

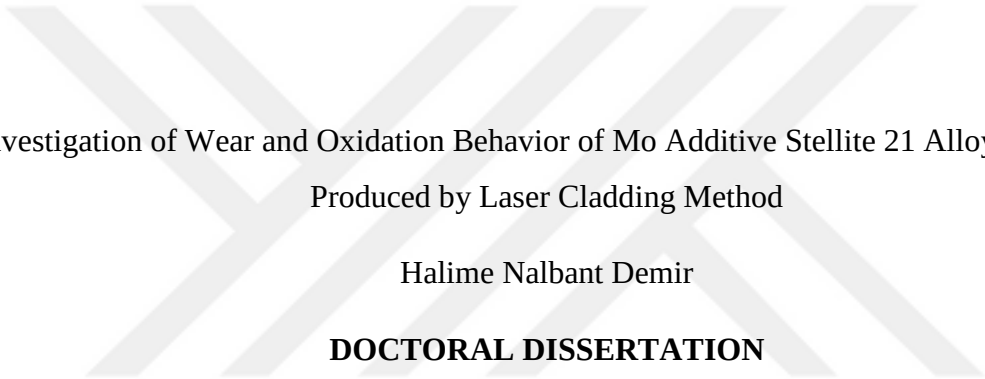
Lazer Kaplama Yöntemi Kullanılarak Üretilen Mo Katkılı Stellite 21 Alaşımı
Kaplamaların Aşınma ve Oksidasyon Davranışlarının İncelenmesi

Halime Nalbant Demir

DOKTORA TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2025



Investigation of Wear and Oxidation Behavior of Mo Additive Stellite 21 Alloy Coatings

Produced by Laser Cladding Method

Halime Nalbant Demir

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Metallurgy and Materials Engineering

January 2025

Lazer Kaplama Yöntemi Kullanılarak Üretilen Mo Katkılı Stellite 21 Alaşımı
Kaplamaların Aşınma ve Oksidasyon Davranışlarının İncelenmesi

Halime Nalbant Demir

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi Bilim Dalında

DOKTORA TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Hakan Gaşan

Ocak 2025

ONAY

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi **Halime Nalbant Demir**'in DOKTORA tezi olarak hazırladığı “Lazer Kaplama Yöntemi Kullanılarak Üretilen Mo Katkılı Stellite 21 Alaşımı Kaplamaların Aşınma ve Oksidasyon Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Hakan Gaşan

İkinci Danışman :

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Hakan GAŞAN

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Neşe ÖZTÜRK KÖRPE

Üye: Doç. Dr. Erhan AYAS

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Reşat Can ÖZDEN

Üye: Doç. Dr. Hüseyin Boğaç POYRAZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr.

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Hakan Gaşan danışmanlığında hazırlamış olduğum “Lazer Kaplama Yöntemi Kullanılarak Üretilen Mo Katkılı Stellite 21 Alaşımı Kaplamaların Aşınma ve Oksidasyon Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı Doktora tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.

03/01/2025

Halime Nalbant Demir

İmza

ÖZET

Bu çalışmada aşınma ve erozyonun hasarının yüksek olduğu namlu içinde alternatif bir koruyucu uygulama olması muhtemel lazer kaplama yönteminde kullanılmak üzere farklı Stellite alaşımlarının üretim ve karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında Stellite 21 tozları ağırlıkça %3, 6 ve 9 oranında benzer boyutlardaki Mo tozları ile karıştırılarak kullanılmıştır. Lazer kaplama işlemi namlu çeliği olarak bilinen 32CrMoV12-10 üzerine yapılarak numuneler elde edilmiştir. Lazer kaplama sonrası taşlama ile yüzey temizliği yapılan numunelerin yapı ve özelliklerinin ortaya çıkarılması amacıyla yapısal ve mekanik karakterizasyon çalışmaları ile oksitleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Lazer kaplama sonrası elde edilen numunelerde ağırlıkça artan %Mo oranı ile paralel olarak Co_3Mo intermetalik fazının yoğunluğunun arttığı görülmüştür. Ayrıca Mo ilavesinin Cr_7C_3 ve Cr_{23}C_6 gibi karbür fazlarının oluşumuna da katkı sağladığı görülmüştür. Mekanik karakterizasyon çalışmaları sonucunda alaşımların sertliklerinin %Mo ilavesi ile orantılı olarak arttığı ve bu durumun oda sıcaklığındaki aşınma dayanımını artırdığı görülmüştür. 500 °C sıcaklıklardaki aşınma mekanizmasının ise daha karmaşık olduğu, birleşik adhezif ve abrasif aşınma mekanizmasına ek olarak oksidatif aşınma mekanizmasının çalıştığı tespit edilmiştir. Alaşımların korozyon performanslarının incelenmesi için; 500, 800 ve 1000 °C sıcaklıklarda 24 saat boyunca oksitlemesi ile termogravimetrik (TGA) analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda Mo ilaveli Stellite alaşımlarının oksidasyon direncinin genel olarak arttığı görülmüştür.

Çalışma sonucunda Stellite 21 alaşımlarına yapılacak Mo ilavesinin alaşımın mekanik özelliklerini iyileştirdiği ve oksidasyon direncini artırdığı raporlandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Stellite 21, Stellite alaşımları, lazer kaplama

SUMMARY

In this study, production and characterization studies of different Stellite alloys were carried out for use in the laser cladding method, which is likely to be an alternative protective application in the barrel where wear and erosion damage is high. Within the scope of the study, Stellite 21 powders were used by mixing with Mo powders of similar sizes at 3, 6 and 9% by weight. Samples were obtained by laser cladding process on 32CrMoV12-10, known as barrel steel. Structural and mechanical characterization studies and oxidation studies were carried out in order to reveal the structure and properties of the samples that surface cleaned by grinding after laser cladding.

In the samples after laser cladding, it was observed that the density of the Co_3Mo intermetallic phase increased in parallel with the increasing Mo% ratio by weight. It was also observed that Mo addition contributed to the formation of carbide phases such as Cr_7C_3 and Cr_{23}C_6 . As a result of mechanical characterization studies, it was observed that the hardness of the alloys increased gradually with the %Mo addition and this increased the wear resistance at room temperature. It has been determined that the wear mechanism at temperatures of 500 °C is more complex that is a combined adhesive and abrasive wear mechanism and an additional oxidative wear mechanism operates. To investigate the corrosion performance of the alloys, thermogravimetric (TGA) analyses were carried out by oxidation at 500, 800 and 1000 °C for 24 hours. As a result of the analysis, it was observed that the oxidation resistance of Stellite alloys with Mo addition generally increased.

As a result of the study, it was reported that the Mo addition to Stellite 21 alloys improved the mechanical properties of the alloy and increased its oxidation resistance.

Keywords: Stellite 21, Stellite alloys, laser cladding

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim süresince yardım ve rehberliğini esirgemeyen, Sayın Prof. Dr. Hakan Gaşan’a danışmanlığı için içten teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme komitemde yer alarak değerli görüşleri ile araştırmamın şekillenmesini sağlayan Dr. Öğr. Üyesi Neşe Öztürk Körpe ve Doç. Dr. Erhan Ayas hocalarıma teşekkür ederim.

Çalışmamın analizlerinde yardımlarını esirgemeyen MMD Makine ve TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş. ekibindeki tüm arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmamın en önemli kısmını oluşturan namlu içi lazer kaplama sisteminin geliştirilmesi sürecinde program, tecrübe ve teknoloji desteğini esirgemeyen Uniquetech firması ve çalışanlarına, bu proje ekibindeki arkadaşlarım Bahadır Yücel ve Melih Tarım’a teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmanın heyecan verici bir proje olmasını mümkün kılan, kaynaklarını ve tüm üretim parkurunu paylaşan Sarsılmaz Silah Sanayi A.Ş. ve başta Sena Hoşver olmak üzere tüm çalışama arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi ve minnettarlığımı sunarım.

Varlıkları ile bana güç veren, beni ben yapan sevgili Anne ve Babama, aileme, arkadaşlarıma ve her daim benimle olacağını bildiğim biricik Miçom’a...

Ve tabii ki hayata bakışından ilham aldığım; sabrını, ilgisini, sevgisini ve desteğini esirgemeyerek macerama ortak olan eşim Deniz’e çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1. Namlu Aşınma Mekanizmaları.....	3
2.2. Mevcut Koruyucu Kaplama Uygulamaları.....	8
2.2.1. Krom kaplama.....	8
2.2.2. Kobalt esaslı gömlek uygulaması	11
2.3. Lazer Kaplama (Cladding) Uygulaması	13
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	17
3.1. Stellite Alaşımları ve Özellikleri	18
3.2. Lazer Kaplama (Cladding) Sonrası Stellite	22
3.3. Stellite Alaşımlarının Aşınma ve Korozyon Davranışları	25
3.3.1. Oda sıcaklıklarındaki aşınma ve korozyon davranışları	25
3.3.2. Yüksek sıcaklıklardaki aşınma ve korozyon davranışları.....	32

İÇİNDEKİLER

Sayfa

3.3.3. Stellite alaşımlarının lazer uygulamalarında aşınma ve korozyon davranışları	34
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	39
4.1. Alaşımların Belirlenmesi	39
4.2. Kaplama Numunelerinin Üretilmesi	40
4.3. Yapısal Karakterizasyon Çalışmaları	43
4.4. Mekanik Karakterizasyon Çalışmaları	44
4.4.1. Sertlik ölçümleri.....	44
4.4.2. Aşınma testleri	44
4.5. Oksidasyon Deneyleri.....	46
5. BULGULAR VE TARTIRIŞMA.....	48
5.1. Üretilen Alaşımlar ve Yapısal Karakterizasyonları	48
5.2. Alaşımların Mekanik Karakterizasyonları	54
5.2.1. Sertlik ölçümleri.....	54
5.2.2. Aşınma testleri	56
5.3. Oksidasyon Çalışmaları	68
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	74
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

2.1. Namluda hasarlanmaya ilişkin; üstte hasarsız, ortada normal aşınmış ve altta lokal erime ve erozyon içeren aşırı aşınmış yiv set görünümü (Lawton, 2001).	4
2.2. 10 atım sonrasında namlu yüzeyinin mikroyapısı; A) namlu malzemesi, B) ITAB ve C) KOEB (Lawton, 2001).	6
2.3. 120 mm krom kaplı tank namlusunun kesitinde 118 atış sonrasında görülen termal çatlaklar ve kaplama altında oluşan çatlak başlangıçları.	7
2.4. Krom kaplı 20 mm top namlusu kesiti ve hasarlanmış atım yatağı.....	10
2.5. 20 mm top namlusu kesiti üzerinden; (a) krom kaplamadaki çatlaklar, (b) çatlak altı erozyonlar, (c) yüzeyden kopan sert krom kaplama ve kromsuz kalan namlu çeliğinin deformasyonu, (d) çatlak arasında ergimiş veya sıvanmış metal kalıntıları.	10
2.6. Ömrünü tamamlamış M2 tüfeklerinden çıkarılan Stellite 21 gömlekli, 3 parçalı namlu kesiti.	12
2.7. Lazer Kaplama yöntemini gösterir şema (Flame Spray Technologies,2017).	14
2.8. 35 mm top namlusunun kaplama ile tamir işlemi.....	16
2.9. 12.7 mm çaptaki namlu içine girebilecek lazer sistemi.....	16
3.1. (a) Stellite 3 (ağırlıkça %2,4 C) alaşımının hiper-ötektik ve (b) Stellite 6B (ağırlıkça %1 C) alaşımının hipo-ötektik mikroyapıları.	20
3.2. Kaplama tabakasının oluşumunun şematik gösterimi ve kristalografik analizi.	23
3.3. Lazer kaplamalı Stellite 6 (a) ve Stellite 21 (b)'in parlatılmış ve dağlanmış kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri.....	24
3.4. Stellite alaşımlarının erozyon test eğrileri (Heathcock vd., 1981).	27
3.5. Yük Tarayıcısının Taslağı.	28

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

3.6. (a) Deformasyon analiz tekniğinin prensibi, testten önce ve sonra işaretleyicinin şematik kesitlerini göstermektedir. İşaretleyicinin geometrik değişimi, yüzey deformasyonunun türünü ve kapsamını ortaya koymaktadır, (b) Bir çevrim sırasında 1200 N'luk normal yüke maruz kalan Stellite 6 yüzeyinin kesiti (ok, karşı yüzeyin kayma yönünü göstermektedir).	29
3.7. Mo ilaveli Stellite 21 alaşımının SEM mikro yapısı: (a) 500X ve (b) 6000X.....	30
3.8. (a) Stellite 728 ve (b) Stellite 720 alaşımlarının SEM görüntüleri.....	31
3.9. (a) Stellite 728 ve (b) Stellite 720'nin aşınmış yüzeyindeki çatlamış sert fazlar.....	32
3.10. (a) Stellite 6 ve (b) Mo ilaveli Stellite 6 alaşımlarının LSM sonrası mikroyapı görüntüleri.....	35
3.11. Farklı Ta miktarlarına sahip Stellite 6 kaplamalarının yüzeye yakın ve arayüze yakın bölgelerdeki sertlik değişimleri.	37
3.12. VN alaşımlamanın Co esaslı kaplamanın (a) Sertliğine ve (b) aşınma kaybına olan etkisi.	38
4.1. Test numunelerinin hazırlanmasında kullanılan Laserline marka LDF400-100 model lazer sistemi.....	41
4.2. (a) Hazırlanan numuneler üzerindeki kaplama katmanlarını ve yönünü gösterir şema ve (b) kaplama için lazere beslenen karıştırılmış toz.....	42
4.3. (a) Lazer kaplama sonrası katmanlı yüzey ve (b) satıh taşlama sonrası temizlenmiş yüzey görüntüleri ile hazırlanan numuneler.....	43
4.4. Aşındırıcı bilya üzerindeki aşınma kaybının şematik gösterimi.	45
5.1. Stellite 21 kaplama alaşımına ait SEM görüntüleri.	49
5.2. %3 Mo ilaveli Stellite 21 kaplama alaşımının SEM görüntüleri.....	49
5.3. %6 Mo ilaveli Stellite 21 kaplama alaşımının SEM görüntüleri.....	50
5.4. %9 Mo ilaveli Stellite 21 kaplama alaşımının SEM görüntüleri.....	50
5.5. Stellite 21 kaplama alaşımının SEM görüntüsü ve fazlara ait EDS analiz Spektrumları.....	51

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

5.6. %3 Mo ilaveli Stellite 21 kaplama alaşımının SEM görüntüsü ve fazlara ait EDS analiz Spektrumları.	51
5.7. %6 Mo ilaveli Stellite 21 kaplama alaşımının SEM görüntüsü ve fazlara ait EDS analiz Spektrumları.	52
5.8. %9 Mo ilaveli Stellite 21 kaplama alaşımının SEM görüntüsü ve fazlara ait EDS analiz Spektrumları.	52
5.9. Stellite 21 ve ağırlıkça %3, 6 ve 9 Mo içerikli alaşımlara ait XRD diyagramları.	53
5.10. Mo ilaveli Stellite 21 alaşımlarının 6000X SEM görüntüleri; çözelti matrisine gömülü laminer yapıdaki küçük Co ₃ Mo intermetalik bileşikler (beyaz) ve Cr ₂₃ C ₆ karbürleri (gri) (Liu vd., 2015 a).	54
5.11. Stellite 21 ve Mo'li alaşımlarının sertlik ölçüm sonuçları.	55
5.12. Alaşımların aşınma testleri sonrasında (a) hacim kaybı tespiti için dijital olarak taranan aşınma izi ve kesit profillerinin çıkarıldığı dört konum, (b) aşınma izinin derinlik ve genişlik ölçümleri ile (c) hesaplanan kesit alanı.	56
5.13. Stellite 21 ve Mo ilaveli alaşımlarının oda sıcaklığındaki aşınma testlerindeki hacim kayıpları (mm ³).	57
5.14. Stellite 21 alaşımının oda sıcaklığındaki aşınma testlerinden (a) 30x, (b) 100x ve (c) 500x büyütmedeki yüzey görüntüleri ile (c) 500x üzerinde işaretlenmiş alanlardan alınan EDS analizleri.	58
5.15. Stellite 21'in %3 Mo ilaveli alaşımının oda sıcaklığındaki aşınma testlerinden (a) 30x, (b) 100x ve (c) 500x büyütmedeki yüzey görüntüleri ile (c) 500x üzerinde işaretlenmiş alanlardan alınan EDS analizleri.	59
5.16. Stellite 21'in %6 Mo ilaveli alaşımının oda sıcaklığındaki aşınma testlerinden (a) 30x, (b) 100x ve (c) 500x büyütmedeki yüzey görüntüleri ile (c) 500x üzerinde işaretlenmiş alanlardan alınan EDS analizleri.	60
5.17. Stellite 21'in %9 Mo ilaveli alaşımının oda sıcaklığındaki aşınma testlerinden (a) 30x, (b) 100x ve (c) 500x büyütmedeki yüzey görüntüleri ile (c) 500x üzerinde işaretlenmiş alanlardan alınan EDS analizleri.	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

5.18. Stellite 21 ve Mo ilaveli alaşımlarının 500 °C sıcaklığındaki aşınma testlerindeki hacim kayıpları (mm ³).	62
5.19. Stellite 21 alaşımının 500 °C'deki aşınma testlerinden (a) 30x, (b) 100x ve (c) 500x büyütmedeki yüzey görüntüleri ile (c) 500x üzerinde işaretlenmiş alanlardan alınan EDS analizleri.....	63
5.20. Stellite 21'in %3Mo alaşımının 500 °C'deki aşınma testlerinden (a) 30x, (b) 100x ve (c) 500x büyütmedeki yüzey görüntüleri ile (c) 500x üzerinde işaretlenmiş alanlardan alınan EDS analizleri.....	64
5.21. Stellite 21'in %6Mo alaşımının 500 °C'deki aşınma testlerinden (a) 30x, (b) 100x ve (c) 500x büyütmedeki yüzey görüntüleri ile (c) 500x üzerinde işaretlenmiş alanlardan alınan EDS analizleri.....	65
5.22. Stellite 21'in %9Mo alaşımının 500 °C'deki aşınma testlerinden (a) 30x, (b) 100x ve (c) 500x büyütmedeki yüzey görüntüleri ile (c) 500x üzerinde işaretlenmiş alanlardan alınan EDS analizleri.....	66
5.23. Oda sıcaklığı ve 500 °C sıcaklıktaki aşınma testlerinde kullanılan bilyaların aşınmış yüzey görüntüleri.	67
5.24. 500 °C sıcaklıktaki aşınma testlerinde kullanılan bilyaların hesaplanan hacim kayıpları.....	68
5.25. Stellite 21 numunesinin 500°C, 800°C ve 1000°C'de izotermal oksidasyonu; (a) Zamana göre ağırlık değişimi, (b) Arrhenius eğrisi	69
5.26. %3Mo ilaveli Stellite 21 numunesinin 500°C, 800°C ve 1000°C'de izotermal oksidasyonu. (a) Zamana göre ağırlık değişimi, (b) Arrhenius eğrisi.....	69
5.27. 1000 °C' de 24 saat oksitlenme sonrası alaşımların ağırlık artışları.	70
5.28. 1000 °C' de 24 saat oksitleme sonrası (a) Stellite 21, (b) Stellite21 %3Mo ilaveli, (c) Stellite21 %6Mo ilaveli ve (d) Stellite21 %9Mo ilaveli numunelerinin oksitlenen yüzeylerinin büyük büyütme ile SEM görüntüleri.	71

