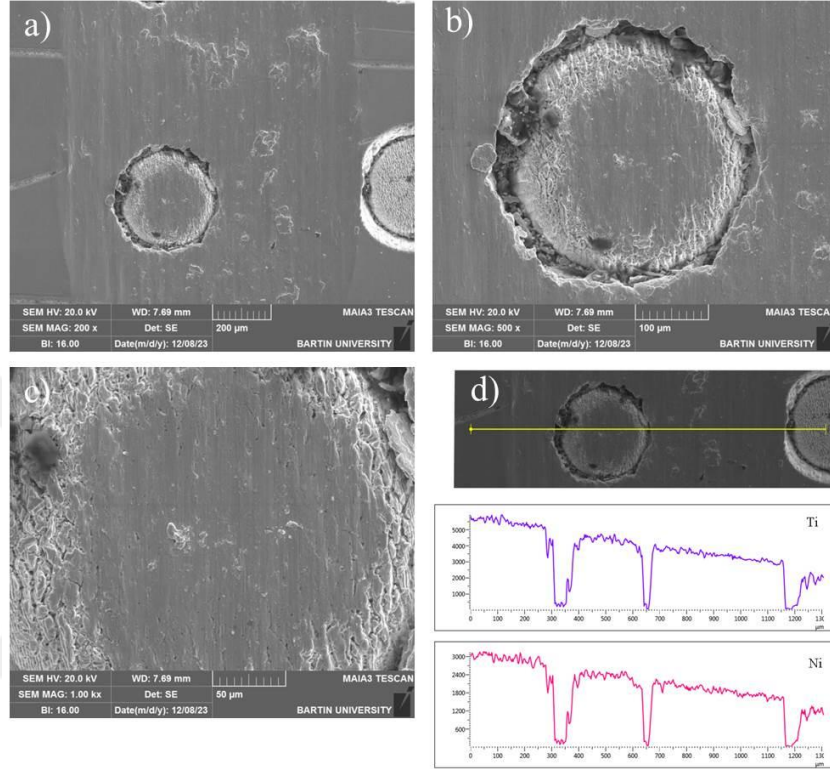


Şekil 4.25: Lazer uygulanmış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası 3B aşınmış yüzey profilometre görüntüleri a) 1N, 30dk b) 1N, 90dk

Lazer uygulanmış NiTi ŞHA numuneye ait 1N yük altında elde edilen aşınmış yüzey 3B profilometre görüntüleri Şekil 4.10.'da verilmiştir. 30 dk test süresi sonunda oluşan iz derinliği ve genişliği değerleri sırasıyla yaklaşık olarak 27 μm ve 1000 μm dur. Aşınmış iz yüzeyinde lazer izinin hala mevcut olduğu ve bunun yanı sıra lazer izi etrafında genişleyip daha sonra daralan formda bir iz oluştuğu dikkati çekmektedir. Bu durumu iz kenarında uygulanan nispeten düşük yük ve çevrimsel tekrarlı zıt yönlü yüklemeler sonucu yorulma çatlağı oluşumu ve ardından çatlağın ayrılması sonucu ortaya çıkan daha fazla malzeme deformasyonu ile açıklamak mümkündür. Test süresinin 90 dk olduğu süre sonunda ise oluşan aşınmış iz yüzeyinin daha düzgün kontura sahip olduğu ve daralan iz genişliği formunun 30 dk test süresine kıyasla daha az olduğu görülmektedir. Artan test süresiyle birlikte ölçülen iz derinliği yaklaşık 55 μm , iz genişliği ise 1250 μm dur.

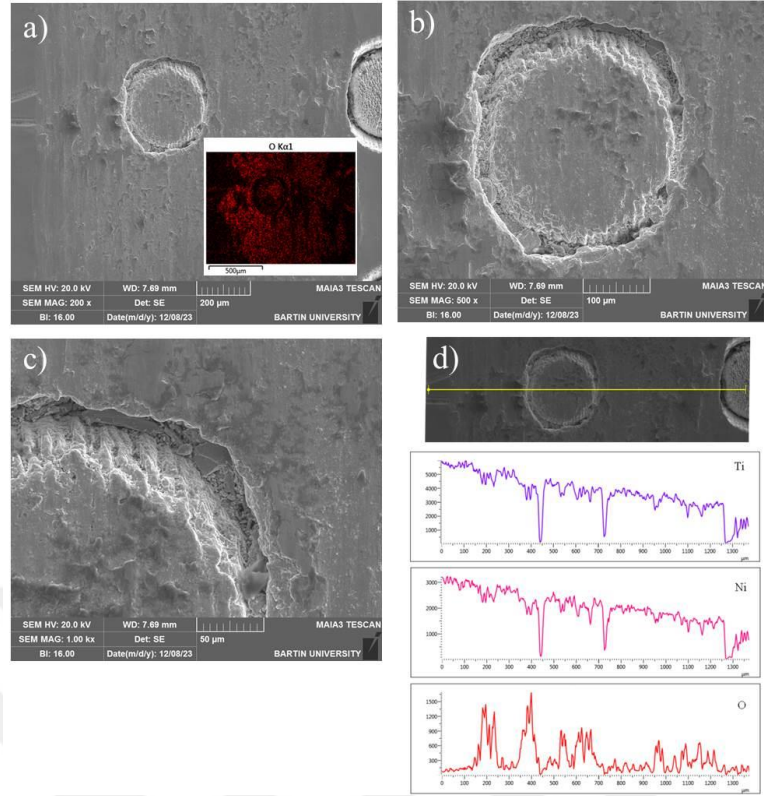
Şekil 4.11.'de lazer ablasyon işlemi yapılmış yüzeyin 3N yük altında 30 dk boyunca aşınma testine tabi tutulması sonucu oluşan aşınmış yüzey SEM mikrofotografı görüntüleri verilmiştir. Oluşan iz genişliğinin yaklaşık olarak 1000 μm olduğu görülmektedir (Şekil 4.11.a). Şekil 4.11.b'de verilen 500x büyütme SEM yüzey mikrofotografında lazer ablasyon dairesi içerisinde ve etrafında plastik deformasyon ve abrazyon aşınma mekanizmalarının etkili olduğu anlaşılmaktadır. Temas yüzeyi merkezinden kenarlara doğru ise yer yer aşınma partiküllerinin taşınarak yüzeye yapıştığı bununla birlikte delaminasyon oluşumu

da gözlenmiştir (Şekil 4.11.b). Şekil 4.11.b ve 4.11.c’de verilen SEM görüntülerinde lazer izinin çevresinde plastik deformasyona bağlı düzgün ve pürüzsüz bir aşınma olduğu görülürken, herhangi bir mikroçatlak oluşumuna rastlanmamıştır. Şekil 4.11.d’de verilen EDS çizgi analizinde herhangi bir oksit oluşumu meydana gelmediği tespit edilmiştir.

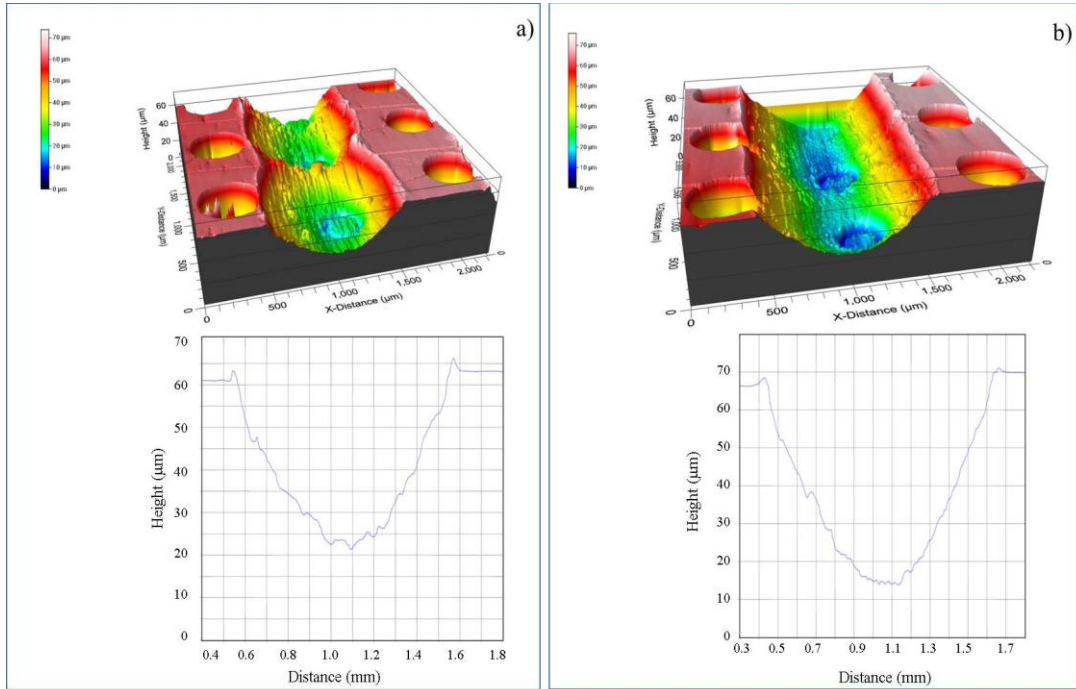


Şekil 4.26: Lazer uygulanmış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası aşınmış yüzey SEM ve EDS çizgi analizi görüntüleri (yük: 3N, test süresi: 30 dk, kayma hızı: 0.008 m/s) a) 200x b) 500x c) 1000x d) Aşınma izi eni boyunca alınan çizgi EDS analizi