ÇİZELGELER DİZİNİ

Cizelge

Sayfa

3.1. Çeşitli kobalt esaslı Stellite alaşımlarının nominal kimyasal bileşimleri.	19
3.2. Stellite 6 ve 21'in mekanik ve fiziksel özellikleri.	22
3.3. VN alaşım tozlarının kimyasal bileşimi (ağırlıkça %).	37
3.4. Co esaslı alaşım tozlarının kimyasal bileşimi (ağırlıkça %).	37
4.1. Test numunelerinin hazırlanmasında kullanılan lazer parametreleri.	41
4.2. Lazer Kaplama uygulaması için kullanılan 32CrMoV12-10 çeliğin kimyasal bileşimi (ağırlıkça %).	42
4.3. Lazer Kaplama uygulaması için kullanılan Stellite 21 (2528-00) tozun kimyasal bileşimi (ağırlıkça %).	42
5.1. Kaplama ile kaplanmış numunelerin taşlama sonrası XRF analizleri.	48
5.2. Stellite 21 ve ağırlıkça %3, 6 ve 9 Mo içerikli alaşımlara ait (ağırlıkça %) faz oranları.	53
5.3. Oda sıcaklığında yapılan aşınma testlerinin aşınma izi profilleri.	57
5.4. 500 °C sıcaklığında yapılan aşınma testlerinin aşınma izi profilleri.	62
5.5. %3 Mo ilaveli Stellite alaşımlarının farklı sıcaklıklardaki oksitlenme hız sabitleri (K)..	70

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

mm	Milimetre
μm	Mikrometre
MW/m ²	Mega Watt/ Metrekare
MPa	Mega Paskal
Δm	Ağırlık Değişimi
m(t2)	Elde edilen ağırlık
m(t1)	İlk ağırlık

Kisaltmalar

Açıklama

HIP	Sıcak İzostatik Presleme
HSP	Hekzagonal Sıkı Paket
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
KOEB	Kimyasal Olarak Etkilenen Bölge
LSM	Lazer Yüzey Ergitme
PTA	Plazma Transfer Ark
TMF	Termo Mekanik Yorulma
YMK	Yüzey Merkezli Kübik

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Ateşli silahlar bin yıldan uzun süredir en önde gelen savaş aracı olmuştur. Barutun kullanımına elverişli ilk ateşli silahlar olarak bilinen topların Çin’de 10. yüzyılda kullanılmasıyla başlayan bu savaş tarzı, yüzyıllar içerisinde gelişerek yaygınlaşmıştır. Yıkılmaz denilen surların ateşli silahların kullanılması ile taş yığınlarına dönüşmesi birçok tarihçi tarafından Askeri Devrim olarak nitelendirilmiştir. Bu aşamadan sonra savaşların gidişatındaki en önemli faktörlerden biri, hangi tarafın daha uzağa ve daha isabetli şekilde atış yapabileceği olurken, orduların savunma stratejileri bu temel üzerine planlanmaya başlanmıştır. Etkili ve isabetli atışın temeli olan ateşli silah unsuru namlunun, kullanım ömrünün geliştirilmesi ve performansının artırılması ise hegemonik gücü elinde tutmaya çalışan ülkelerin savunma sanayisinin temel gelişim alanı olmuştur.

Savunma sanayinde gelişen teknoloji ile insansız hava araçları, yüksek teknolojiye seyrir füzeleri gibi birçok atılım yapılmış olsa da nükleer gücü elde edememiş ülkeler için kara, hava ve deniz savunmasında tam anlamıyla güvenliğin sağlanması halen ateşli silah ve askeri güç gerektirmektedir. Orta kalibreli ve ağır silah sistemleri ise; bütün hava, deniz ve kara araçlarını kapsayan savunma sanayinin en önemli tehdit ve savunma aracı olarak bilinmektedir. Bu silah sistemlerinin en kritik parçası olan namlu, 32CrMoV12-10 kalite namlu çeliğinden imal edilmektedir. Ancak namlu çeliği, silahın ateşlenmesi sırasında maruz kalınan yüksek basınç, sıcaklık, itici yakıt olan yanma gazları, mermi ile namlu iç yüzeyi arasındaki sürtünme gibi sebeplerden özellikle atım yatağı adı verilen bölgede zamanla artan yoğun bir aşınmaya maruz kalmaktadır (Zimmer ve Haukland, 1971). Namlularda görülen aşınmalar; silah sistemleri için performansı düşüren ve masrafları artıran önemli bir olaydır. Aşınma etkisiyle çapı artmaya başlayan namlular; mermi ile namlu arasından atış sırasında itki gazının kaçması sebebi ile mermi çıkış hızının, mermi menzilinin ve hassasiyetinin düşmesine yani merminin doğrusal stabilitesinin bozulmasına neden olmaktadır. Artan aşınma hasarı etkisi ile isabetli atış performansı düşen namlular, çaptaki değişim %5 seviyesine çıktığında hurdaya ayrılmaktadır.

Namlu, üretim yöntemleri itibari ile savunma sektöründe en kritik ve pahalı ürün olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle aşınma kaynaklı namlu değişimleri, silah sistemlerinde maliyeti en çok artıran unsur olarak değerlendirilmekte ve savunma sanayisini namlu ömrünü artıracak alternatif uygulama arayışına itmektedir. Yaygın olarak kullanılan sert krom kaplama yönteminin ise hem uygulama sorunları hem de ağır silah sistemlerinde büyüyen mühimmat kalibresi ile artan itici gazların sıcaklığı ve patlama basıncı karşısında yetersiz kaldığı görülmektedir. Öyle ki; 7,62 mm ve 12.7 mm uçaksavar gibi ağır silah sistemlerinin namlularında, tekrar eden yoğun ısı ve sürtünmeye maruz kalan atım yatağına gömlek adı verilen Kobalt esaslı, patentli Stellite 21 süper alaşımından üretilen ayrı bir parça sıkı geçme olarak takılmaktadır. Bu uygulamanın namlu ömrü açısından daha verimli olduğu test edilmiştir, ancak uygulamanın bazı dezavantajları namlu üretim sürecini daha da zorlaştırmaktadır. Kullanılan malzemenin sıkı geçme ayrı bir parça olmak yerine, atım yatağına doğrudan kaplanmasının namlunun servis koşullarındaki performansını ve namlu kullanım ömrünü artırmak için ihtiyaç duyulan gelişimi sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Literatürde uygulama örneği bulunmasa da gelişen teknolojinin katkıları ile aşınmaya, korozyon ve ısıya dayanıklı Stellite gibi farklı malzemelerin lazer kaplama (cladding) yöntemi ile namlu içine kaplanabileceği öngörülmektedir. Esnek üretim şekli, yatırım ve işletme maliyetlerinin düşük oluşu sebebi ile üretim yöntemleri içerisinde ciddi bir yönelimin olduğu eklemeli imalat uygulama tiplerinden olan lazer kaplama yöntemi, namlu içi kaplamadaki uygulama sorunlarının çözümünde oldukça umut vadetmektedir.

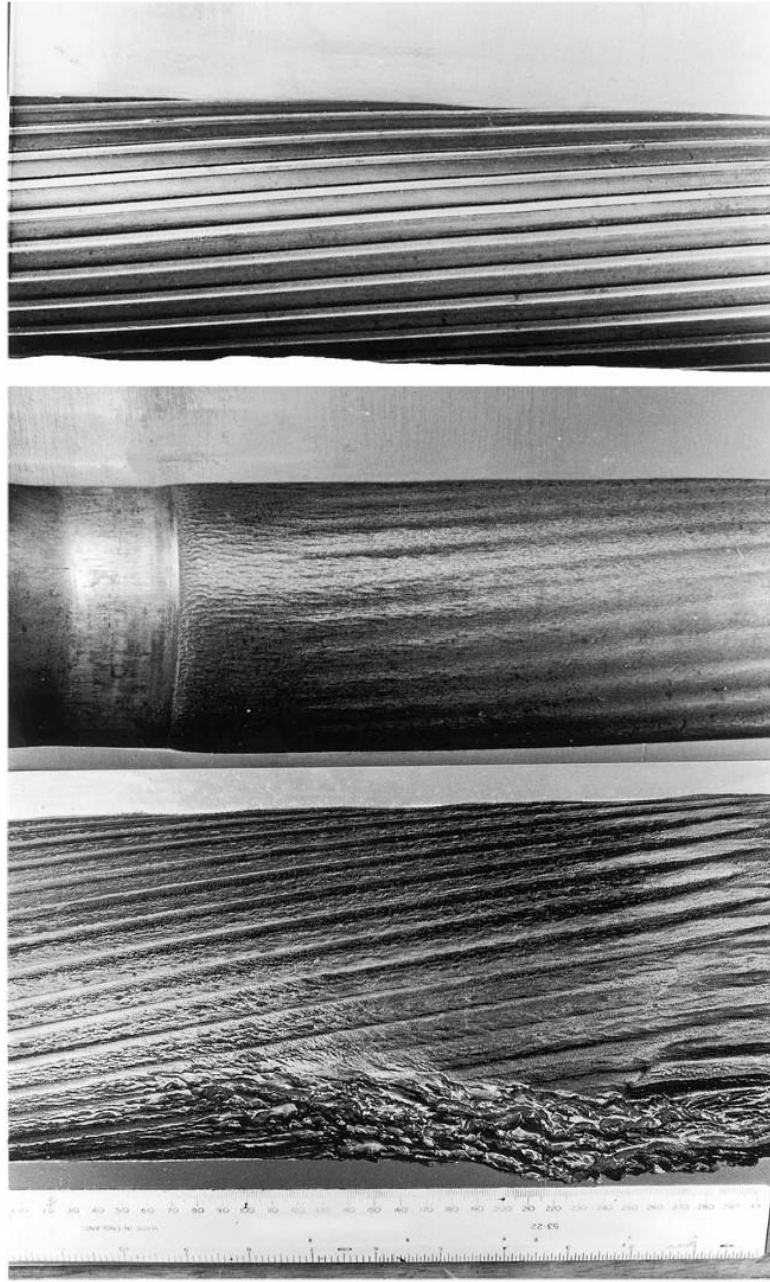
Farklı alaşımların lazer kaplama yöntemi ile kaplanarak aşınma ve korozyon davranışlarının incelenmesini konu alan bu çalışma altı bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın ilk bölümü genel bir giriş mahiyetinde olup, ikinci bölümde namlu içi kaplamada lazer kaplama yönteminin değerlendirilmesindeki kuramsal temellere yer verilmiştir. Üçüncü bölüm literatürde bulunan, Stellite alaşımlarının aşınma ve korozyon davranışlarını konu edinen çalışmaların özetinden oluşmaktadır. Dördüncü bölümde tasarım ve deneysel çalışma detayları ve beşinci bölümde de ilgili çalışmalar sonucunda elde edilen bulgulara yer verilmiştir. Altıncı bölümde tez çalışması sonucunda elde edilen sonuçlar maddelenmiştir. Tezin son bölümünde ise içerikte yararlanılan kaynaklara yer verilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Namlu Aşınma Mekanizmaları

Ağır silah sistemlerinin de diğer mekanik ekipmanlar gibi, hizmet dışı bırakılmadan önce kullanılabileceği belirli bir ömrü bulunmaktadır. Silah namlularındaki aşınma ve erozyon tanımlaması ilk olarak 1886 yılında yapılmıştır (Abel, 1886). Bu tanımlamadan bugüne gelişen araştırmalarla; silah namlularının aşınması ve erozyonunun temel sebepleri; termal, kimyasal ve mekanik faktörler olarak üç başlık altında toplanmaktadır. Bu faktörlerin silah sistemlerindeki etkisi değişkenlik göstermektedir, ancak genellikle termal ve kimyasal faktörlerin belirleyici olduğu değerlendirilmektedir (Ahmad, 1988; Bracuti, 1988).

Bir silah ateşlendiğinde namlu içi sıcaklık anlık olarak artarken, basınç da aynı sürede maksimum değerine ulaşmaktadır. Yiv set başlangıcı yakınındaki atım yatağı olarak ifade edilen bölge; sıcak itici gazdan namlu yüzeyine ısı transferinin en fazla olduğu nokta olması sebebi ile maksimum aşınma noktası olarak değerlendirilir (Hasenbein, 2004). Tipik olarak, namlu sıcaklığı, sıcak itici gazlara maruz kaldıktan birkaç milisaniye sonra atım yatağında 600-1200 °C'ye ulaşabilmektedir. Yüzeydeki ısı transferi, kaplama cinsine de bağlı olmakla birlikte, 500 MW/m²'ye kadar çıkabilmekte ve itici gaz basıncı 600 MPa'ya ulaşabilmektedir. Bu yüksek sıcaklık gradyanı, yüksek termal basınç gerilmelerine sebep olurken aynı zamanda yüzeyin sertliğini de etkilemektedir. İtici gazların kinetik enerjisine, termal gerilmelere ve yüzey sertliğine bağlı olarak her atımda namluda 0.1µm ve 200 µm arasında aşınma olabilmektedir (Lawton, 2001; Perkovic'ten (2020)). Ayrıca ateşleme sonrası gerçekleşen yüksek hızlı ısı transferi namlu yüzeyinde lokal erimelerin oluşmasına neden olmaktadır. Yüksek basınçlı itici gazların etkisi ile taşınan bu ergimiş malzemeler namlu içinde erozyon aşınmasının görülmesine neden olmaktadır (Zimmer ve Haukland, 1971). Bu nedenle namlu içindeki aşınmalar her zaman atım yatağında yaşanan yoğun termal koşullarla ilişkilendirilmektedir. Şekil 2.1'de üstte atış yapmamış bir namlunun yiv seti, ortada aynı namlunun seri şekilde çoklu atış sonrası yiv-set derinliğinin kaybolmaya başlamasına neden olan aşınmış hali ve altta barut gazları ile tepkimeye girmesi nedeniyle namlunun lokal olarak erimesi sonucu erozyonu görünmektedir (Lawton, 2001).



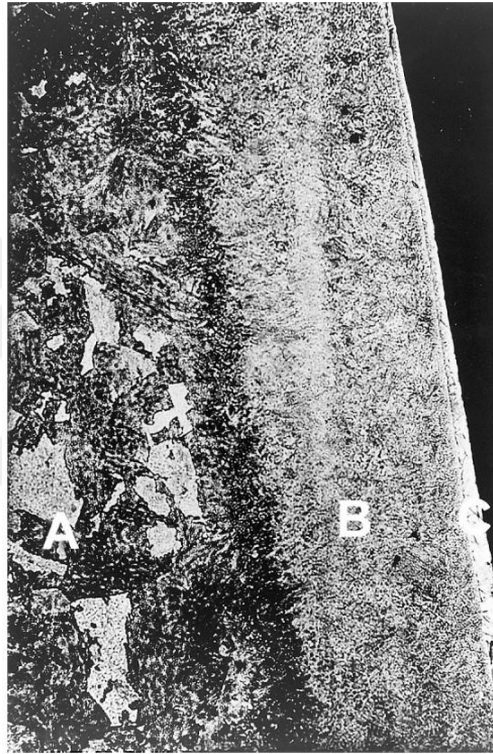
Şekil 2.1. Namluda hasarlanmaya ilişkin; üstte hasarsız, ortada normal aşınmış ve altta lokal erime ve erozyon içeren aşırı aşınmış yiv set görünümü (Lawton, 2001).

Silah sistemlerindeki en önemli aşınma mekanizmalarından biri de erozyondur. Silah namlularında meydana gelen erozyon, oluşum nedenlerine göre kimyasal, termal veya mekanik olarak kategorize edilmektedir. Erozyon aşınma mekanizmaları birbirleriyle yakından ilişkilidir ve silah namlusunun içinde eş zamanlı olarak gerçekleşmektedir.

Kimyasal erozyon; mühimmatın ateşlenmesi ile açığa çıkan itici gazın neden olduğu aşınma şeklidir. Silah sistemlerinde karbondioksit (CO_2), hidrojen (H_2), su buharı (H_2O), karbon monoksit (CO) ve nitrojen (N_2) gibi farklı gaz türleri üreten farklı mühimmatların kullanılması, namlu yüzeyindeki kimyasal erozyonun farklı şekillerde oluşmasına neden olmaktadır. Ancak temel prensip olarak, ateşleme sonrasında açığa çıkan gazların namlu malzemesine radyal yönde termal difüzyonu ile namlu malzemesinin kafesine bir atomun yerleşmesi ve kafes yapısının değişmesine dayanmaktadır. Kafes yapısındaki bu değişimler ise namlu malzemesinin fiziksel ve termal özelliklerini etkilemektedir. Kimyasal erozyondan etkilenen bu bölge 10 μm derinliğinde olabilmekte ve genellikle kimyasal olarak etkilenen bölge (chemically affected zone, KOEB), olarak adlandırılmaktadır. Silah namlularında en yaygın kimyasal erozyon prosesleri oksidasyon, karbürizasyon ve hidrojen gevrekleşmesidir. Erozyon genellikle kimyasal proses sonrasında yapısal değişikliğe uğrayan KOEB'in termal veya mekanik etki ile hasarlanması sonucu gerçekleşir (Chaudhari, 2016).