Şekil 4.12.’de lazer ablasyon işlemi yapılmış numunenin 3N yük altında 90 dk süreyle aşınma testine tabi tutulması sonucu oluşan aşınmış yüzey SEM mikrofotografisi görüntüleri verilmiştir. Oluşan iz genişliğinin yaklaşık olarak 1250 μm olduğu görülmektedir (Şekil 4.12.a). Şekil 4.12.b’de verilen 500x büyütme SEM yüzey mikrofotografisinde lazer ablasyon dairesi içerisinde ve etrafında şiddetli plastik deformasyon ve abrazyona bağlı delaminasyonun baskın olduğu görülmektedir. Şekil 4.11.a’da verilen EDS mapping görüntüsü ve 4.11.d’de verilen EDS çizgi analizinde aşınmış yüzey üzerinde meydana gelen oksit oluşumu açıkça görülmektedir. Buradan hareketle artan yük ve test süresi ile oksit oluşumu için gereken şartların sağlandığı söylenebilir.



Şekil 4.27: Lazer uygulanmış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası aşınmış yüzey SEM ve EDS çizgi analizi görüntüleri (yük: 3N, test süresi: 90 dk, kayma hızı: 0.008 m/s) a) 200x b) 500x c) 1kx d) Aşınma izi eni boyunca alınan çizgi EDS analizi



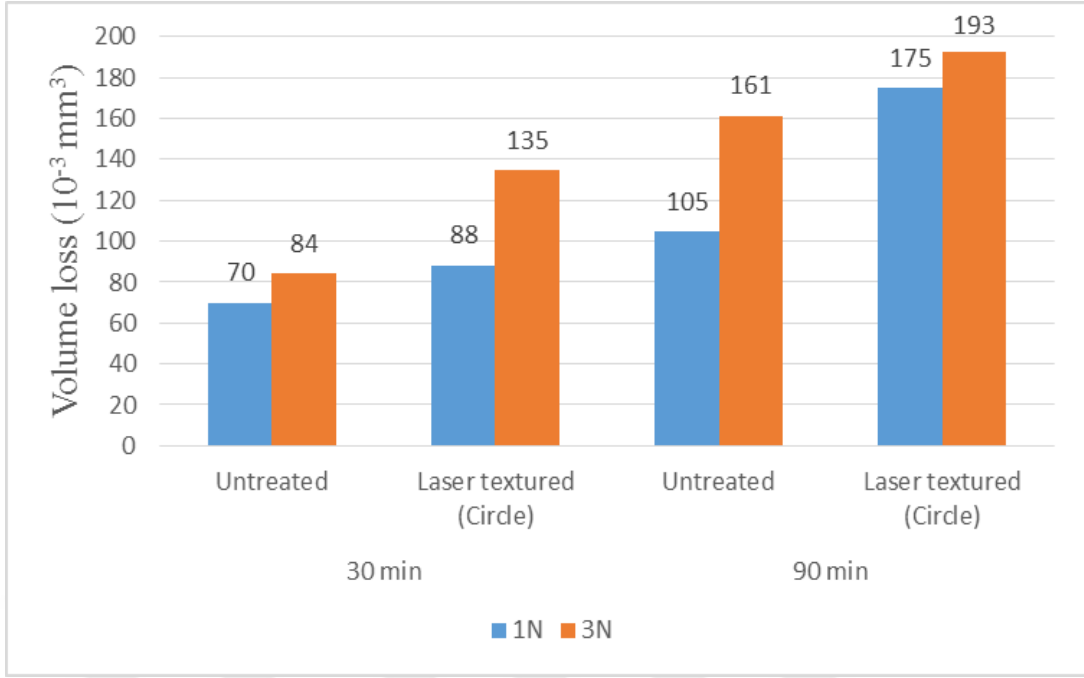
Şekil 4.28: Lazer uygulanmış NiTi ŞHA numuneye ait aşınma testi sonrası 3B aşınmış yüzey profilometre görüntüleri a) 3N, 30dk b) 3N, 90dk

Lazer uygulanmış NiTi ŞHA numuneye ait 3N yük altında elde edilen aşınmış yüzey 3B profilometre görüntüleri Şekil 4.13.'te verilmiştir. 30 dk test süresi sonunda oluşan iz derinliği ve genişliği değerleri sırasıyla yaklaşık olarak 40 µm ve 1000 µm dur. Benzer şekilde iz genişliği lazer çevresinde daha fazla iken iki lazer ablastasyon bölgesinin arasında daha daralmaktadır (Şekil 4.13.a). Artan test süresi ile birlikte aşınmış iz yüzeyinde lazer izinin hala mevcut olduğu ve 30 dk lık testten elde edilen izdeki gibi lokal iz genişlik daralmasının oluşmadığı, diğer bir ifade ile aşınma izi genişliğinin iz boyunca aynı kaldığı görülmektedir (Şekil 4.13.b). Artan test süresiyle birlikte ölçülen iz derinliği yaklaşık 53 µm, iz genişliği ise 1250 µm dur. Buradan hareketle 3N yük altında artan süre ile iz derinlik ve genişliğinde önemli bir fark oluşmadığı sadece iz konturunun daha düzgün ve genişliğinin ise iz boyunca korunduğu bir aşınma izinin ortaya çıktığı söylenebilir.

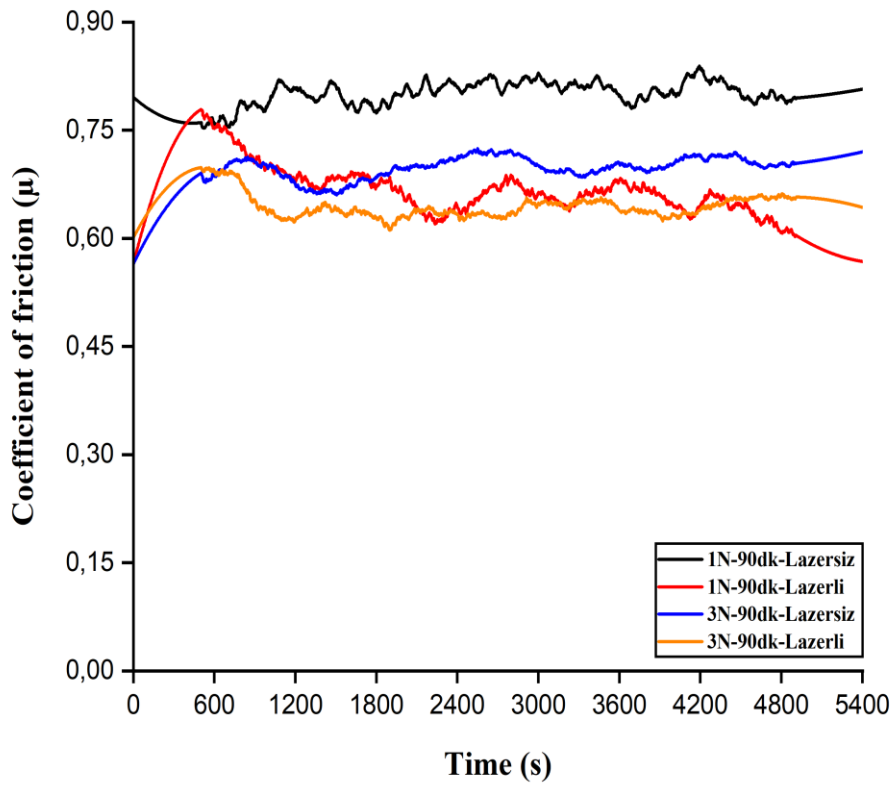
4.3. Lazer öncesi ve sonrası aşınma verilerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi

Lazer ablastasyon işlemi ile yüzey desenleme öncesi ve sonrasında aşınma verilerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi aşınma hacim kayıpları, aşınma oranları ve deneyler sırasında kaydedilen sürtünme katsayısı (coefficient of friction-COF) verileri esas alınarak gerçekleştirilecektir.

Şekil 4.14.'te deneyler sonrası hesaplanan hacim kaybı değerlerine ait grafik verilmiştir. Şekil 4.14. incelendiğinde genel olarak lazer uygulanmış numunelerdeki hacim kaybı değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun boşaltılan dairesel şeklin alanının yaklaşık 70 µm kalınlığındaki tek bir lazer pasosu ile değil de 6-7 yanal ofsetli lazer geçişi ile ancak boşaltılabildiği ve böylece lazer uygulama bölgesi ve yakınındaki ısı tesiri altındaki bölgede (ITAB) termal yumuşamaya neden olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durumu lazerli numunelerde mikroçatlak oluşumunun meydana gelmemesi de desteklemektedir. Böylece termal yumuşama ve temas hareketinden kaynaklanan teğetsel kayma gerilmesinin etkisiyle aşınmanın gerçekleştiği söylenebilir. Bununla birlikte tüm numunelerde artan yük ve test süresi ile birlikte hacim kaybı değerlerinin de arttığı görülmektedir.