Termal erozyon, termal döngüyle ilişkili genleşme ve daralmalar nedeniyle oluşan faz değişimlerini, ergimeyi ve çatlamayı içermektedir. Yanma sonrası itici gazın açığa çıkardığı yüksek ısı 20-30 ms gibi kısa bir aralıkta tüm namlu yüzeyine yayılmaktadır. Yayılım devam ettikçe gazların sıcaklığı da eş zamanlı olarak azalmaktadır. Bu nedenle termal erozyon açısından namlunun en zayıf olduğu kısım, patlamanın olduğu ve namlu yivlerin başlangıç noktası olan atım yatağıdır. Atım çevrimleri boyunca, silah namlusundaki malzeme sıcaklık döngüleri ile ilişkili olarak faz değişimleri yaşanmakta ve fazların farklı hacimlerinin oluşturduğu hacim gerilimleri, soğuma sırasında çatlaklarının oluşumuna neden olmaktadır. Termal olarak değiştirilmiş bu tabaka ısı tesiri altındaki bölge (heat effected zone, ITAB), olarak adlandırılır ve tipik olarak 100 μm 'dir. Erozyon kimyasal prosese benzer şekilde yapısal değişikliğe uğrayan ITAB'ın kimyasal veya mekanik etki ile hasarlanması sonucu gerçekleşir (Johnston, 2005; Chaudhari, 2016). Namlunun her atım çevrimi sonrasında büyük bir sıcaklık dalgalanmasına maruz kalan ve eş zamanlı olarak oluşan ITAB ve KOEB bölgeleri Şekil 2.2'de belirgin olarak görülmektedir (Lawton, 2001). A olarak işaretlenmiş katman namlu malzemesinin orijinal yapısıdır. B olarak işaretlenmiş katman yüzeyden yaklaşık 200 μm uzanan ITAB'dır. Bu bölgede, ateşleme çevrimi sırasında büyük bir sıcaklık dalgalanmasına maruz kalmaktadır. Sıcaklık dalgalanması yüzeyde

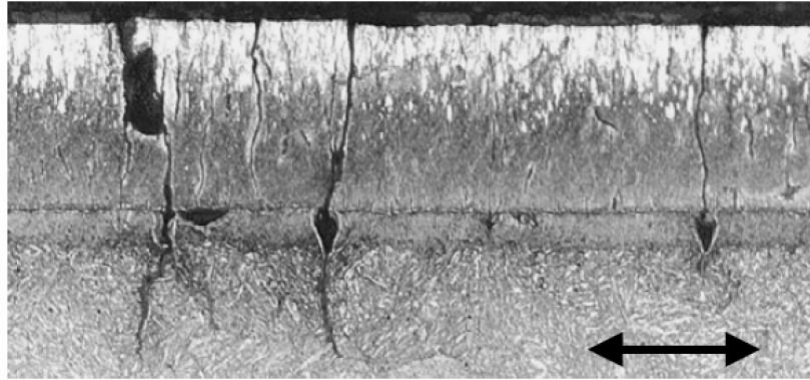
1000 °C olabilirken, yüzeyden 1 mm uzaklıkta yalnızca 100 °C civarındadır ve dalgalanma periyodu 5-50 ms olabilmektedir. ITAB mikro yapısı yüzeye doğru değişmekte, çeliği daha sert ve daha kırılğan hale getirmektedir. C olarak işaretlenmiş katman ise KOEB'dir. Yüksek sıcaklıklarda, itici gazdaki kimyasal türler kristal kafese yayılarak kimyasal bileşimini değiştirmiştir. Bu kısım, itici yanmasının ana ürünlerini (CO , CO_2 , H_2 , H_2O ve N_2) ve az miktarda ayrılmış atom türlerini içerir.



Şekil 2.2. 10 atım sonrasında namlu yüzeyinin mikroyapısı; A) namlu malzemesi, B) ITAB ve C) KOEB (Lawton, 2001).

Mekanik erozyon, öncelikle gaz ve katı partikül akışının namlu yüzeyine doğrudan çarpmasıyla oluşmaktadır. Diğer bir deyişle, içinde katı parçacıklar bulunan itici gaz akışının aşındırma eylemlerini içermektedir. İç balistik akış alanı ile yüzeyde kimyasal ya da termal erozyon sebebi ile oluşan çatlaklar arasındaki etkileşim de mekanik erozyonu etkileyen önemli bir faktördür (Chaudhari, 2016).

Silah namlusunun ömrünü etkileyen bir diğer önemli faktör de yorulmadır. Isıl dalgalanmanın bir sonucu olarak, namlunun ısınması sırasında termal basma gerilimleri ve namlunun soğuması sırasında çekme gerilimleri oluşmaktadır. Dahası, gaz akışından kaynaklanan ek kayma gerilimleri ve zorlanarak kayan mermiden kaynaklanan temas gerilimleri de toplam gerilim ortamına eklenmektedir. Bu etmenlerden dolayı, termo-mekanik yorulma (thermo-mechanical fatigue, TMF), meydana gelmektedir (Perkovic, 2020). Ağır silah sistemlerinde yüzlerce hatta binlerce mermi ateşlenebilmekte ve böylelikle termo-mekanik gerilimler oluşabilmektedir. Tekrarlanan yükleme döngüleri ise genişleyen ve derinleşen yorulma çatlaklarını oluşturmaktadır. Mikro çatlaklar olarak da ifade edilebilen yorulma çatlakları, zaman içerisinde yapılan çok sayıdaki ateşleme ile namlunun bozulmasına neden olabilmektedir (Chen vd., 2018). Genel olarak, aşınma ilk atışından itibaren meydana gelmekte ve ardından yorulma gelişmektedir. Bu nedenle bu iki olgunun silah namlularının ömrü üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu düşünülmektedir. Şekil 2.3'te 120 mm krom kaplı tank namlusunun fişek yatağından 600 mm uzağından alınan kesit görüntüsünde, 118 atış sonrası oluşan termal çatlaklar ve kaplama altında oluşan çatlak başlangıçları gözükmemektedir (Perkovic 2018).



Şekil 2.3. 120 mm krom kaplı tank namlusunun kesitinde 118 atış sonrasında görülen termal çatlaklar ve kaplama altında oluşan çatlak başlangıçları.

Bir silah ateşlendiğinde, silah namlusunun hasarı genellikle aşınma veya aşınma ve erozyonun birlikte çalışması ya da yorgunluktan kaynaklanmaktadır. Dikkat edilmesi ve hesaba katılması gereken ve namlu kullanım ömrünü sonlandırabilecek bu hasarlanmaların ayrı kökenleri ve nedenleri olduğudur. Basitçe ağır silah sistemleri namlularındaki aşınma,

yanma gazlarının neden olduğu erozyon aşınmaları veya namlu yüzeyiyle temas halinde dönen mermi yüzeyinin neden olduğu kayma aşınması yoluyla meydana gelmektedir.

2.2. Mevcut Koruyucu Kaplama Uygulamaları

Silah sistemleri kendi içerisinde hafif, orta ve ağır silah sistemleri olarak gruplandırılmaktadır. Hafif silahlarda namlu içerisinde aşınmanın en yoğun olduğu ve atış sırasında patlamanın gerçekleştiği atım yatağı, namlunun içine elektroliz ile kaplanan sert krom kaplama ile korunur. Hafif silah sistemlerinde namlunun performans göstermesi için yeterli olan sert krom kaplama, orta ve ağır silah sistemlerinde büyüyen kalibre ile artan itici gazların sıcaklığı, patlama basıncı ve merminin namlu içindeki momentumu karşısında yetersiz kalmaktadır. Dolayısı ile hafif silahlara göre çok daha yüksek seviyede olan aşınma ve erozyonu geciktirmek için, orta ve ağır silah sistemlerinde namlu içerisindeki atım yatağına Kobalt esaslı süper alaşımdan imal edilen ve gömlek adı verilen harici bir parça sıkı geçme olarak yerleştirilmektedir.

2.2.1. Krom kaplama

Sert krom kaplama endüstriyel ve askeri parçaların aşınma ve korozyon direncini iyileştirmek için kullanılan oldukça yaygın bir teknolojidir. Kaplamanın kalınlığı hangi uygulamada kullanılacağına göre değişiklik gösterse de genelde 20-500 µm aralığındadır. Endüstriyel uygulamada krom kaplama; Cr^{+6} iyonlarını içeren solüsyonlar içinde gerçekleştirilen bir elektrolitik metal biriktirme işlemidir ve kaplanan krom, oksit, hidroksit ve hidrit kalıntıları içeren oldukça iyi bir yapıya sahiptir. Bu yapı aynı zamanda yüksek derecede iç gerilime, 1200 HV gibi yüksek sertliğe ve kaplama boyunca görülen bir çatlak ağına sahiptir (Sohi, 2003).

Günümüzde silah sistemlerinde yaygın olarak sert krom kaplanmış namlular kullanılmaktadır. Ancak elektrolitik olarak namlu içine kaplanan sert krom, bir dizi teknolojik problemi de beraberinde getirmektedir. Bu problemler, üretim teknolojileri

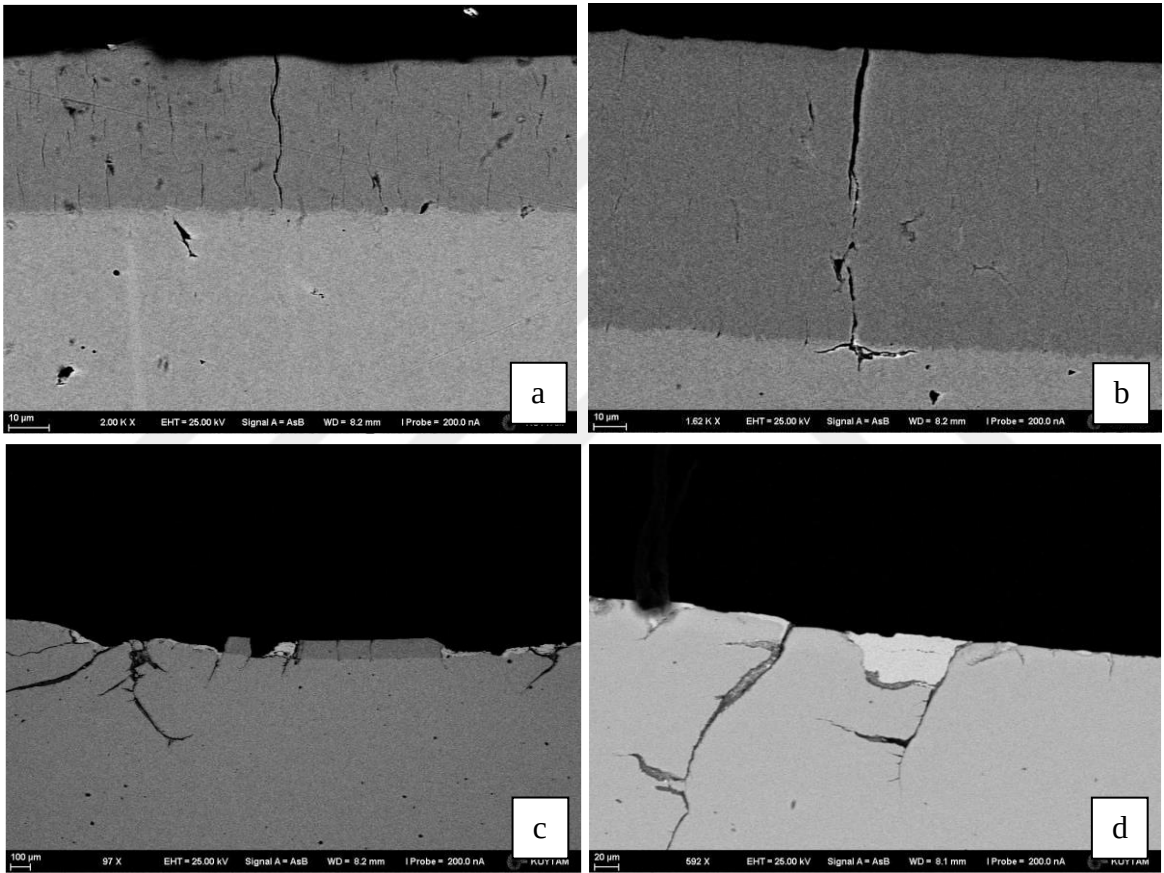
yönünden ve namlu performansına etkisi yönünden irdelenebilir. Üretim teknolojileri yönünden bakıldığında; krom kaplama için kullanılan solüsyonlar kanserojen özelliğe sahip Cr^{+6} iyonlarını içermektedir. İnsan sağlığına olan zararları nedeni ile Avrupa Birliği yönetmeliklerine göre Cr^{+6} iyonlarını içeren kaplama solüsyonlarının kullanımı yasaklanmıştır.

Diğer taraftan namlu içi kaplamasında kullanılan sert krom özellikle termal gerilimlere karşı dayanıksızdır (Undewood, 2006). Yapısındaki çatlak ağı sebebi ile ateşleme sonrasında yanma gazları krom kaplama boyunca yayılarak namlu çeliğine ulaşmakta ve çeliğe ulaşan yanma gazları krom tabakasının altında oksitlerin ve karbürlerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu oksitlerin ve karbürlerin varlığı namlu çeliğinin yüzeyinin gevrekleşmesine neden olmakta ve mermiyle beraber krom kaplama ve çelik malzemenin de ayrılarak namlu dışına atılmasına neden olmaktadır. Yüzeyden ayrılan ya da dökülen krom kaplama nedeni ile fazla korumasız olan çelik tabaka ortaya çıkmakta ve bu tabakanın zayıflığı nedeni ile aşınma hızı sürekli artmaktadır. Nihayetinde namlunun performansı düşmekte ve namlu kullanılamaz hale gelmektedir. Ayrıca yapılan incelemelerde sert krom kaplama içerisinde yoğun miktarda hidrojen çatlakları olduğu ve bu çatlakların atışlar sırasında birleşerek, sert krom kaplamanın kopmasına ve yer yer dökülmesine sebep olduğu gözlemlenmiştir (Audino, 2006).

Ağır silah sistemlerinde kullanılan sert krom kaplamanın değerlendirilmesi için, atış performansındaki düşüş nedeni ile hurdaya ayrılmış 20 mm top namlusundan bir kesit alınarak çeşitli incelemeler yapılmıştır. Şekil 2.4'te verilen namlu kesitinde atım yatağındaki yoğun aşınma ve erozyon görülmektedir. Aşınma bölgesinden enine kesitler şeklinde alınan numuneler mikroskop altında incelendiğinde ise, krom kaplamanın hidrojen çatlakları içeren yapısı, atım yatağından yiv ve set başlangıç noktasına doğru ilerledikçe yoğun çatlak oluşumları, çatlak altı erozyonlar, kaplamanın dökülüp namlu çeliğinin dış etkenlere açık kaldığı boşluklar ve çatlak arasında ergimiş veya sıvanmış metal kalıntılarına rastlanmıştır (Bkz. Şekil 2.5). Ergimiş mermi kalıntısı bu bölgedeki sıcaklığın pirincin ergime sıcaklığının (900 – 950 °C) üzerinde olması gerektiğine işaret etmektedir.



Şekil 2.4. Krom kaplı 20 mm top namlusu kesiti ve hasarlanmış atım yatağı.¹



Şekil 2.5. 20 mm top namlusu kesiti üzerinden; (a) krom kaplamadaki çatlaklar, (b) çatlak altı erozyonlar, (c) yüzeyden kopan sert krom kaplama ve kromsuz kalan namlu çeliğinin deformasyonu, (d) çatlak arasında ergimiş veya sıvanmış metal kalıntıları.²

^{1, 2} Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’de verilen görseller tez çalışması paralelinde yürütülen namlu içi lazer kaplama kaplama cihazının geliştirilmesi projesi kapsamında hazırlanan firma raporundan, firma izni ile alınmıştır.

Krom kaplama aşınma direnci için bir çözüm olsa da kaplamanın doğası gereği oluşan hidrojen çatlakları, barut gazlarının namlu iç yüzeyine erişimini engelleyememektedir. Sonuç olarak namlular korozyona uğramakta, çatlak altı korozyon nedeniyle kaplamalar dökülmekte ve namlu kullanılamaz hale gelmektedir.

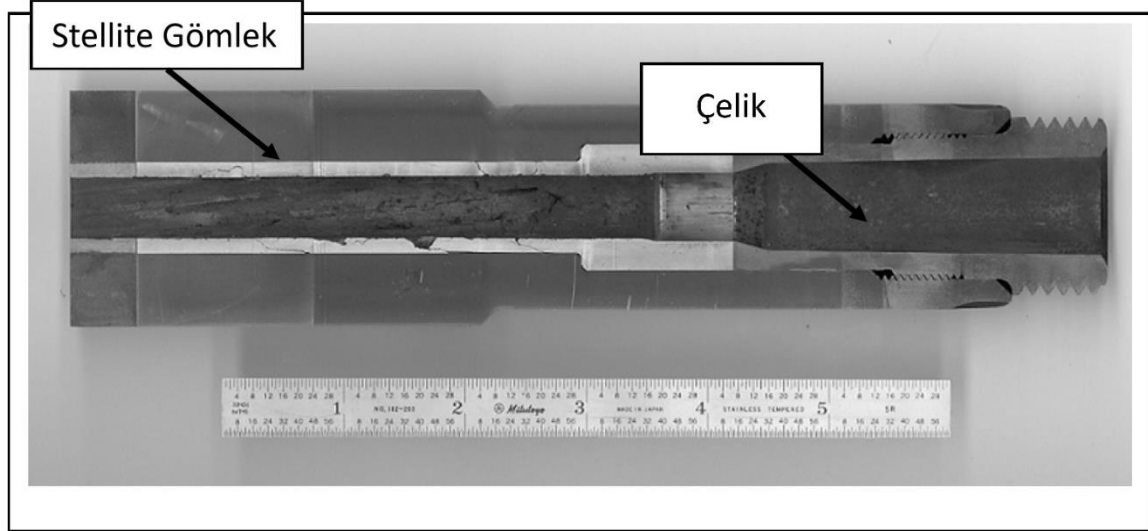
2.2.2. Kobalt esaslı gömlek uygulaması

1919 yılından beri üretilen makinalı tüfeklerin namlularında, tekrar eden yoğun ısı ve sürtünmeye maruz kalan atım yatağına gömlek adı verilen Kobalt esaslı, patentli Stellite 21 süper alaşımdan üretilen ayrı bir parçanın sıkı geçme olarak takıldığı görülmektedir. Bu parça krom kaplamanın aksine namlu yüzeyine kaplanmayıp, silindirik ek bir parça olarak uygulanmaktadır (Rosset ve Montgomery, 2010).