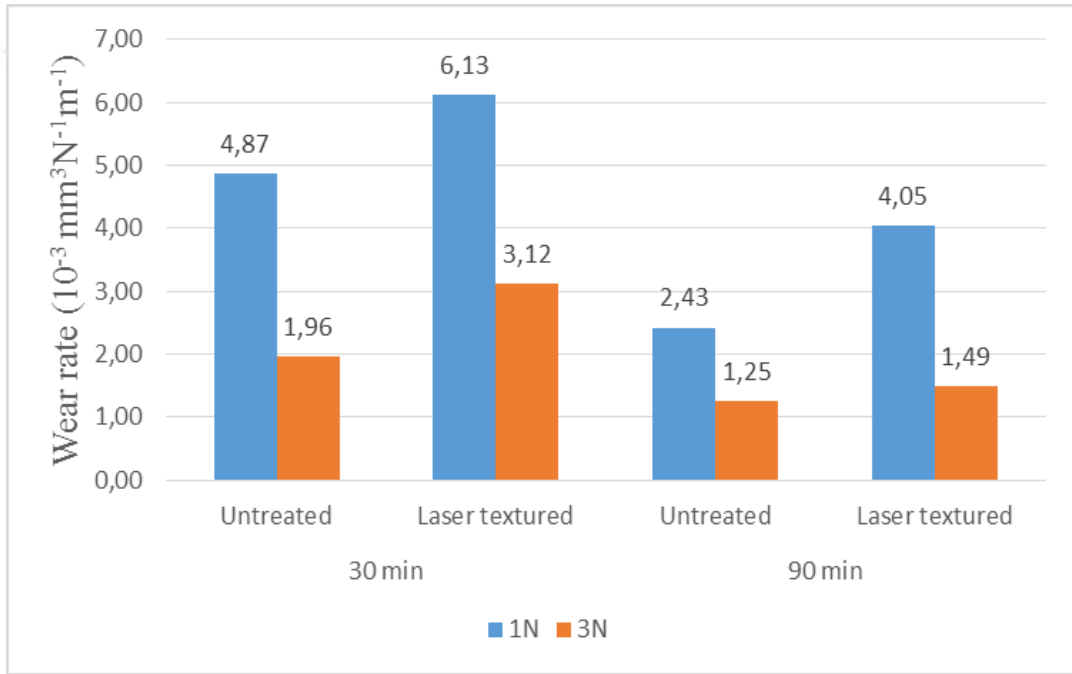


Şekil 4.29: Aşınma deneyleri sonrasında hesaplanan aşınma hacim kaybı değerleri



Şekil 4.30: Aşınma deneyleri sonrasında kaydedilen sürtünme katsayısı (COF) değerleri

Şekil 4.15.'te aşınma deneyleri esnasında kaydedilen sürtünme katsayısı değerlerine ait bir grafik verilmiştir. Buna göre, lazer uygulamasının COF değerlerini düşürdüğü açıkça görülmektedir. Bununla birlikte artan yüklerle birlikte COF değerleri de düşmektedir. Artan yüklerle birlikte COF değerinin düşmesi plastik deformasyon şiddetinin artmasının sonucunda daha az pürüzlü düzgün (smooth) bir temas yüzeyinin elde edilmesi ile açıklanabilir. Lazerli numunelerin COF değerindeki azalma ise ilk olarak lazer ablasyonu sonucu sürtünmenin gerçekleştiği temas alanındaki azalmanın yanı sıra kopan aşınma partiküllerin ablasyon edilen dairesel çukurlara doldurulmasının neden olduğu teğetsel kuvvetteki düşüşle açıklanabilir.



Şekil 4.31: Aşınma deneyleri sonrasında hesaplanan aşınma oranı değerleri

Şekil 4.16.'da aşınma oranı değerlerine ait grafik verilmiştir. Buna göre tüm numuneler (işlemsiz ve lazer ablasyon uygulanmış) için artan yüklerle birlikte spesifik aşınma oranı değerlerinin azaldığı, diğer bir ifadeyle doğru orantılı artışın gerçekleşmediği görülmüştür. Bu durumu destekleyen bir diğer veri ise lazer uygulanmamış numunenin 1N ve 3N yükler altında 30 dk da hesaplanan aşınma oranı değerlerinin 3 kat daha fazla kayma mesafesinde (90dk test süresince) hesaplanan lazer uygulanmış numunelerinkine kıyasla daha fazla olmasıdır. Burada da artan test süresiyle doğru orantılı bir aşınma meydana gelmediği doğrulanmış olmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasından elde edilen verilerden aşağıdaki sonuçları çıkarmak mümkündür:

- NiTi şekil hafızalı alaşımının femtosecond pulse değerlikli lazer ile ablasyon işlemi yapılarak 450 μm çapında ve yaklaşık 40 μm derinliğe sahip dairesel çukur desenli yüzey işlemi gerçekleştirilmiştir.
- Uygulanan lazer ablasyon işlemi ile yüzey desenlemede belirlenen desen alan yoğunluğu %34 olup, 1N yük altında lazer işlemi uygulanmamış numunelerin sürtünme katsayısı değerlerine göre yaklaşık % 17 lik düşüşe neden olmuştur. 3N yük altında COF değerindeki düşüş ise yaklaşık % 14 olarak hesaplanmıştır.
- Lazer ablasyon işleminde desen alan yoğunluğunun COF değerlerini düşürmede etkili olduğu saptanmıştır.
- Aşınma hacim kaybı değerleri incelendiğinde lazer uygulanmış numunelerin hacim kaybı değerleri daha yüksek çıkmıştır. Bunun ana nedeninin ablasyon hacminin fazla olmasından dolayı çoklu lazer geçişi yapılmak zorunda kalınmıştır. Şöyle ki, lazerin tek paso geçişinde 70 μm genişliğinde bir alana etkimesi ile 6-7 geçişte 450 μm luk dairesel alan ablasyon edilebilmiştir ve dolayısıyla çoklu geçişlerin termal yumuşamaya neden olduğu düşünülmektedir. Bu durumu lazersiz numunelerde özellikle 3N yük ve 90 dk da görülen mikroçatlakların lazerli numunelerde görülmemiş olması da desteklemektedir.
- Aşınma oranı sonuçlarına göre artan yüklerle birlikte hem işlemsiz hem de lazer ablasyon uygulanmış numunelerin aşınma oranı değerleri artmıştır. Bununla birlikte lazer uygulanmış numunelerin aşınma oranları işlemsiz numuneye göre daha yüksek çıkmıştır. Ancak aşınma oranındaki artış artan yük ve test süresi ile doğru orantılı olarak artmamaktadır. Diğer bir ifadeyle aşınma hacim kaybındaki artış miktarının yük ve kayma mesafesindeki artış göre daha düşük kaldığı tespit edilmiştir.
- Aşınmış yüzey incelemelerinden, düşük yüklerde (1N) ve 30 dk test süresi sonunda, işlemsiz numune yüzeyinde aşınma izi kanalları (grooving) ve kazıma (ploughing) etkisi ile oluşmuş kaba pürüzlü bir yüzey oluşurken, lazer ablasyon uygulanmış numune yüzeyinde plastik deformasyona bağlı daha düzgün konturlu bir aşınma izi profili elde edilmiştir.

- 3N yük ve 90 dk test süresi sonunda hem işlemsiz hem de lazerli numunelerin aşınmış iz yüzeyinde oksit oluşumu meydana geldiği saptanmıştır. 30 dk test süresinde oksit oluşumuna rastlanmamıştır.

Sonraki çalışmalar için tavsiye niteliğindeki önerileri şu şekilde sıralamak mümkündür:

- Lazer alan yoğunluğu farklı desenler için lazer parametresi optimizasyonu ile elde edilen yüzey desenleri için aşınma oranı ve COF değerinin ne şekilde değiştiği çalışılabilir.
- Lazer ablasyon alanı düşük tutularak lazer ısı girdisinin oluşturduğu termal yumuşama etkisi azaltılıp daha yüksek yüzey sertliği elde edilebilir.
- Farklı desen tipinin aşınmaya etkisi çalışılabilir.
- Yağlamanın desen tipi ve desen alan yoğunluğu ile birlikte aşınmaya etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Alrbaey, K., Wimpenny, D., Tosi, R. Manning, W. ve Moroz, A. (2014). On Optimization of Surface Roughness of Selective Laser Melted Stainless Steel Parts: A Statistical Study. *J. of Materi Eng and Perform* 23, 2139–2148.
- Baset, F., Villafranca, A., Guay, J.M. ve Bhardwaj, R. (2013). Femtosecond laser induced porosity in poly-methyl methacrylate. *Applied Surface Science*. 282,
- Chan, C.W., Man, H.C. ve Yue, T.M. (2012). Effect of post-weld heat-treatment on the oxide film and corrosion behaviour of laser-welded shape memory NiTi wires, *Corros. Sci* 56,
- Demircan, Y., Gemici, S. ve Sert, A. (2021). Laser Surface Texturing and Techniques to Improve the Tribological Properties of Materials. *Open Journal of Nano*, 6 (2), 41-58 .
- Ding, K. ve Ye, L. (2009). *Laser Shock Peening: Performance and Process Simulation* Woodhead Publishing Ltd., Cambridge,.
- Gachot, C., Rosenkranz, A., Reinert, L., Ramos-Moore, E., Souza, N., Müser, MH. ve Mücklich, F. (2013). Dry friction between laser-patterned surfaces: role of alignment, structural wavelength and surface chemistry. *Tribol Lett* 49,
- Ge, M.Z., Xiang, J.Y., Tang, Y., Ye X., Fan, Z., Lu, Y.L. ve Zhang, Z.H. (2018). *Surf. Coat. Technol*, 337, 501.
- Gestel, M.V., Merckx, R. ve Vlassak, K. (1993). Microbial biomass and activity in soils with fluctuating water contents. *Geoderma*, 56: 617-626.
- Gujba, A. K. ve Medraj, M. (2014). Laser peening process and its impact on materials properties in comparison with shot peening and ultrasonic impact peening. *Materials* 2014.
- Hu, T., Wen, C.S., Sun, G.Y., Wu, S.L., Chu, C.L., Wu, Z.W., Li, G.Y., Lu, J., Yeung, K.W.K. ve Chu, P.K. (2010). Wear resistance of NiTi alloy after surface mechanical attrition treatment, *Surf. Coatings Technol*. 205,
- Hua, Y., Bai, Y., Ye, Y., Xue, Q., Liu, H., Chen, R. ve Chen K. (2013). Hot corrosion behavior of TC11 titanium alloy treated by laser shock processing, *Appl. Surf. Sci* 283,
- Hung, C., Chang, F., Chang, T., Chang, Y., Huang, K. ve Liang, P. (2015). Micromachining NiTi tubes for use in medical devices by using a femtosecond laser, *Optics and Lasers in Engineering*, 66, 34-40.
- Ito, S., Takahashi, K. ve Sasaki, S. (2019). Generation mechanism of friction anisotropy by surface texturing under boundary lubrication. *Tribol Int*,