Patentli Stellite alaşımları yüksek sıcaklıklar altında, aşınma ve korozyon direncinin yüksek olması istenen uygulamalarda sıklıkla kullanılan Kobalt esaslı bir süper alaşımdır. Aslında bir marka ismi olan Stellite, yüksek aşınma direnci için tasarlanmış çeşitli kobalt – krom alaşımlarını ifade etmektedir. Ayrıca tungsten veya molibden ve küçük fakat önemli miktarda karbon içermektedir. Kobalt matrisinde çökelen karbür alaşımları sayesinde yüksek sertlik ve dayanıma sahip olan Stellite alaşımları için karbon içeriği ve dolayısıyla malzemedeki karbür hacim oranı çok önemlidir. Stellite alaşımlarının birçok özelliği kobaltın kristalografik yapısından, krom, tungsten ve molibdenin katı çözelti sertleştirme etkilerinden, metal karbürlerin oluşumundan ve kromun sağladığı korozyon direncinden kaynaklanmaktadır. İçyapılarında, çok miktarda karbür içerdikleri için sertlikleri yüksek, işlenebilirlikleri zordur (Davis, 2000).

Birçok ticari üreticinin namlu ömrünü en az iki kat artırdığını taahhüt ettikleri bu yöntemin, uygulama konusunda bazı dezavantajları bulunmaktadır. Sıkı geçme gömlek ile namlunun gövde, gömlek ve gömlek sabitleyici olmak üzere üç parça olarak üretilmesi, gömlek ve namlunun geri kalan kısmında yiv-setlerin eşlenme problemi ve gömleğin atış sırasında yerinde dönmesi ile yiv-setlerdeki eş eksenliliğin bozulması bunların başında

gelmektedir. Birçok ordu laboratuvarında yapılan araştırmalarda, gömleklerin namlu yüzeyine tutunma problemi incelenmiş, gömleğin sıkı geçme operasyonu için farklı teknikler denenmiştir. Ancak halen bu sorunlara kalıcı bir çözüm oluşturulamamıştır. Şekil 2.6'da Stellite gömlek uygulaması sonrasında ömür atışları yapılmış M2 tüfek namlusunun kesit görüntüsü verilmiştir (Rosset, Montgomery,2010). Ordu laboratuvarında yapılan bu çalışmada ömrünü tamamlamış namlu içindeki Stellite 21 gömleğin durumunun incelenmesi ve namlu ile arasındaki bağlanma kuvvetinin ölçülmesi hedeflenmiştir. İtici yakıt olan yanma gazlarının göleği, namlunun uç kısmına yakın olan tarafında, namlu yüzeyinden ayırdığı görülmüştür. Ayrıca Stellite gömleğin yüzeyinde yoğun aşınma izleri ve çatlaklar görülmüştür. Makineli tüfek mermisindeki kuvvetlerin basit bir analizi kullanılarak, yaklaşık 750 Psi olarak ölçülen bağ mukavemetinin mermi döndürüldüğünde oluşan tepki kuvvetlerine direnmek için yeterli olacağı değerlendirilmiştir. Bu seviyedeki bir bağ kuvvetine ise ancak sıkı geçme işlemi ile ulaşılabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 2.6. Ömrünü tamamlamış M2 tüfeklerinden çıkarılan Stellite 21 gömlekli, 3 parçalı namlu kesiti.

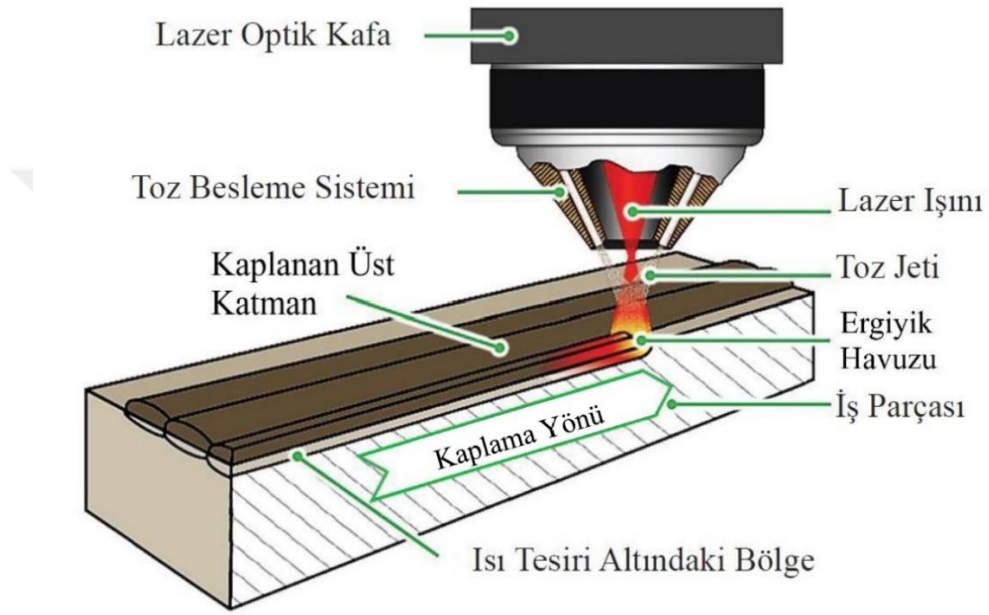
2.3. Lazer Kaplama (Cladding) Uygulaması

Mevcutta kullanılan krom kaplama ve Stellite gömlek uygulama yöntemlerinin endüstriyel üretim için dezavantajları ve aşınma dayanımı açısından gelişime ihtiyaç duyulan yönlerinin olduğu değerlendirilmektedir. Genel olarak yapılan değerlendirmelerde özellikle orta ve büyük kalibre silah sistemleri için aşırı aşınma koşullarının hüküm sürdüğü bölgelerde krom kaplama yerine Stellite gibi yüksek dayanımlı malzemeler kullanıldığında namlu kullanım ömründe iyileşmeler olduğu görülmüştür. Ancak kullanılan Stellite gömleğin sıkı geçme ayrı bir parça olarak uygulandığı üç parçalı namlu üretim yönteminin uygulama zorlukları, zaten maliyetli ve zor olan namlu üretim şartlarını daha da güçleştirmektedir. Atım yatağında Stellite gibi yüksek sıcaklıklarda aşınma ve korozyona dayanıklı malzemenin bulunduğu yekpare namlunun üretilmesi ile namlunun üretim kaynaklı hatalarının önüne geçileceği ve performansının artıracığı değerlendirilmektedir.

Namlu içi kaplama için ön görülen, sert krom dışında metalik/seramik malzemeyi elektro kimyasal olarak biriktirme mümkün değildir. Bu nedenle namlu içi kaplamada; esnek, yatırım masrafların ve işletme maliyetlerinin düşük oluşu sebebi ile lazer kaplama yönteminin daha olumlu sonuçlar vereceği değerlendirilmektedir. Lazer kaplama yöntemi; bir malzeme üzerine, lazer ile ergitilmiş toz püskürtülerek yapılan dolgu işlemidir. İşlemden lazer tarafından bir ergime havuzu oluşturulur. Ana materyal ve püskürtülen toz, bu havuzda eriyik halde birbiri içinde karışır. İşlem sonucunda; ana malzeme, kompozit yapı ve giydirme yüzeyi olmak üzere üç katmanlı bir yapı oluşmaktadır (Toyserkani vd., 2005). Şekil 2.7’de kaplama yöntemini gösteren şematik bir görünüm verilmiştir.

Lazer kaplama, dolgu tabakanın ana malzemeye tutunma gücü açısından var olan en sağlam kaplama türüdür. Toz metalürjisi ile robot kontrollü homojen bir kaplama işlemi yapıldığı için kaynakta görülen pitting (boşluk), kaynak kökü, iç yapı kusurları gibi kusurlar kaplama işleminde görülmemektedir. İşlemden kullanılan lazer, geleneksel ısı kaynaklarına kıyasla, daha net geometrili odaklama ve yüksek konsantrasyonlu optik enerji sayesinde ana malzemeye çok daha yoğun seviyelerde yüksek hızlı ısı aktarımı sağlamaktadır. Lazer enerjisi boyutsal hassasiyetin yüksek olduğu 0.3 – 2 mm gibi ince katmanlı kaplamalar

yapmaya imkân sağladığı gibi, ana malzemeye minimum girişim (dilution) yaparak maksimum bağ kuvvetlerinin elde edildiği kaplamaların meydana gelmesini sağlamaktadır. Bu özellik, kaplama yöntemini diğer kaplamalardan en net şekilde ayıran özelliktir (Zanzarin, 2015). Hedeflenen boyutlara çok yakın ölçülerde giydirme yapılabilmesi, kaplama sonrasındaki yüzey işleme süresini kısaltmaktadır.



Şekil 2.7. Lazer Kaplama yöntemi şeması (Flame Spray Technologies, 2017).

Kaplama işlemi boyunca, lazer tarafından verilen ısıya önemli bir kısmı püskürtülen tozu eritmeye harcanması sebebi ile parçaya çok fazla ısı girdisi olmamakta, dolayısı ile işlem sonrası parçada oluşan deformasyon ihmal edilebilir düzeyde kalmaktadır. Kaplama yönteminde ısı tesiri altında kalan bölge kesiti çok küçüktür (Toyserkani vd., 2005).

Lazer kaplama prosesinin performansı doğrudan uygun kaplama malzemesi seçimi ile ilişkilidir. Kaplamadan beklenen özelliklere bağlı olarak çok çeşitli toz veya tel formunda metalik veya metal kompozit esaslı malzemeler kullanılabilir. Doğru proses ve kaplama malzemesi seçimi korozyondan korunma, aşınma direncini artırma ve yüksek sıcaklık uygulamaları açısından oldukça kritik önem taşımaktadır (Qian, 1997, 1998). Bu

uygulamada kullanılan tozlar 20-200 µm boyut aralığındadır. Genellikle küresel formda ve gaz atomizasyon yöntemi ile üretilmiş olması tercih edilmektedir (Sexton, 2001).

Plazma transfer ark kaynağı ve geleneksel TIG kaynak yöntemlerinin yerine tamir ve dolgu uygulamalarında kullanım alanı bulan ve yaygınlaşan alternatif gelişmiş bir yöntemdir. Bunun yanı sıra parçanın yeniden toleransa getirilmesi işlemlerine alternatif ekonomik bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır (Rickerby ve Matthews, 1991). Savunma sektöründe de benzer şekilde 20 ve 35 mm gibi büyük kalibre namluların bağlantı dişleri gibi ulaşılabilir alanlarının tamir işlemlerinde kullanılmaktadır (Şekil 2.8). Kaplama yöntemi, lazer kafaların ebatları sebebi ile namlu içinde işlem yapmaya elverişli değildir. Bu nedenle namlu içinde yüksek aşınma oranlarının görüldüğü atım yatağı bölgelerine ulaşabilen bir uygulama örneği bulunmamaktadır.

Atış performansı için Stellite gömlek uygulamasının, alternatifi olmaması sebebi ile, kullanıldığı 12.7 mm çaptaki uçaksavar namlusunun atım yatağına lazer kaplama yöntemi ile aşınma, korozyon ve ısıya dayanıklı farklı malzemelerin kaplanması namlunun performansının artırılması için oldukça umut vadetmektedir. Literatürde uygulama örneği bulunmayan 12.7 mm çaptaki namlu içine girebilecek lazer sisteminin geliştirilmesi ise bu tez çalışmasına paralel olarak yürütülmüş savunma sanayi projesidir.

Bu tez çalışması ve lazer kaplama sistemi geliştirme projesi, savunma sistemleri üreten bir şirketin tecrübesi ve desteği ile yürütülmüştür. Şirket, çalışma için kullanılan silah namlu çeliğini, namlu üretim teknolojisini, yazılımları, programları ve kaynakları tedarik etmiştir. Gizlilik hakları nedeniyle, şirketin adı, ürün adı ve belirli teknik verilere bu tez çalışmasında yer verilmemiştir. Çalışma süresinde geliştirilen lazer sistemine ait tanıtıcı görsel Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.8. 35 mm top namlusunun kaplama ile tamir işlemi.¹



Şekil 2.9. 12.7 mm çaptaki namlu içine girebilecek lazer sistemi.²

^{1, 2} Şekil 2.8 ve Şekil 2.9’da verilen görseller tez çalışması paralelinde yürütülen namlu içi lazer kaplama kaplama cihazının geliştirilmesi projesi kapsamında hazırlanan firma raporundan, firma izni ile alınmıştır.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bazı endüstrilerde kullanılan mekanik bileşenler çoğunlukla geleneksel malzemelerin arızalanacağı veya sık sık değiştirilmesine neden olacağı aşındırıcı, korozyif ve yüksek sıcaklık ortamlarında çalışmaktadır. Bu ortamları içeren tipik uygulama alanları arasında havacılık, savunma, otomotiv, petrol üretimi ve petrol rafinerisi, kimya, nükleer, madencilik ve üretim endüstrileri yer almaktadır. Bu tür ortamlarda çalışan mekanik bileşenlerde, metal-metal aşınması, sürtünme, sıcak korozyon ve parçacık erozyonu gibi çeşitli hasar mekanizmaları görülebilmektedir. Yüksek sıcaklık koşullarında ise bu tür bozulmalar hızlanmakta ve kritik ekipmanların arızalanması felaketle sonuçlanabilmektedir. Bu tür ortamlarda çalışan mekanik bileşenlere bir örnek olarak savunma sanayiinde, mühimmatın ateşlenmesi ile yüksek sıcaklıklardaki aşınma ve korozyon şartları nedeniyle namluda çeşitli deformasyon mekanizmalarının çalıştığı görülmektedir.

Mekanik komponentlerin kullanım ömrünü uzatmak ve verimliliğini en üst düzeye çıkarmak amacıyla aşınmaya karşı dayanıklı çeşitli malzemeler geliştirilmiştir. Süper alaşımlar; mekanik, tribolojik, korozyon ve yüksek sıcaklık özelliklerinin benzersiz kombinasyonları sayesinde, yağlanmamış sistemler veya yüksek sıcaklık içeren aşınmaya dayanıklı uygulamalar için idealdirler. Hiçbir malzeme geniş bir sıcaklık aralığında tüm bu özelliklerde mükemmel olamazken, üretim ve ısıl işlem prosesleri ile süper alaşımların bileşiminde yapılacak bazı düzenlemeler ile tüm bu özelliklerin maksimize edildiği belirli çalışma aralıkları elde edilebilmektedir (Davis, 2000). Birçok endüstride, yaşam döngüsü/bakım maliyetlerini düşürmek için süper alaşımlara olan bağımlılık artmaktadır. Üretim endüstrisinde geleneksel olarak sertleştirilmiş çelikten yapılmış aşınma ortamlarında çalışan mekanik bileşenler, bakım ve duruş süresini azaltırken hizmet ömürlerini uzatmak amacıyla süper alaşımlarla değiştirilmektedir. Süper alaşımların geliştirilmesi, kullanımı ve güvenilmesi, birçok kritik endüstri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Jeshvaghani vd., 2011; Harris vd., 2002). Bu çerçevede savunma sistemlerinde, üretim teknolojisi sebebi ile yüksek maliyetli ürün sınıfında olan, namlunun korunması için kobalt esaslı Stellite süper alaşımları tercih edilmektedir.

3.1. Stellite Alaşımları ve Özellikleri

Stellite alaşımları aşınma dayanımı gerektiren alanlarda kullanılmak üzere geliştirilmiş bir grup kobalt esaslı süper alaşımdır. Temel alaşım elementi krom olan Stellite alaşımları ayrıca tungsten veya molibden ve küçük fakat önemli miktarda karbon içermektedir. 1900'lü yılların başında ikili kobalt-krom alaşımlarının paslanmaz doğasını ve yüksek mukavemetini keşfeden Elwood Haynes; daha sonrasında, kobalt-krom sisteminde molibden ve tungstenin güçlü etkileri ile geliştirdiği Co-Cr-Mo ve Co-Cr-W üçlülerini tanıtmıştır (Antony, 1983). Yıldız benzeri parlaklıkları nedeniyle alaşımlara Latince'de yıldız anlamına gelen Stella kelimesinden esinlenerek Stellite adı verilmiş ve alaşımlar 'Deloro Stellite Company' adı altında markalaşmıştır.

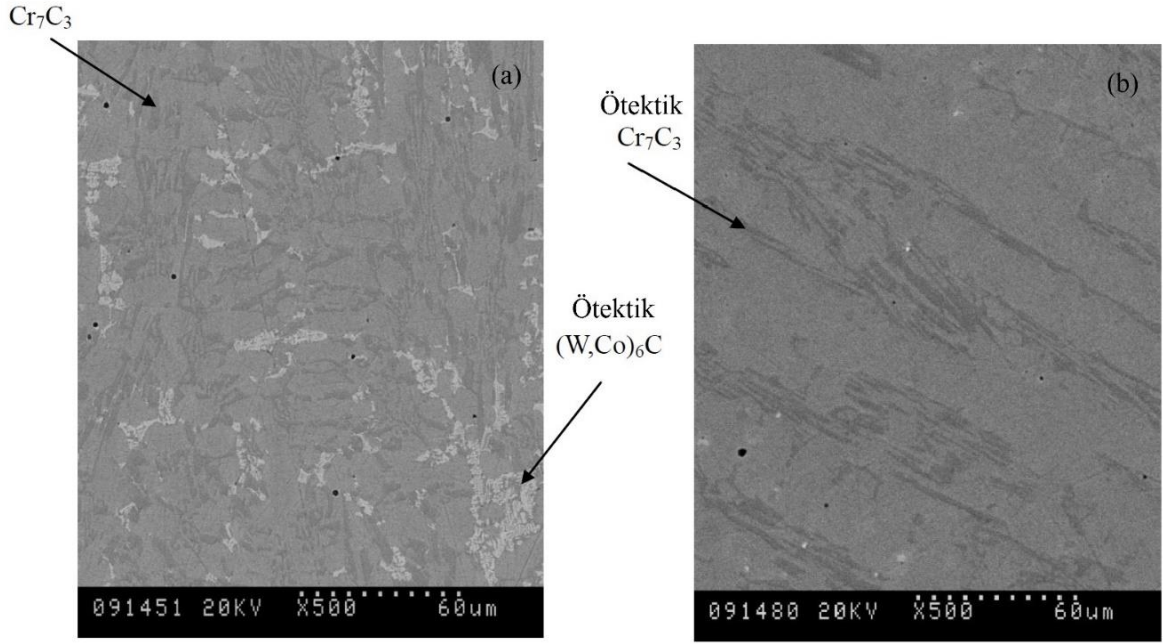
I. Dünya Savaşı sırasında, Stellite alaşımları yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemetleri nedeniyle kesici takım malzemeleri olarak kullanılmıştır. Daha sonra, 1922'den itibaren kobalt bazlı alaşımlar yüzeyleri aşınmadan korumak için kaynak kaplama uygulamalarında yerini almıştır. Yüksek sıcaklıklarda korozyona karşı dirençli uygulama malzemelerine olan ihtiyacı karşılamak için, 1930'larda ve 1940'ların başında korozyona dirençli alaşım sınıfları geliştirilmiştir (Davis, 2000).