- Kankılıç, T., Çolak, R., Kandemir, I. ve Çolak, E. (2006). Morphological comparison of seven chromosomal forms of *Spalax leucodon* Nordman, 1840 (Mammalia:Rodentia) in Turkey. Pakistan Journal of Biological Sciences, 9 (13): 2419-2425.
- Kato, K. ve Adachi, K. (2000). Chapter 7, Wear Mechanism. Modern Tribology Handbook
- Keskin, İ. (2012). Yürek Mekanizmalarında Aşınma Ve Elastohidrodinamik Yağlama. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 125 s.
- Koç, R. ve Mutlu, İ. (2005). Poli-Oksi-Metilen (Pom) Ve Kompozitlerinin Abrasiv Aşınma Davranışları, Teknoloji Dergisi, Sayı2, 199–205
- Kovalchenko, A., Ajayi, O., Erdemir, A., ve Fenske, G. (2011). Friction and wear behavior of laser textured surface under lubricated initial point contact. Wear, 271(9-10), 1719-1725.
- Kusinski, J., Kac, S., Kopia, A., Radziszewska, A., Rozmus-Górnikowska, M., Major, B., Major, L., Marczak, J. ve Lisiecki, A. (2012). Laser modification of the materials surface layer – a review paper, Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences Technical Sciences, 60 (4)
- Küçük, Y. (2020). Effect of counterbody on the dry sliding wear performance of plasma sprayed calcia-stabilized zirconia coating. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 92.
- Küçük, Y. (2021). Effect of counter body on wear behavior of plasma-sprayed TiO₂-45Cr₂O₃ coating. Journal of Asian Ceramic Societies, 9(1).
- Liu, Y., Liu, L., Deng, J., Meng, R., Zou, X. ve Wu, F. (2017). Fabrication of micro-scale textured grooves on green ZrO₂ ceramics by pulsed laser ablation. Ceram Int;43:6519–31.
- Liu, J. X., Sun, S. B., Chen, F., Tong, Y. X. ve Guan, L. (2022). High temperature wear behavior of Ni-rich NiTi-based alloys. Journal of Materials Research and Technology, 20.
- Marczak, J., Koss, A., Targowski, P., Gora, M., Strzelec, M., Sarzynski, A., Skrzeczanowski, W., Ostrowski, R. ve Rycyk, A. (2008). “Characterization of laser cleaning of artworks”, Sensors 8, 6507–6548.
- Mao, B., Siddaiah, A., Liao, Y. ve Menezes, P.L. (2020). Laser surface texturing and related techniques for enhancing tribological performance of engineering materials : A review. Journal of Manufacturing Processes. 53,
- MohdJani J., Leary M., Subic A. ve Gibson M.A. (2014). A review of shape memory alloy research, applications and opportunities Materials and Design 56,