Stellite alaşım sınıflarındaki temel farklar, katılaşma sırasında mikro yapıdaki karbür oluşumunun miktarını ve türünü belirleyen karbon ve tungsten içeriğinden kaynaklanmaktadır (Davis, 2000). Geliştirilen Stellite alaşımlarının çoğu, Elwood Haynes tarafından tanıtılan Co-Cr-W ve Co-Cr-Mo üçlülere üzerine kurulmuştur. Daha sonra değişiklikler ve çeşitli kullanımlar için uygulamalar yoluyla, bu malzemelerin ilave faydalı niteliklere sahip olduğu bulunmuştur. Optimize edilmiş bileşimlerle Stellite alaşımlarının korozyona, ısıya ve aşınmaya dayanıklılıkları görülmüştür (Betteridge, 1982). Çizelge 3.1'de farklı alanlarda yaygın olarak kullanılan çeşitli Stellite alaşımlarının nominal kimyasal bileşimleri listelenmiştir (Zhang ve Zhao, 2013). Alaşımlar arasında en önemli etken olan karbonun %0,1 ~ %2,5 arasında değiştiği görülmektedir.

Çizelge 3.1. Çeşitli kobalt esaslı Stellite alaşımlarının nominal kimyasal bileşimleri.

Alaşım	%Cr	%W	%Mo	%C	%Fe	%Ni	%Si	%Mn
Stellite 1	30	13	0.5	2.5	3	1.5	1.3	0.5
Stellite 3	30.5	12.5		2.4	5	3.5	2	2
Stellite 6	29	4.5	1.5	1.2	3	3	1.5	1
Stellite 21	27		5.5	0.25	3	2.75	1	1
Stellite 20	33	17.5		2.45	2.5	2.5		1
Stellite 22	27		11	0.25	3	2.75	1	1
Stellite 25	20	15		0.1	3	10	1	1.5
Stellite 80	33.5	19		1.9				
Stellite 188	22	14		0.1	3	22	0.35	1.25
Stellite 720	33		18	2.5	3	3	1.5	1.5
Stellite 706K	29		6	1.4	3	3	1.5	1.5
Stellite 6B	30	4	1.5	1	3	2.5	0.7	1.4
Stellite 6K	30	4.5	1.5	1.6	3	3	2	2

Stellite alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mikro yapıları, malzemelerin mekanik davranışlarını ve tribolojik özelliklerini anlamak ve tahmin etmek için temel oluşturmaktadır. Stellite alaşımlarındaki karbon içeriği, alaşımlarının aşınma direncini artıran karbürlerin çeşitliliği ve hacim oranıyla ilişkilidir. Örneğin, ağırlıkça %2,4 karbon içeren, Stellite 3 gibi, alaşımların karbür yoğunluğu ağırlıkça %30 civarındadır. Bu karbürler, M'nin metal bileşenleri temsil ettiği M_7C_3 (Krom açısından zengin birincil karbür) ve M_6C (tungsten açısından zengin ötektik) tiplerindedir. Öte yandan %1 ağırlıkça karbon içeren, Stellite 6B gibi, alaşımlarda karbürler malzemenin ağırlıkça yaklaşık %13'lük kısmını oluşturmaktadır. Bunlar ağırlıklı olarak M_7C_3 tipi krom açısından zengin ötektik karbürlerdir. Şekil 3.1'de görüleceği üzere karbon içeriği ağırlıkça %2'den fazla olduğunda alaşımların mikroyapısı hiper-ötektiktir; katı çözelti ve karbürlerle birlikte interdendritik ötektik matris içerisindeki M_7C_3 karbürlerden oluşur. Karbon içeriği ağırlıkça %2'nin altında olan alaşımlarda ise yapı, ötektik M_7C_3 karbür ağıyla çevrili yüzey merkezli kübik (YMK) kobalt dendritlere sahip hipoötektik yapıdadır (Frenk ve Wagniere,1991: Kapoor'dan (2012)).



Şekil 3.1. (a) Stellite 3 (ağırlıkça %2,4 C) alaşımının hiper-ötektik ve (b) Stellite 6B (ağırlıkça %1 C) alaşımının hipo-ötektik mikroyapıları.

Denge elemanı olarak kobalt, Stellite alaşımlarında çok önemli bir rol oynamaktadır. Kobaltın kararsız kristal yapısı ve çok düşük istifleme hatası enerjisi nedeniyle, kobalt bazlı alaşımlar yüksek akma mukavemetleri, yüksek pekleşme hızı, döngüsel gerilimler altında sınırlı yorulma hasarı ve gerilimleri absorbe etme yeteneği gibi çeşitli belirgin özelliklere sahiptirler. Saf kobalt allotropik faz dönüşümü göstermektedir. 417 °C'nin altına soğutulduğunda YMK'dan hegzogonal sıkı pakete (HSP) dönüşmektedir (Davis, 1980). Stellite alaşımlarının kobaltça zengin katı çözeltisi, alaşım elementleri sayesinde oda sıcaklığında bile YMK yapısını korumaktadır. Ancak, yeterince yüksek gerilimlere maruz kalırsa, metastabil YMK yapı HSP'ye dönüşmektedir (Antony, 1983; Heathcock vd.,1981). Dönüşüm martensitik olarak kabul edilmekte ve kayma ile meydana gelmektedir. YMK'dan HSP'ye faz dönüşümü kolaylaştırılacaksa, istifleme hatası enerjisi en aza indirilmelidir. Mo, W ve Cr ilaveleri HSP fazını stabilize ederken, Ni, Fe, Mg ve C Stellite'teki istifleme hatası enerjisini artırır (Radu vd., 2004). HSP dönüşümü Stellite alaşımlarının faydalı tribolojik davranışları için esastır. Bu nedenle, yapı içerisindeki Fe, Ni veya başka elementler en aza indirilmelidir (Antony, 1983; Beltran, 1987; Frenk ve Kurz,1994).

Stellite alaşımlarının korozyon (Frenk ve Kurz,1994) ve aşınma (Heathcock vd.,1981) dayanımının yüksek olması, yapısındaki ağırlıkça ortalama %20 ~ 30 civarında bulunan kromdan kaynaklanmaktadır. Kromun Stellite alaşımlarında iki temel fonksiyonu bulunmaktadır. Birincisi, Stellite alaşımları için krom baskın karbür oluşturucudur (Shin vd., 2003). Stellite alaşımlarındaki en yaygın karbürler, krom açısından zengin M_7C_3 tipindedir. Ancak krom açısından zengin $M_{23}C_6$ karbürleri düşük karbonlu alaşımlarında da bol miktarda bulunmaktadır. İkinci olarak ise krom kobalt matristeki en önemli alaşım elementidir, zenen madde olarak yapıyı güçlendirirken, korozyon ve oksidasyona karşı direnç de sağlamaktadır.

Stellite alaşımları için diğer yaygın alaşım elementleri ise molibden ve tungstendir. Benzer etkilere sahip bu iki element, Stellite alaşımlarının korozyon ve oksidasyon direncini artırmaktadır. Büyük atom boyutları sebebi ile katı çözelti sertleşmesini ve dolayısı ile matrisin güçlenmesini sağlamaktadırlar. Dahası, yüksek miktarlarda bulunduklarında, alaşımın katılaşması sırasında M_6C tipi karbürlerin ve $Co_3(Mo,W)$ gibi intermetaliklerin oluşumunu destekler (Shin vd., 2003; Radu vd., 2004).

Özetle; W, Mo ve C ilaveleri aşınma özelliklerini iyileştirirken, Ni, Fe, C, Si ve B gibi alaşım elementlerinin eklenmesi ile yapılan daha ileri değişiklikler yüksek sıcaklık ve yüksek darbeli aşınma durumlarında kullanım için diğer Stellite alaşımlarını geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Savunma sanayiinde de yaygın olarak kullanılan iki Stellite alaşımının mekanik ve fiziksel özellikleri izelge 3.2'de saf Co ile karşılaştırılmıştır (Beltran, 1987; Frenk ve Kurz,1994). Kural olarak Stellite alaşımlarında artan C seviyesi daha fazla karbür oluşturacağından ve sertliği artıracaktır. Bu nedenle içerdiği yüksek C oranı sebebi ile Stellite 6 alaşımının sertlik değerinin, Stellite 21'e göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca Stellitlerin sertleştirilmesi hem katı çözelti sertleştirmesini hem de karbür çökelmesini içermektedir (Beltran, 1987).

Çizelge 3.2. Stellite 6 ve 21'in mekanik ve fiziksel özellikleri.

	Co	Stellite 6	Stellite 21
Sertlik ⁽¹⁾ [HV]	125	400 ⁽²⁾	320 ⁽²⁾
		550 ⁽³⁾	450 ⁽³⁾
Elastisite Modülü [GPa]	210	210	210
Akma Dayanımı [MPa]		550	500
Çekme Dayanımı [MPa]	250	900	700
Uzama [%]		1	9
Termal İletkenlik [W/mK]	69	14.8	14.5
Yoğunluk [kg/m ³]	8900	8460	8340
Erime Sıcaklığı [°C]	1495	1350	1280

⁽¹⁾Stellite alaşımlarının artan C seviyesi daha fazla karbür oluşturacağından ve yüksek C'lu alaşımlarında daha yüksek sertlik görülmektedir (Beltran, 1987).

⁽²⁾ Geleneksel Kaynak.

⁽³⁾ Lazer Kaplama.

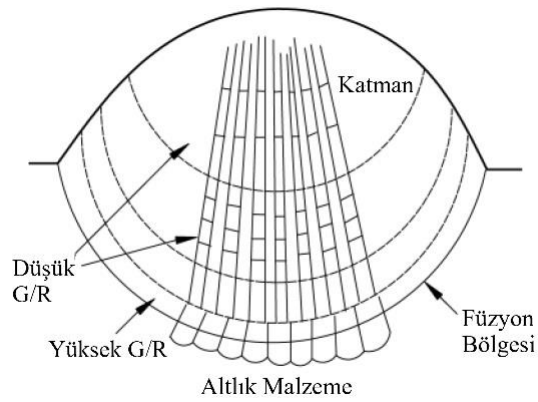
3.2. Lazer Kaplama (Cladding) Sonrası Stellite

Lazer kaplama teknolojisi ile üretilen kaplamaların fonksiyonel özellikleri ve kalitesi büyük ölçüde nihai mikro yapıya bağlıdır.

Lazer kaplama işleminde, yüzeyi ergitip bir eriyik havuzu oluşturur, kaplama malzemesi bu aşamada yüzeye taşınmakta ve lazer, kaplama malzemesini de eriterek alt malzemeye nüfuz etmesini sağlamaktadır. İşlem esnasında koruyucu gaz kullanıldığı için eriyik malzemeler atmosferden etkilenmez. Lazer operasyona devam edip, yüzeyden ilerleyerek uzaklaşır ya da işlem tamamlanırsa eriyik havuzdan ana malzemeye doğru yüksek hızda ısı transferi gerçekleşmekte ve erimiş malzemeler hızlıca katılaşmaktadır. Genellikle, metaller için konveksiyon hızı, ilerleme hızından birkaç kat daha yüksektir ve böylelikle son derece hızlı bir homojenleşme gerçekleşmektedir (Vilar, 1999). Eriyik havuzu homojenizasyonu ile katılaşma sürecinin kontrolü, istenen mikro yapının elde edilmesi için temel kriterlerdir. Lazer kaplama sürecinde soğutma oranları çok yüksektir. Genellikle $5 \cdot 10^3 - 10^6$ K/s aralığındadır ve katı hal dönüşümleri genellikle bastırılmaktadır. Bu nedenle kimyasal bileşim ve termofiziksel özelliklerinin yanı sıra son durumda mikroyapı katılaşma prosesine

bağlı olarak şekillenir. Lazer kaplama işlemlerinde katı-sıvı arayüzünün büyüme hızları genellikle 10 mm/s'den yüksektir ve bu nedenle tespit edilen tipik mikroyapılar genellikle düzlemsel, hücresel ve dendritiktir (Vilar, 1999).

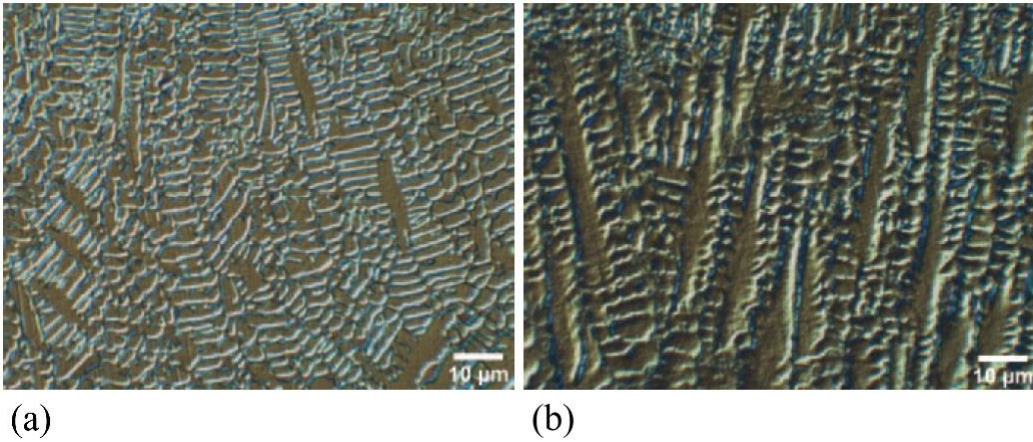
Belirli bir alaşım için, katılaşma mikroyapısı, soğutma hızı (R) ve katı-sıvı arayüzündeki termal gradyan (G) tarafından belirlenen bölgesel katılaşma koşullarına bağlıdır. Özellikle, hızla katılaşan katmanların büyüme morfolojisi G/R parametresi tarafından kontrol edilmektedir. Öyle ki G/R kritik bir değerden yüksekse düzlemsel bir katılaşma cephesi meydana gelirken, G/R bu kritik değerden düşükse düzlemsel katı-sıvı arayüzü dengesizleşmekte ve hücresel veya dendritik katılaşma meydana gelmektedir. Bu katılaşma koşulları (G ve R), eriyik havuzunun boyutunun ve geometrisinin bir fonksiyonudur ve lazer gücü, tarama hızı, besleme hızı, ışın çapı veya alt tabakanın sıcaklığı gibi lazer kaplama koşullarından etkilenmektedir (Sheikh, 2007). Katılaşma hızı, alt tabaka-kaplama arayüzünde sıfıra eşittir ve yüzeye yaklaşıldıkça katılaşma süresinin çoğunda sabit bir değere yükselmektedir (Frenk ve Kurz, 1993; Mohanty ve Mazumder, 1998). Bu sabit değer, ilerleme hızından daha düşüktür ve eriyik havuzunun şeklinden etkilenmektedir. R 'nin aksine, termal gradyan G eriyik havuzunun dibinde maksimumdur ve yüzeye doğru kademeli olarak azalmaktadır (Sheikh, 2007). Buna göre, G/R 'nin kaplama havuzunun derinliği boyunca davranışı, Şekil 3.2'deki çizimle şematik olarak verilmiş ve G/R 'nin bir eriyik havuzunun kesitinin mikro yapısı üzerindeki etkisi gösterilmiştir (Huang vd., 2011).



Şekil 3.2. Kaplama tabakasının oluşumunun şematik gösterimi ve kristalografik analizi.

Katılaşmanın başlangıcında, eriyik metal katı altlık malzeme ile temasını sürdürdüğü için düzlemsel bir katılaşma cephesi belirlemektedir. Bu noktada katılaşma hızı sıfırdır ve bu nedenle G/R sonsuz bir değerdedir. Katı-sıvı ara yüzünün ilerlemesi ve ısı birikmesiyle, R hızla artarken, G de hızla azalır ve bu da G/R değerinin düşmesine neden olur. Düzlemsel katılaşma cephesi, G/R azaldıkça hücrel ve sonunda dendritik bir ara yüze dönüşür. G/R 'nin hızlı değişimi nedeniyle, hücrel ara yüz bölgesi çok dardır. Hücrel ve dendritik katılaşmalar genellikle sütunlu şekildedir ve ısı yoğunlukla alt tabaka boyunca dağıldığı ve bu yönde en dik termal gradyan geliştiği için kaplama-alt tabaka ara yüzüne dik (veya sıcaklık izotermine dik) büyüme eğilimindedir. Örtülü tabakanın yüzeye yakın bölümünde, ısı yoğunlukla çevreleyen atmosfer yoluyla dağıtılır ve G baskınlığı kaybolur. Bu nedenle, son bölgede dendritler çok ince ve yönelimsizdir (Huang vd., 2011; Zanzarin, 2015).

Stellite alaşımları lazer kaplama yöntemi ile kaplandığında ince dendritik bir yapıda katılaşmaktadır (bkz. Şekil 3.3). İnce yapı, katılaştırılacak az miktardaki malzeme (yaklaşık 10 mm^3) ve altlık malzemenin etkili termal iletkenliği nedeniyle hızlı bir katılaşma sürecinin sonucunda oluşmaktadır (Persson, 2005). Bu ince dendritik yapı sebebi ile, lazer kaplama ile kaplanmış Stellite alaşımlarının sertliklerinin Çizelge 3.2'de de görüleceği üzere, geleneksel olarak kaynaklanmış olanlardan daha yüksektir (Beltran, 1987; Frenk ve Kurz, 1994).



Şekil 3.3. Lazer kaplamalı Stellite 6 (a) ve Stellite 21 (b)'in parlatılmış ve dağlanmış kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri.

3.3. Stellite Alaşımlarının Aşınma ve Korozyon Davranışları

3.3.1. Oda sıcaklıklarındaki aşınma ve korozyon davranışları

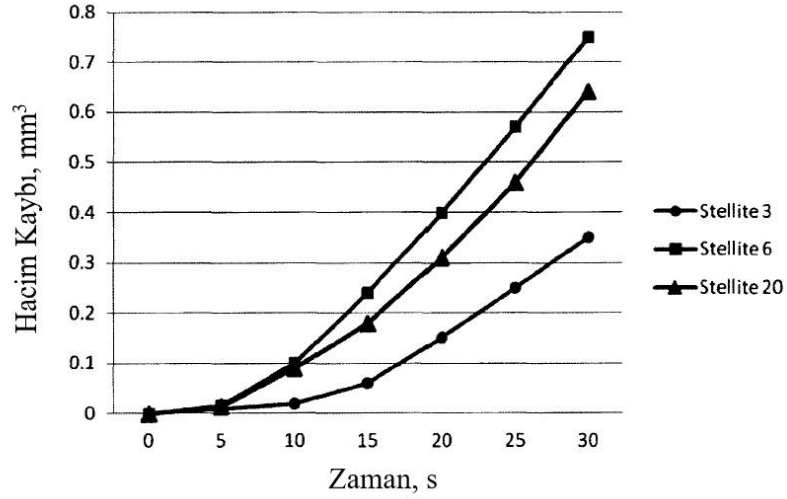
Stellite alaşımlarının tribolojik özellikleri çeşitli araştırma faaliyetlerinde kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Frenk ve Wagniere (1991), yükünü ve kayma hızını kontrol ederek aşınma oranının belirlemek için bir disk üzeri aşındırma test cihazı (pin-on-disc) (ağırlıkça %90 WC-%10 Co bilya) kullanarak Stellite 6 üzerinde kuru kayma aşınma testi gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, Stellite 6'nın sert metal bir yüzeye karşı kuru ortamdaki aşınmasında en az iki mekanizmanın çalıştığını göstermiştir. Düşük yüklerde veya düşük kayma hızlarında, hafif bir aşınmanın meydana geldiği ancak bu durumun oksit kalıntılarının oluşumuna yol açtığı görülmüştür. Bu tür bir oksidatif rejim altında, aşınma oranı esasen oksit oluşumunun kinetiği ve oluşan oksidin mekanik veya termo-mekanik özellikleri ve yüzeye tutunması tarafından kontrol edildi şeklinde değerlendirilmiştir. Daha yüksek yük ve yükseltilmiş kayma hızlarında ise şiddetli bir metalik aşınma rejimine geçiş yaşandığı ve aşınma yüzeyinde çatlakların oluşup yayılmasına neden olduğu görülmüştür. Şiddetli metalik aşınma lokalize kırılmalara ve aşınma kalıntılarının oluşmasına yol açmıştır. Frenk ve Kurz (1994) ise benzer bir çalışmayı mikroyapı etkisini de dahil ederek yapmışlardır. Farklı mikroyapılara sahip Stellite 6 numuneleri üzerinde kuru ortamda gerçekleştirilen şiddetli aşınma testlerinde, mikro yapının aşınma oranı üzerinde düşük oranda etkili olduğu görülmüştür. Numunelerin hepsi aynı kimyasal bileşime sahip olmasına rağmen, daha ince mikro yapıdan daha kaba yapıya doğru aşınma oranlarının farklı olduğu raporlanmıştır. Ayrıca, malzemenin başlangıç sertliğinin şiddetli metalik aşınma rejimi altında aşınma özelliklerinden bağımsız olduğu ve bunun Archard'ın aşınma oranının sertlikle ters orantılı olduğu şeklindeki aşınma ilişkisine aykırı olduğu belirtilmiştir. Ancak Yu vd. (2007) tarafından Stellite 4'ün kayma aşınma davranışı üzerine yapılan çalışmalarında çelişkili sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada hem döküm hem de HIP uygulanmış Stellite 4 alaşımları üzerinde kayma aşınmasına yönelik testler gerçekleştirilmiştir. Aşınma testi sonuçları, kaba bir mikro yapıya ve belirgin karbür morfolojisine sahip döküm alaşımının, daha ince yapıya sahip HIP alaşımına kıyasla daha iyi bir aşınma direnci ve farklı bir aşınma mekanizması sergilediğini göstermiştir.

Oda sıcaklığındaki aşınma şartlarında, süper alaşımlar genellikle üstün aşınma dirençlerini sert fazlarından almaktadır. Stellite alaşımı için, tungsten ve molibden matristeki iki önemli alaşım elementidir. Karbürlerin oluşumuna katılırlar ve matrise ek mukavemet sağlarlar. Birkaç çalışma, tungstenin yerine molibden kullanılmasının veya Stellite alaşımlarındaki molibden içeriğinin artırılmasının alaşımların aşınma direncini iyileştirdiği sonucuna varmıştır. Molibdenin tungstenden daha büyük bir atom boyutuna ve daha güçlü karbon oluşturma yeteneğine sahip olduğunu ve dolayısıyla mikroyapıdaki karbürlerin hacim fraksiyonunu artırdığını ve bunun aşınma direncindeki artışa atfedildiğini öne sürmüşlerdir (Yao vd., 2005 a; Yao vd., 2005 b). Benzer şekilde Shin vd. (2003) tarafından da işaret edildiği üzere; Stellite alaşımlarında M_6C karbürlerinin hacim oranı ve boyutu, alaşımdaki molibden içeriğinin ağırlıkça sıfırdan %6'ya kadar artması ile hızla artmaktadır. Aynı aralıkta artan molibden içeriğiyle kromca zengin karbürler ise boyut olarak küçülmektedir. Her iki çalışmada benzer şekilde Stellite alaşımlarının sertliği ve aşınma direncinin, mevcut karbürlerin boyut ve hacim oranına bağlı olacağını öne sürmüşlerdir.

Hiper-ötektik Stellite alaşımları genellikle şiddetli aşınma koşulları için tercih edilirken, daha sünek yapıdaki hipo-ötektik alaşımlar ise kavitasyona maruz kalan uygulamalarda kullanılmaktadır (Heathcock vd., 1981). Stellite 3, Stellite 6 ve Stellite 20'nin kavitasyon erozyon davranışı Heathcock vd. (1981) tarafından incelenmiştir. Çalışma sonunda (bkz. Şekil 3.4) Stellite 3'ün erozyona karşı en yüksek dirence sahip olduğu, Stellite 6 ve 20'nin daha düşük ve benzer erozyon direncinde olduğu gösterilmiştir.

Stellite 3 ve Stellite 20 benzer kompozisyonlarda ve benzer makro sertliklerdeki (ortalama 530 – 610 HV) alaşımlardır. Ancak; Stellite 20'nin erozyon dayanımı Stellite 3'e göre oldukça düşüktür ve bu durum mikroyapılarının olağan sonucudur. Stellite 3 alaşımlarında, Cr_7C_3 ve W_6C karbürleri Co-zengin matris içerisinde ince bir interdendritik ağ oluşturmaktadır. Öte yandan Stellite 20 ise; daha yüksek Cr ve W içeriği nedeniyle, karmaşık bir karbür ötektiğine gömülü iğnemsiz Cr_7C_3 ve Co açısından zengin katı çözelti adacıklarına sahiptir. İlave olarak Stellite 20 içerisindeki iğnemsiz karbürler, 3'ünkülere

kıyasla çok daha yüksek sertliktedirler. Stellite 6 ise, Stellite3'ün kaba bir versiyonudur ve içerisindeki daha az alaşım elementi ve %C nedeni ile daha düşük karbür hacmine sahiptir.



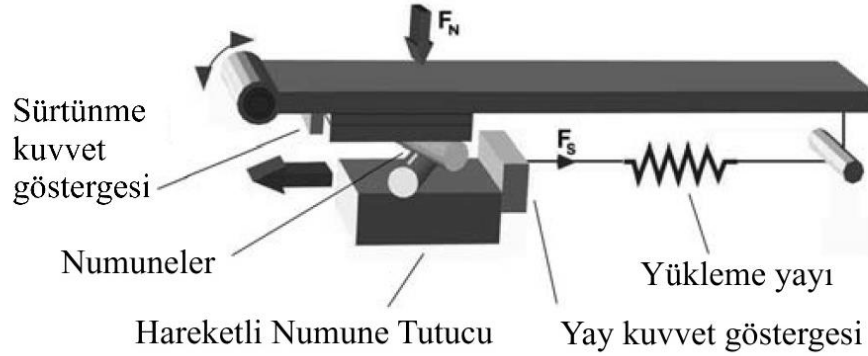
Şekil 3.4. Stellite alaşımlarının erozyon test eğrileri (Heathcock vd., 1981).

Yapılan SEM analizlerinde, Stellite 3 ve Stellite 20 için karbürlerin seçilimli olarak aşındığı, karbür-matris arayüzünün ise aşınmanın başlangıç noktası olarak hareket ettiği görülmüştür (Heathcock vd., 1981; Yao vd., 2005 b; Malayoglu ve Neville, 2005). Stellite 20'nin daha düşük aşınma direnci; kısmen, daha sert ve daha kırılğan olan büyük karbürlerin daha yüksek oranda aşınıp uzaklaştırılmasından ve kısmen de daha büyük matris-karbür arayüz alanından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Stellite 6'da ise erozyon çoğunlukla Co matrisi içerisindeki ikiz sınır kesişimlerinden malzeme kaybı oluşmasıyla meydana geldiği görülmüştür.

Malayoglu ve Neville (2005), %3,5'luk NaCl sıvı çözeltisinde sıvı-katı aşınma koşulları altında aşınma ve korozyon testleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada Stellite 706 ve Stellite 6'nın hem döküm hem de HIP numunelerinin erozyon ve korozyon davranışlarına odaklanmışlardır. Çalışma sonucunda %5 Mo içeren Stellite 706 alaşımının, %4,8 W içeren Stellite 6'ya kıyasla daha iyi aşınma ve korozyon dayanımı sergilediğini tespit etmişlerdir. Erozyon ve korozyon dayanımı için alaşımların mikroyapılarından ve özellikle karbürlerinin türlerinden etkilendiğini ortaya koyan araştırmacılar, alaşımın sertliğinin korozyon dayanımına etkisi olmadığını ifade etmişlerdir. Nikel, tungsten, molibden ve vanadyum gibi

normalize alaşım elementlerinin kullanımı ile matrisin güçlendirilmesinin erozyon ve korozyon dayanımı için daha efektif olduğunu değerlendirmişlerdir.

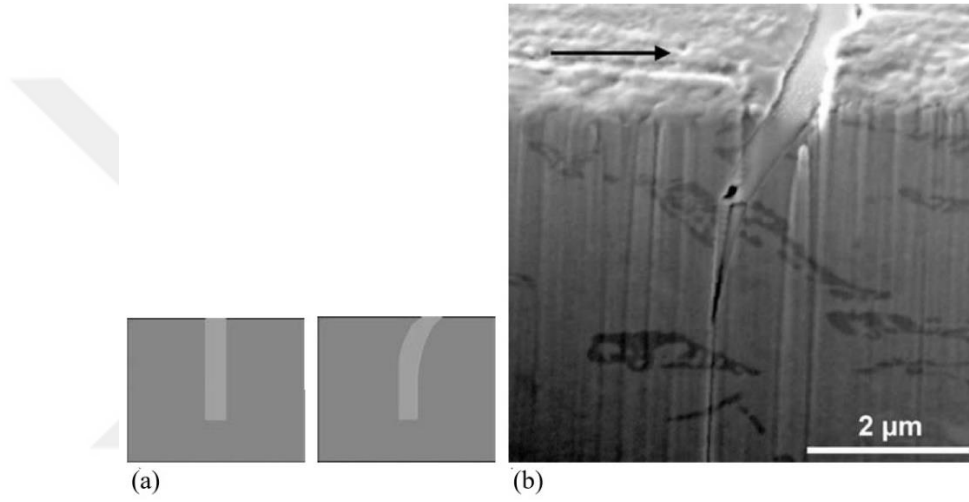
Literatürde farklı Stellite alaşımlarının, farklı koşullardaki tribolojik özelliklerini inceleyen pek çok çalışma bulunsa da doğrudan kayma gerilmeleri altında çalışan Stellite alaşımlarının tribolojik performansının ardındaki mekanizmayı açıklar detaylı bir çalışma yapılmamıştır. Persson (2005) doktora tez çalışmasında nükleer tesislerde yoğun olarak kullanılan Stellite 6 ve Stellite 21 alaşımlarını referans alarak, alaşımların aşınma mekanizmasını açıklamak üzere yeni bir fiziksel model ortaya koymuştur. Nükleer reaktörlerin kapaklarında kullanılan sürgülü vanaların makaslama mekanizmalarındaki yoğun kayma aşınmasını simüle edebilmek için yeni bir aşınma test sistemi tasarlamıştır. Tasarlanan tribometre, sürekli artan bir yük altında birbirine karşı kayan iki çapraz silindirik yüzeyin konfigürasyonundan oluşmaktadır (Bkz. Şekil 3.5). Bu yeni sistem, tek bir test çalışmasında çok çeşitli yüklerin analizi için uygun olduğundan cihaz Yük Tarayıcısı olarak adlandırılmıştır.



Şekil 3.5. Yük Tarayıcısının Taslağı.

Yük tarayıcısının çalışma mantığına göre hareketli numune tutucu sola doğru hareket ettikçe, yüklemeye yayı gerilir ve böylece numuneler üzerindeki yük artmaktadır. İki çapraz silindirik test yüzeyi birbirine bastırıldığında, temas basıncı daha yumuşak malzemenin yük taşıma kapasitesine ulaşana kadar silindirik kayma yolunun düzleşmesi ile plastik deformasyon gerçekleşmektedir. Çalışmada ayrıca kayma esnasında sürtünme kaynaklı deformasyonun yüksek çözünürlüklü karakterizasyonu için yeni bir model geliştirilmiştir. Temel prensip olarak, deforme edilecek malzemenin yüzeyine kimyasal buhar biriktirme

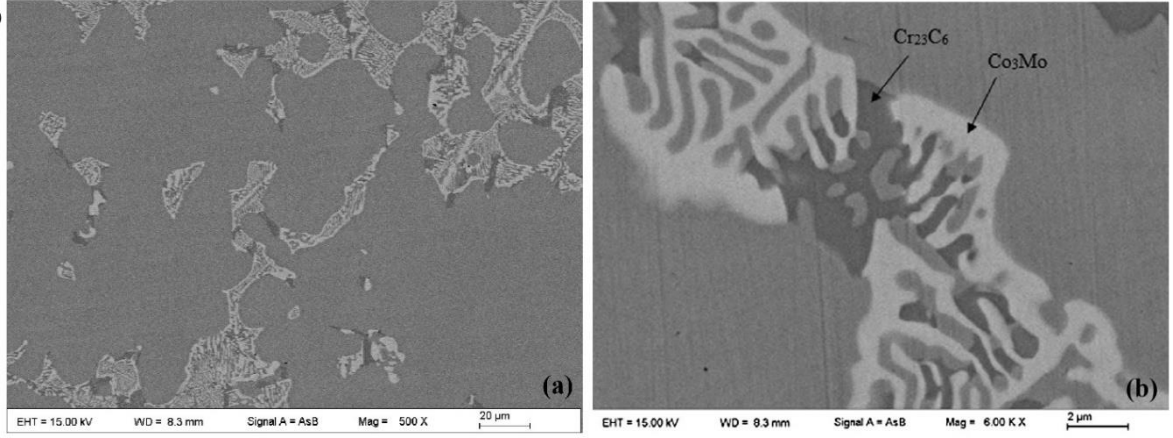
işlemi ile metal dolgu yapılmış ve bu dolgu dikey bir işaretleyici olarak kullanılmıştır. İşaretleyicinin ilk şekli bilindiğinden, Stellite 6'nın deformasyon özellikleri işaretleyici deformasyonu ile ortaya çıkarılmıştır. Bu model ile Persson (2005) plastik deformasyonun ana kısmının, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi ilk çevrim sırasında meydana geldiğini tespit etmiştir. Artan sertlik ve genişleyen temas yolunun neden olduğu nominal gerilmelerin azalması nedeniyle, sonraki çevrimlerin yalnızca çok yüzeysel plastik deformasyona neden olduğunu görmüştür. Stellite 21'de de benzer gözlemler yapılmıştır.



Şekil 3.6. (a) Deformasyon analiz tekniğinin prensibi, testten önce ve sonra işaretleyicinin şematik kesitlerini göstermektedir. İşaretleyicinin geometrik değişimi, yüzey deformasyonunun türünü ve kapsamını ortaya koymaktadır, (b) Bir çevrim sırasında 1200 N'luk normal yüke maruz kalan Stellite 6 yüzeyinin kesiti (ok, karşı yüzeyin kayma yönünü göstermektedir).

Liu vd. (2015 a) Mo ilavesinin düşük karbonlu döküm Stellite alaşımlarının aşınma ve korozyon davranışları üzerine etkisini incelemişlerdir. Araştırmacıların ağırlıkça %11 oranında Mo ilavesi yaptıkları Stellite 21 alaşımlarının, ilavesiz versiyonlarına oranla, yüksek miktarda Co_3Mo intermetalik bileşiklerin oluştuğunu raporlamışlardır (Bkz. Şekil 3.7). Mo katkılı ve referans Stellite 21 alaşımlarının kuru kayma aşınma dayanımları ve katı parçacık erozyon dayanımları deneysel olarak değerlendirilmiştir. İntermetalik bileşiklerin Stellite alaşımlarında karbürlerin yaptığı gibi, alaşımların sertliğini ve aşınma direncini artırdığı, ancak kırılabilirlikleri nedeniyle katı parçacık erozyon direncini desteklemediği gösterilmiştir. Ancak, alaşımların %3,5 ağırlıkça sodyum klorür (NaCl) sulu çözeltisindeki

korozyon testlerinde, Mo ilavesi ile oluşan intermetaliklerin korozyon dayanıma etkisinin olmadığı görülmüştür.

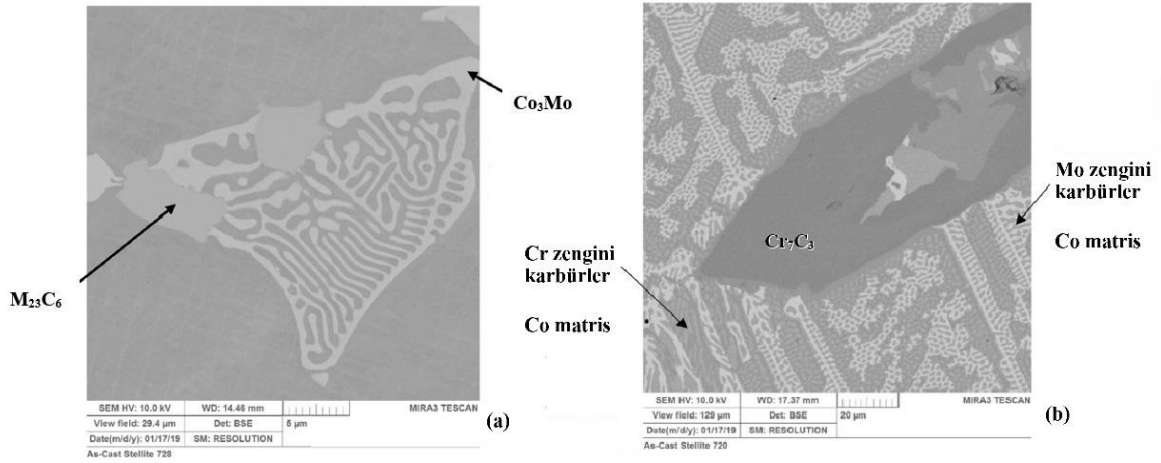


Şekil 3.7. Mo ilaveli Stellite 21 alaşımlarının SEM mikro yapısı: (a) 500X ve (b) 6000X.