- Nemat-Nasser, S. ve Choi, J.Y. (2005). Strain rate dependence of deformation mechanisms in a Ni-Ti-Cr shape-memory alloy. *Acta Mater.* 53,
- Oğuz, B. (1993). Aşınma Sorunları Ve Dolgu Kaynakları. Oerlikon Yayınları, İstanbul, s. 736.
- Otsuka, K. ve Ren, X. (1997). Recent developments in research of shape memory alloys, *Intermetallics* 7,
- Otsuka, K. ve Ren, X. (2005). Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys, *Progress in Materials Science* 50,
- Otsuka, K. ve Wayman, C.M. (1999). Shape memory materials. Cambridge University Press, Cambridge.
- Otsuka, K. ve Kakeshita, T. (2000). Science and Technology of Shape Memory Alloys, New Developments, *MRS Bulletin*, , 91-100
- Özel, S. (2004). Cu-Sn-Zn-Al Bronz Alaşımın Yüzeyine Ferromangan Kaplamasının Aşınma Direncine Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi F.Ü. Fen Bil.Enst. Elazığ
- Park, J., Han, H.S., Park, J., Seo, H., Edwards, J., Kim, Y.C., Ok, M.R., Seok, H.K. ve Jeon, H. (2018). Corrosion behavior of biodegradable Mg-based alloys via femtosecond laser surface melting *Appl. Surf. Sci.* 448,
- Pei, X., Wang, Q. ve Chen, J. (2005). Tribological responses of Phenolphthalein Poly (ethersulfone) on proton irradiation; Elsevier, *Wear*, 719-724
- Przybyłowicz, J. (1999). “Structure and explosive properties laser clad cobalt alloys coatings”, PhD Thesis, AGH-University of Science and Technology, Kraków, , (in Polish).
- Rozmus-Gornikowska, M. (2010). “Surface modifications of a Ti6Al4V Alloys by a laser shock processing”, *Acta Physica Polonica A* 117 (5), 808–811.
- Sano, T., Eimura, T., Kashiwabara, R., Matsuda, T., Isshiki, Y., Hirose, A., Tsutsumi, S., Arakawa, K., Hashimoto, T. ve Masaki, K. (2017). Femtosecond laser peening of 2024 aluminum alloy without a sacrificial overlay under atmospheric conditions, *J. Laser Appl.* 29,
- Sevim, İ. (1998). Çeliklerin Abrasiv Aşınmasında Aşındırıcı Tane Büyüklüğünün Aşınma Direncine Etkisi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 170 s.
- Singh, I. (1994). “Review on: laser-beam and photon-assisted processed materials and their microstructures”, *J. Mater. Sci.* 29, 5232–5258.
- Strnadel, B., Ohashi, S., Ohtsuka, H., ve Ishihara, T. (1995). ScienceDirect - Materials Science and Engineering A: Cyclic stress-strain characteristics of Ti-Ni and Ti-

- Ni-Cu shape memory alloys. *Materials Science and Engineering A* 202 (1995) 148-156.
- Sun, L. ve Huang, WM. (2009). Nature of the multistage transformation in shape memory alloys upon heating. *Met Sci Heat Treat*;5,
- Terkeşli, M.H. (2017). Aps Yöntemi İle Üretilen WC ve Mo Kaplamaların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, 74 s
- Uçurum, M., Güneşsu, E., Şirin, T.B. ve Kaynak, Y. (2021). Farklı kesme parametreleriyle işlenmiş 316LVM paslanmaz çelik malzemesinin talaşlı imalat-yüzey bütünlüğü-aşınma direnci arasındaki ilişkinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4) : 449-457.
- Wang, H., Jürgensen, J., Decker, P., Hu, Z., Yan, K., Gurevich, E.L. ve Ostendorf, A. (2020). Corrosion behavior of NiTi alloy subjected to femtosecond laser shock peening without protective coating in air environment, *Appl. Surf. Sci.*501,
- Wang, X.Y. ve Li, D.Y. (2005). Application of an electrochemical scratch technique to evaluate contributions of mechanical and electrochemical attacks to corrosive wear of materials, *Elsevier; Waer*; 1490-1496
- Xu, K., Zhang, C., Zhou, R., Ji, R. ve Hong, M. (2016). Hybrid micro/nano-structure formation by angular laser texturing of Si surface for surface enhanced Raman scattering. *Optics Express*. 24, 10352,
- Xue, X., Lu, L., Wang, Z., Li, Y. ve Guan, Y. (2021). Improving tribological behavior of laser textured Ti-20Zr-10Nb-4Ta alloy with dimple surface, *Materials Letters*, 305,130876,
- Yan, X.J., Yang, D.Z. ve Liu, X.P. (2006). Electrochemical behavior of YAG laser-welded NiTi shape memory alloy, *Trans. Nonferrous Metals Soc. China* 16,
- Ye, C. ve Cheng, G.J. (2010). “Warm laser shock peening driven nanostructures and their effects on fatigue performance in aluminum alloy 6160”, *Advanced Engineering Materials* 12 (4), 291–297.
- Yu, H., Wang, X. ve Zhou F. (2010). Geometric shape effects of surface texture on the generation of hydrodynamic pressure between conformal contacting surfaces. *Tribol Lett* 37,
- Zeng, S., Li, J., Zhou, N., Zhang, J., Yu, A. ve He, H. (2020). Improving the wear resistance of PTFE-based friction material used in ultrasonic motors by laser surface texturing. *Tribology International*, 141.