Liu vd. (2015 a), düşük karbonlu Stellite alaşımlarında Mo ilavesinin sertlik ve aşınma performansı üzerindeki olumlu etkilerinden referansla benzer bir çalışmayı yüksek karbonlu Stellite alaşımları üzerinde de gerçekleştirmişlerdir (Liu vd, 2015 b). Çalışmada farklı krom ve molibden içeriklerine sahip Stellite 706, 712 ve 720 alaşımları incelenmiştir. Hem karbon hem de molibden içeriklerinin bu alaşımların mikroyapılarını önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur. Mo içeriği ağırlıkça %18 altında olduğunda, alaşımdaki başlıca karbürlerin Cr-zengin olduğu (Cr_7C_3 veya/veya Cr_3C_2); Mo-zengin karbür ($(\text{Co},\text{Mo})_3\text{C}$) miktarının ise Mo içeriğiyle arttığı görülmüştür. Bu alaşımların sertliğinin ve aşınma direncinin karbür hacim oranının artması ile arttığı test edilmiştir. Ancak yüksek karbonlu CoCrMo Stellite alaşımları yüksek karbonlu CoCrW Stellite alaşımlarından daha kötü aşınma dayanımı göstermiştir.

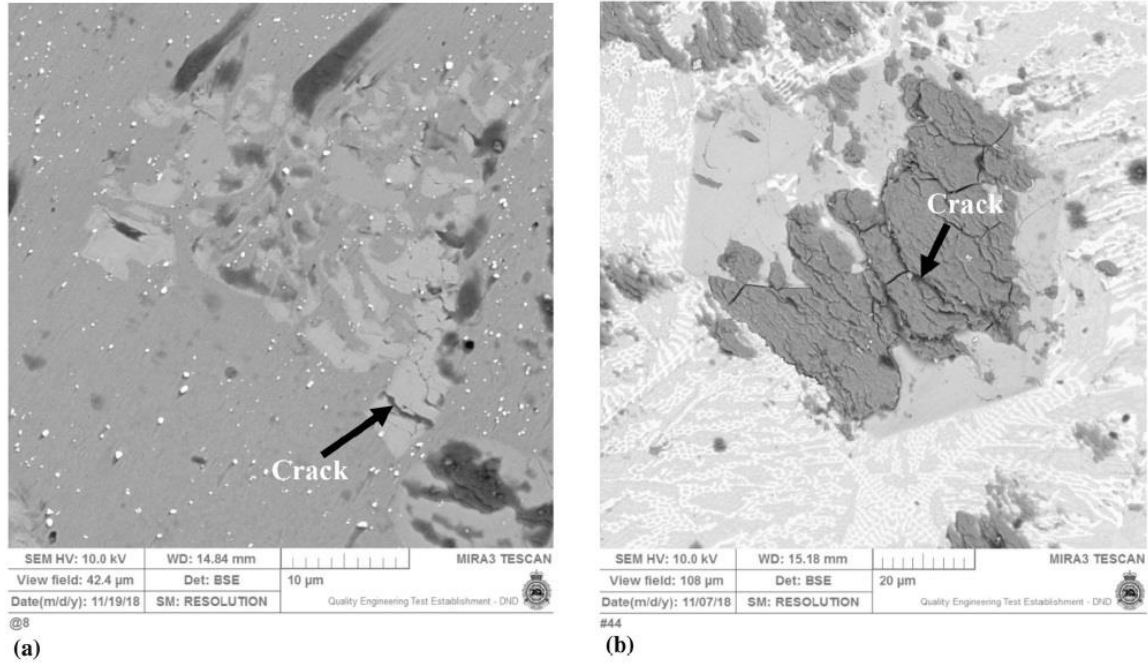
Düşük ve yüksek karbonlu Stellite alaşımlarının Mo ilavesi ile ilgili benzer bir çalışma da Collier vd. (2020) tarafından yapılmıştır. Çalışmada Stellite 21 referans olarak kullanılarak; Mo ilaveli alaşım serilerinden düşük karbonlu Stellite 728 ve yüksek karbonlu Stellite 720'nin tribolojik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada literatür ile paralel olarak karbon ve molibden içeriğinin Stellite alaşımlarının içerisindeki karbür ve intermetalik bileşiklerinin tipini ve miktarını belirlediği doğrulanmıştır. Düşük C ve Mo içeriği ile

referans olarak alınan Stellite 21'in düşük miktarda Cr açısından zengin karbür ve Mo açısından zengin intermetalik içerirken; artırılmış Mo ilavesi ile Stellite 728'in daha yüksek miktarda Mo açısından zengin intermetalik içerdiği görülmüştür. Ancak, yüksek karbon ve Mo içerikli Stellite 720 alaşımı Mo açısından zengin intermetalikler yerine, Mo açısından zengin karbürler içermektedir (Bkz. Şekil 3.8). Bu sert fazların hepsinin sertlik ve aşınma dayanımına etkisi olduğu değerlendirilmiştir. Öyle ki Stellite 21'e kıyasla daha fazla intermetalik içeren Stellite 728'in sertliği; Stellite 21'e göre yüksek, daha fazla karbür içeren Stellite 720'ye göre düşük ölçülmüştür.



Şekil 3.8. (a) Stellite 728 ve (b) Stellite 720 alaşımlarının SEM görüntüleri.

Çalışma kapsamında yapılan kuru kayma aşınması testleri, bu üç Mo'li Stellite alaşımının genel olarak adhezif ve abrazif birleşik aşınma mekanizmaları sergilediğini ortaya koymuştur (Collier vd., 2020). Stellite 21 için, toplam aşınma kaybı, sürtünme ısısı nedeniyle yüzeyin oyuklanma/çizilme ile yüzey oksidasyonu ve ardından mekanik etki ile oksit tabakasının kırılması sonucu olduğu değerlendirilmiştir. Öte yandan, Stellite 728 ve Stellite 720 için, büyük miktarda karbür ve/veya intermetaliklerin varlığı nedeniyle, yüzeydeki oyuklanma/çizilme önemli ölçüde bastırılmış, ancak sert fazları aşınma yükü altında çatlayıp kırılabileceği ve oksit kalıntılarıyla birlikte aşınma kaybına eklenmiş olabileceği yorumu getirilmiştir (Bkz. Şekil 3.9).



Şekil 3.9. (a) Stellite 728 ve (b) Stellite 720'nin aşınmış yüzeyindeki çatlamış sert fazlar.

3.3.2. Yüksek sıcaklıklardaki aşınma ve korozyon davranışları

Yüksek sıcaklıkta, Stellite alaşımlarının iyi aşınma direnci göstermesi, bu sıcaklıklardaki mükemmel mekanik özelliklerine ve oksit filmin arayüz bağlanma mukavemetine atfedilmektedir. Oksit birikintilerinin yapışmasını iyileştirmek, Stellite alaşımlarının yüksek sıcaklık aşınma direncini artırmak için çok önemlidir. Bazı araştırmacılar, yüksek sıcaklıklarda kayan aşınmaya maruz kalan malzemeler arasında oluşan oksit birikintilerinin veya tabakalarının etkisini araştırmışlardır (Wang ve Li, 2003; Radu ve Li, 2005). Çalışmalarının sonunda araştırmacılar taban malzemesine yapışan oksit tabakalarının, yüksek sıcaklıklarda sürtünmeyi ve aşınmayı azaltmada faydalı bir etkiye sahip olduğunu raporlamışlardır. Oksijen içeren aşınma ortamının bir sonucu olarak, bir veya her iki kayan yüzeye sıkışan oksit döküntüleri, oluştuğunda kayan yüzeyler arasındaki doğrudan teması önleyerek daha fazla aşınmasını engellediği için aşınma dayanımına pozitif etkisi olduğu ifade edilmiştir. Molibden ve tungstenin oksit tabakalarının oluşumuna katkı sağladığı ve hatta molibdenin daha kararlı ve daha yapışkan oksit filmi ürettiği başka bir çalışmada kayda geçmiştir (Amateau, 1964).

Literatüre bakıldığında itriyum ilavesinin etkileri, çeşitli Stellite alaşımları için incelenmiştir. Radu vd. (2004), Stellite 21'deki itriyum ilavesinin oksit tabakasının mekanik özelliklerini ve yapışmasını iyileştirdiğini bulmuşlardır. %0,5 seviyesinde itriyumun ilavesinin Stellite 21'in yüksek sıcaklık aşınma performansını, özellikle 500 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda belirgin şekilde artırdığı görülmüştür. Bu tür bir iyileştirme, Y_2O_3 fazını içeren oksitlerin üstün mekanik özelliklerinden kaynaklanıyor olabileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca itriyumun tane sınırlarına difüzyonu ile oksijen iyonlarının içeriye doğru difüzyonunun desteklendiği ve dolayısı ile oksit büyümesinin önüne geçildiği ifade edilmiştir (Radu ve Li, 2005).

Stellite 6 ve Stellite 712 alaşımları için de itriyum etkisinin incelendiği benzer çalışmalar yapılmıştır (Wang ve Li, 2003; Radu ve Li, 2007). Wang ve Li (2003) Stellite 6 alaşımına ağırlıkça %2 oranında yapılan itriyum ilavesi sonucu incelen mikroyapı ve oluşan Co_2Y fazının etkisi ile alaşımın sertliğinin ve aşınma dayanımının kayda değer ölçüde arttığını raporlamışlardır. Ancak Stellite 6 alaşımındaki aşırı itriyum katkısının, gevrek ve kolay kırılan faz oluşumu nedeniyle sertlik ve aşınma direncinde azalmaya neden olduğu görülmüştür. Stellite 712 testinde de tekrarlanan deneysel sonuçlar, aşırı itriyumun Stellite 712'nin yüksek sıcaklık aşınma direncini olumsuz yönde etkilediğini göstermiştir. Bu çalışmada ayrıca, Stellite 712 alaşımının mikro yapısı ve mekanik özellikleri itriyum ilavesinden kayda değer şekilde etkilenmese de yüksek sıcaklıklardaki aşınma testlerinde en olumlu sonucu ağırlıkça %5 itriyum ilaveli versiyonunun aldığı gözlemlenmiştir.

Çelik ve Kaplan (2004), silisyumun Stellite 6 alaşımlarının yüksek sıcaklıktaki aşınma davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Stellite 6 alaşımına sırasıyla %2,2, %3,1 ve %4,2 ağırlık oranında eklenen silisyum, düşük sıcaklıklarda (100 °C'nin altında) aşınma direncini artırırken, yüksek sıcaklıklarda (400 °C'nin üzerinde) azaltmıştır. 100 °C ile 400 °C arasındaki sıcaklık periyodunda, %2,2 ağırlık oranında silisyum ilavesi olan numune en yüksek aşınma dayanımını gösterirken, %4,2 ağırlık oranındaki aşırı silisyum ilavesinin aşınma direncini olumsuz etkilediği görülmüştür.

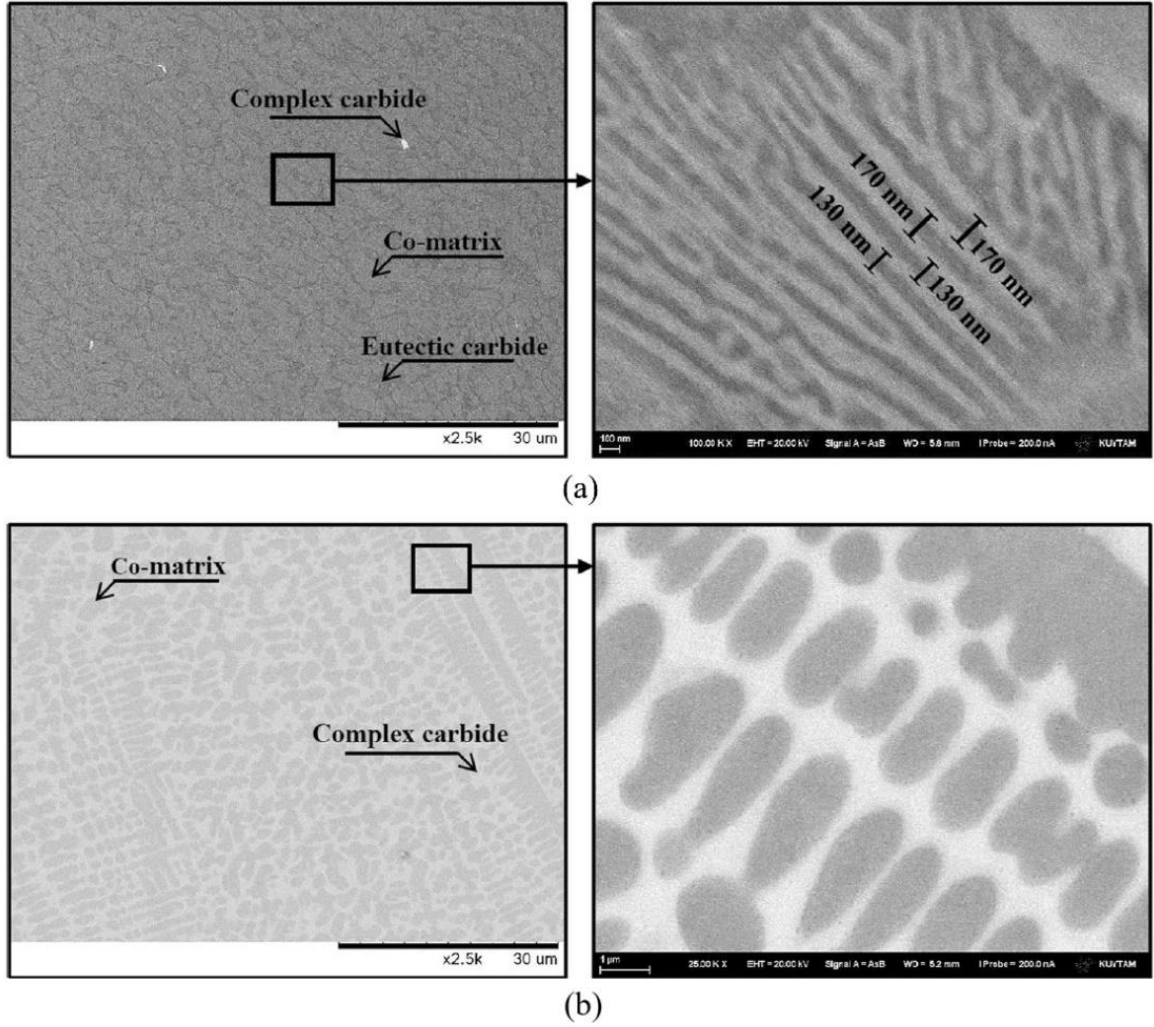
Kapoor (2012) ise doktora tezinde düşük, orta ve yüksek karbonlu olmak üzere 6 farklı Stellite alaşımı üzerinde çalışmıştır. Çalışmada bu alaşımların kimyasal bileşimi, mikroyapısı, sertliği ve aşınma direnci arasındaki ilişkiler incelenmiş ve bu ilişkilerdeki termal etkilere odaklanılmıştır. Literatürdeki diğer çalışmalara paralel olarak; Stellite alaşımlarında karbon artışı ile artan karbür hacminin alaşımın sertliğini artırdığı görülmüştür. Ayrıca alaşım içerisindeki karbon oranının sertlikleri ile paralel olarak malzemelerin oda sıcaklığındaki aşınma davranışları üzerinde de etkili olduğu görülmüştür. Ancak alaşımların yüksek sıcaklıklardaki (450-650 °C) aşınma davranışlarının daha karmaşık olduğu ve karbon oranından oda sıcaklığındaki kadar etkilenmediği görülmüştür. Buna karşın malzeme oksidasyonunun yüksek sıcaklıklardaki aşınma direnci üzerinde daha büyük etkisi olduğu belirlenmiştir. Stellite alaşımlarının aşınma direnci, genel olarak, sıcaklıkla birlikte azalır. Ancak, bu çalışmada düşük karbonlu Stellite alaşımları için, 650 °C gibi yüksek sıcaklıklarda aşınma direncinin arttığı belirlenmiştir. Bu anormal davranış, yüzey sertleşmesine atfedilmiş; engellenen dislokasyonlardan kaynaklanan gerinim sertleşmesinin, YMK → HSP dönüşümünün ve aşınan partiküllerin kısmen yumuşayan malzeme yüzeyine saplanmasından kaynaklanan "camlama" etkisinin yüzeyin sertleşmesine neden olduğu değerlendirilmiştir (Kapoor, 2012; Kapoor vd. 2012).

3.3.3. Stellite alaşımlarının lazer uygulamalarında aşınma ve korozyon davranışları

Stellite alaşımlarının lazer kaplama yöntemi ile kaplandığında ince dendritik bir yapıda katılaştığına daha önceki bölümlerde değinilmiştir. Stellite alaşımlarının aşınma ve korozyon davranışları üzerinde lazer uygulamalarının etkili olacağı değerlendirilerek, bu kapsamda yapılan çalışmalar ayrıca değerlendirilmiştir.

Alhattab vd. (2020), Stellite 6 ve ağırlıkça %10 molibden ilaveli Stellite 6 alaşımlarının plazma transfer ark (PTA) prosesi ile yüzeye uygulanmasından sonra oda ve yüksek sıcaklıklardaki aşınma karakteristiklerini incelemişlerdir. Çalışmada malzeme yüzeyine PTA ile Stellite 6 ve ağırlıkça %10 molibden ilaveli versiyonunu biriktirmiş ve sonrasında kaplanan yüzeylerde homojenleştirme amaçlı lazer yüzey ertitme (LSM) uygulanmıştır. Uygulama sonrasında Stellite 6 alaşımının kobalt matris, kromca zengin

karbürler ve kompleks karbürler olmak üzere üç farklı fazdan oluştuğunu gören araştırmacılar; Mo ilaveli alaşımın mikroyapısının sadece ağ benzeri karmaşık karbür hakimiyetinde olan kobalt matristen oluştuğunu belirlemişlerdir (Bkz. Şekil 3.10).



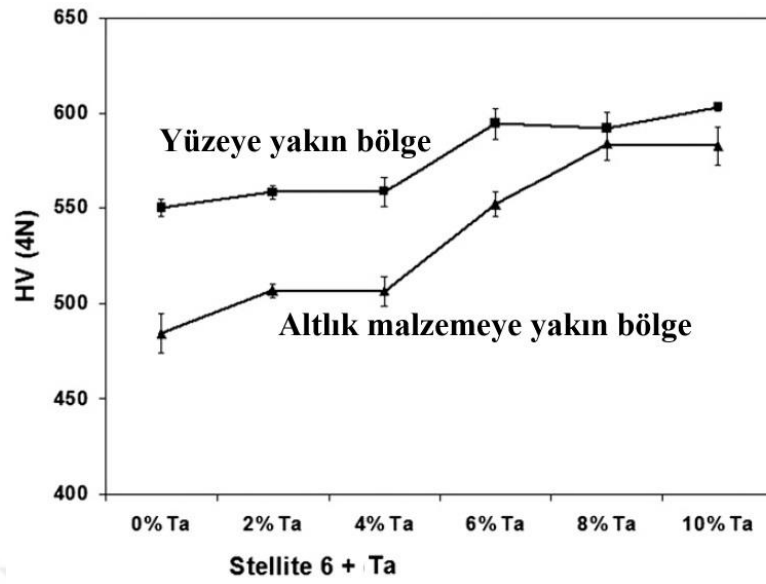
Şekil 3.10. (a) Stellite 6 ve (b) Mo ilaveli Stellite 6 alaşımlarının LSM sonrası mikroyapı görüntüleri.

Araştırmacılar LSM sonrası mikroyapı değişimlerine paralel olarak her iki alaşımın sertliklerinin PTA'lı versiyonlarına göre arttığını tespit etmişlerdir. Ancak Mo ilaveli versiyonun sertliğinin Stellite 6'ya kıyasla %44 daha yüksek olduğu görülmüştür. LSM işleminden sonraki sertlik artışının, oda sıcaklığındaki aşınma testlerinde, Stellite 6'nın ve Mo alaşımlı versiyonunun aşınma kaybını sırasıyla %26 ve %74 oranında azalttığı test edilmiştir. Ancak 500 °C'de en düşük aşınma kaybı, aşınmış yüzeyi kaya tuzu yapısına sahip

CoO tipi tribo-oksit tabakasıyla kaplı PTA Stellite 6'dan elde edilmiştir. LSM uygulanan alaşımlar ise PTA Stellite 6'da neredeyse iki kat daha fazla aşınmış, bu durum LSM sonrası malzeme yüzeyinde oluşan normal spinel yapıdaki Co_3O_4 tipi triboksitlerin kayma teması altında aşınmış yüzeylerden kolayca uzaklaştırılmasına atfedilmiştir.

Alhattab vd.nin (2000) yaptığı çalışmanın benzerleri Stellite 12 ve ağırlıkça %10 Mo katkılı versiyonu için de yapılmıştır (Motallebzadeh vd. 2015; Motallebzadeh vd. 2018; Dilawary vd. 2017 a; Dilawary vd. 2017 b; Dilawary vd. 2018). Bu çalışmalar da Alhattab vd.nin (2000) bulguları ile örtüşmektedir. Molibdenin eklenmesi yalnızca daha yüksek bir sertlik sağlamakla kalmadığı, aynı zamanda aşınma direncini de artırdı görülmüştür. Oksidasyonun baskın olduğu yüksek sıcaklık aşınma koşullarında, molibden eklentisinin, aşınmış yüzeyde koruyucu bir oksit filminin gelişmesi sayesinde, daha düşük sıcaklıklara kıyasla aşınma direncini artırdığı görülmüştür.

Farnia vd. (2012) Stellite 6 alaşımına farklı oranlarda Ta katkısı yaparak, lazer kaplama sonrası malzemenin mikroyapı ve sertliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, Ta eklentisinin mikroyapıyı çok daha ince hale getirdiği görülmüştür. Ayrıca, Ta içeriği artıkça Ta açısından zengin $\text{M}_4\text{C}_{3.04}$ tipi karbürlerin ve ilave olarak kobalt katı çözeltili ötektik alanlarında bireysel hacimli Ta açısından zengin MC tipi karbürler oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu karbürlerin, Ta içermeyen Stellite 6 alaşımındaki interdendritik bölgelerde gözlenen ortorombik Cr açısından zengin M_7C_3 karbürlerine ek olarak bulunduğu belirlenmiştir. Bu mikroyapısal değişikliklerin, Ta ilave edilmiş Stellite 6 kaplama alaşımının sertliğinin iyileştirilmesini sağlamıştır. Ayrıca, Tantal miktarındaki artışla sertliğin tüm kaplama boyunca daha düzgün hale geldiği gösterilmiştir (Bkz. Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Farklı Ta miktarlarına sahip Stellite 6 kaplamalarının yüzeye yakın ve arayüzeye yakın bölgelerdeki sertlik değişimleri.

Yumuşak çelik malzeme üzerine VN alaşımı (Bkz. Çizelge 3.3) ve Stellite 21 türevi alaşım tozlarının karışımından oluşan kompozit kaplama lazer kaplama yöntemi ile uygulanmış, farklı miktarlarda VN alaşımının Co bazlı kaplamaların mikroyapısı ve aşınma direnci üzerindeki etkisi sistematik olarak incelenmiştir (Ding vd. 2016).

Çizelge 3.3. VN alaşım tozlarının kimyasal bileşimi (ağırlıkça %).

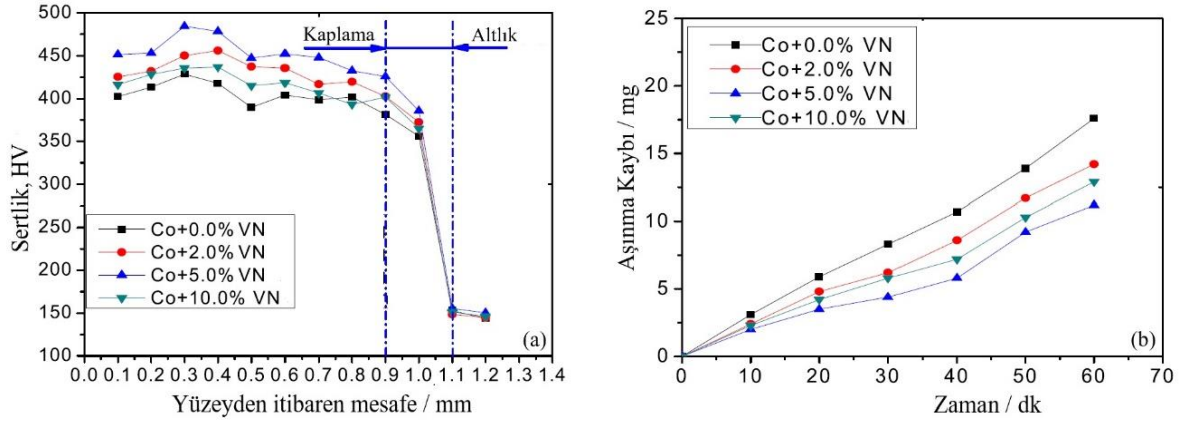
Element	V	N	Si	P	S
Miktar	≥76-80	≥14-26	≤0.25	≤ 0.03	≤ 0.01

Çizelge 3.4. Co esaslı alaşım tozlarının kimyasal bileşimi (ağırlıkça %).

Element	C	Mo	Cr	Ni	Si	Fe	Co
Miktar	0.27	5.4	28.6	2.27	0.9	0.5	kalan

VN alaşımı eklendikten sonra belirli miktarda ince tanecikler ve çokgen eş eksenli taneciklerin sentezlendiği ve yoğun istifleme hatası ve istifleme hatası etkileşimleri olduğu görülmüştür. Kaplamaların mikrosertliklerindeki iyileşmenin ve aşınma kaybındaki

azalmanın ağırlıkça %5 ek VN alaşımlı numune için sırasıyla %12 ve %36,4 olduğu raporlanmıştır (Bkz. Şekil 3.12). Bu iyileşmeler alaşımların Co matris içerisindeki Cr_{23}C_6 karbürleri ile birlikte tanımlanan $\text{Co}_{5.47}\text{N}$, $\sigma\text{-FeV}$ ve VN fazlarına atfedilmiştir.



Şekil 3.12. VN alaşımlamanın Co esaslı kaplamanın (a) Sertliğine ve (b) aşınma kaybına olan etkisi.

Cheng vd. (2020) Stellite 12 ve ağırlıkça farklı oranlarda Ti/B₄C karışımını içeren kompozit kaplamaları lazer kaplama ile 304 kalite paslanmaz çelik üzerine uygulamışlardır. Farklı alaşımlardaki kaplamaların mikroyapılarını, oksidasyon dayanımlarını ve mekanik özelliklerini inceleyen araştırmacılar, ağırlıkça Ti/B₄C ilavesi ile paralel olarak sertliğin 650 HV'ye kadar arttığını raporlamışlardır. İlave olarak aşınma dayanımı ve oksidasyon direncinin de Ti/B₄C ilavesi ile iyileştiğine bu çalışmada yer verilmiştir.

Stellite 21'in lazer kaplama ile uygulanan kaplamalarının mekanik özellikleri ile ilgili son çalışma Zhao vd. (2024) tarafından yapılmıştır. Araştırmacıların Nb ilavesinin kaplama uygulaması sonrasındaki etkilerini inceledikleri bu çalışmada ağırlıkça %1, 3 ve 5 oranındaki Nb tozunu Stellite 21 ile mekanik olarak karıştırıp, doğrudan kaplama uygulaması için lazer sistemine besleyerek kaplamaları oluşturmuşlardır. Yapılan testler sonrasında Nb ilavesi ile paralel olarak mikroyapının daha ince dendritik bir yapıda geliştiği ve sertliğin %21,4 oranında arttığı görülmüştür.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Daha önce de belirtildiği gibi, Stellite alaşımları geleneksel olarak aşınma uygulamaları için tasarlanmış yüksek karbonlu alaşımlar; yüksek sıcaklık uygulamaları veya eş zamanlı korozyon ve aşınma uygulamaları için düşük karbonlu alaşımlar olarak kategorize edilmektedir.

Stellite alaşımlarında yer alan elementleri ve etkilerini anlamak, malzeme özelliklerinin temelini anlamak için önemli bir adımdır. Karbon, dağılma ve katı çözelti sertleştirilmesi yoluyla atomik kristal kafesinde kaymayı önleyen karbürler oluşturarak sertliği artırmaktadır. Ancak artan sertlik ile birlikte malzemenin işlenebilirliği zorlaşırken, kırılabilirliği de artmaktadır. Karbon dışında özellikle tanımlanması gereken üç önemli element molibden, tungsten ve kromdur. Çünkü bu elementler Stellite alaşımlarının özelliklerinin kontrol edilmesinde önemli roller oynamaktadırlar. Literatür verilerinde de görüldüğü üzere, Stellite alaşımlarında hem tungstenin hem de molibdenin ana rolü katı çözelti sertleştirilmesidir. Molibden, tungstenin yarı atom kütlesine sahiptir, dolayısıyla aynı ağırlık yüzdesi için, tungstene kıyasla daha yüksek molibden atom konsantrasyonu oluşacaktır. Bu nedenle molibden açısından zengin karbürlerin ya da intermetalik bileşiklerin oluşma eğilimi daha yüksektir. Krom ise, Stellite alaşımları için ana karbür yapıcıdır ve korozyon ile oksidasyona karşı direnci artırmaktadır. Aşınma direnci ve korozyon, bu çalışmada incelenen Stellite alaşımları için önemli hususlar olduğundan, bu elementler alaşım seçiminde kesinlikle önem arz etmektedir.

4.1. Alaşımların Belirlenmesi

Alaşımların seçiminde namlu üretiminin temelini oluşturan yiv-set açma operasyonları ve namlu aşınmasında temel olan termo-mekanik etkenler referans alınmıştır. Yüksek karbonlu Stellite alaşımları literatürde daha yüksek sertlik ve aşınma dayanımı gösterse de

yapılarının kırılgan olduğu görülmüştür. Bu nedenle kaplama ile kaplama sonrasında namlu içerisine yiv-set açma operasyonunun gerçekleştirilebilmesi için, düşük karbonlu bir Stellite alaşımının seçilmesinin gerekli olduğu değerlendirilmiştir. Namlu için mevcut koruyucu uygulamalardan kobalt esaslı gömlekte de Stellite 21 alaşımının bu nedenle seçildiği öngörülmektedir.

Literatürde lazer uygulamalarında orta ve düşük karbonlu Stellite alaşımlarının tercih edildiği ve daha çok bu grup alaşım üzerinden element etkilerinin incelendiği görülmektedir. Stellite alaşımlarının içerisinde aşınma ve yüksek sıcaklı korozyon özelliklerini pozitif yönde etkileyen molibden katkısı Stellite 6 ve Stellite 12 alaşımları için çalışılmış, ancak Stellite 21 için, lazer uygulama özelinde, herhangi bir örnek bulunamamıştır. Molibden ile alaşımlama yapılmış döküm Stellite 21 numuneleri üzerinde yapılan incelemelerde ise, alaşımın sertlik ve aşınma direncinde artış gözlemlenmiştir. Bu veriler üzerinden yola çıkarak; yürütülen tez çalışmasında namlu içerisinde kullanılan Stellite 21 alaşımına ağırlıkça %3, %6 ve %9 oranlarında molibden ilavesi yapılarak elde edilecek alaşımlar lazer kaplama uygulaması için seçilmiştir. Düşük karbonlu ve %12 Mo içerikli ticari Stellite 728 alaşımının bulunması sebebi ile ağırlıkça %Mo ilavesi %9 ile sınırlandırılmıştır.

4.2. Kaplama Numunelerinin Üretilmesi

Tez çalışma süresinde geliştirilen ve nihai durumda namlu içi kaplamasında kullanılması hedeflenen lazer sistemi, iç delik kaplamasına yönelik geliştirilen bir lazer sistemi olması ve düz numune yüzeyine kaplama kabiliyeti olmaması sebebi ile, test numunelerinin kaplanmasında namlu içi kaplama sisteminin geliştirilmesinde referans olarak kullanılan Laserline marka LDF400-100 model lazer sistemi kullanılmıştır (Bkz. Şekil 4.1). Lazer kaplama işlemi sırasında kullanılan lazer parametreleri, geliştirilen test sisteminde yapılan denemeler sonucunda namlu içi kaplama için doğrulanmış ve test numunelerinin hazırlanmasında Çizelge 4.1’de verilen bu doğrulanmış parametreler kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Test numunelerinin hazırlanmasında kullanılan Laserline marka LDF400-100 model lazer sistemi.

Çizelge 4.1. Test numunelerinin hazırlanmasında kullanılan lazer parametreleri.

Lazer Kaplama Parametreleri	
Koruyucu ve taşıyıcı gaz	Argon
Toz besleme ünitesi gaz basıncı	3 bar
Robot ilerleme hızı	14 mm/s
Toz besleme miktarı	1,5 kg/sa
Lazer gücü	1350 W
Lazer odak çapı	3 mm
Nozül uzaklığı	12 mm
Kaplama başlama sıcaklığı	25 °C

Stellite21 referans numuneleri ve ağırlıkça %3, 6 ile 9 Mo içerikli numunelerin kaplama işlemleri, namı malzemesi olarak kullanılan 30 – 31 HRC sertliğindeki 32CrMoV12-10 kalite çelik (Bkz. Çizelge 4.2) numuneler üzerine yapılmıştır. Tez çalışmasında kullanılacak mekanik karakterizasyon testleri değerlendirilerek 15 mm kalınlığında 35mm x 35 mm kare numuneler hazırlanmıştır. Kaplama için, Höganäs marka ortalama 150 µm partikül boyutlarında Stellite 21 (2528-00) ve aynı boyutlarda Mo toz kullanılmıştır (Bkz. Çizelge 4.3).

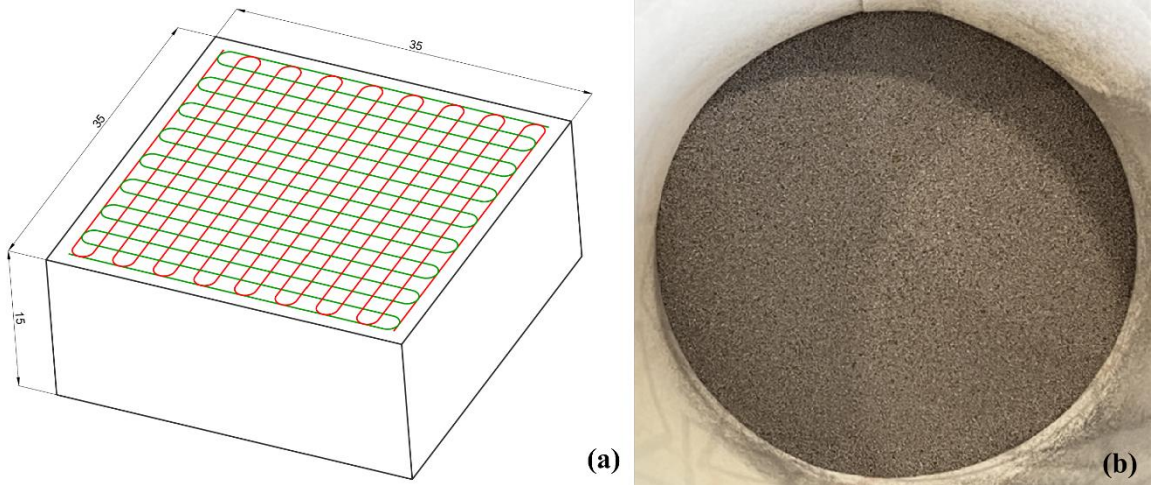
Çizelge 4.2. Lazer Kaplama uygulaması için kullanılan 32CrMoV12-10 çeliğin kimyasal bileşimi (ağırlıkça %).

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
%	0.32	0.35	0.60	0.005	0.003	3.00	0.97	0.30

Çizelge 4.3. Lazer Kaplama uygulaması için kullanılan Stellite 21 (2528-00) tozun kimyasal bileşimi (ağırlıkça %).

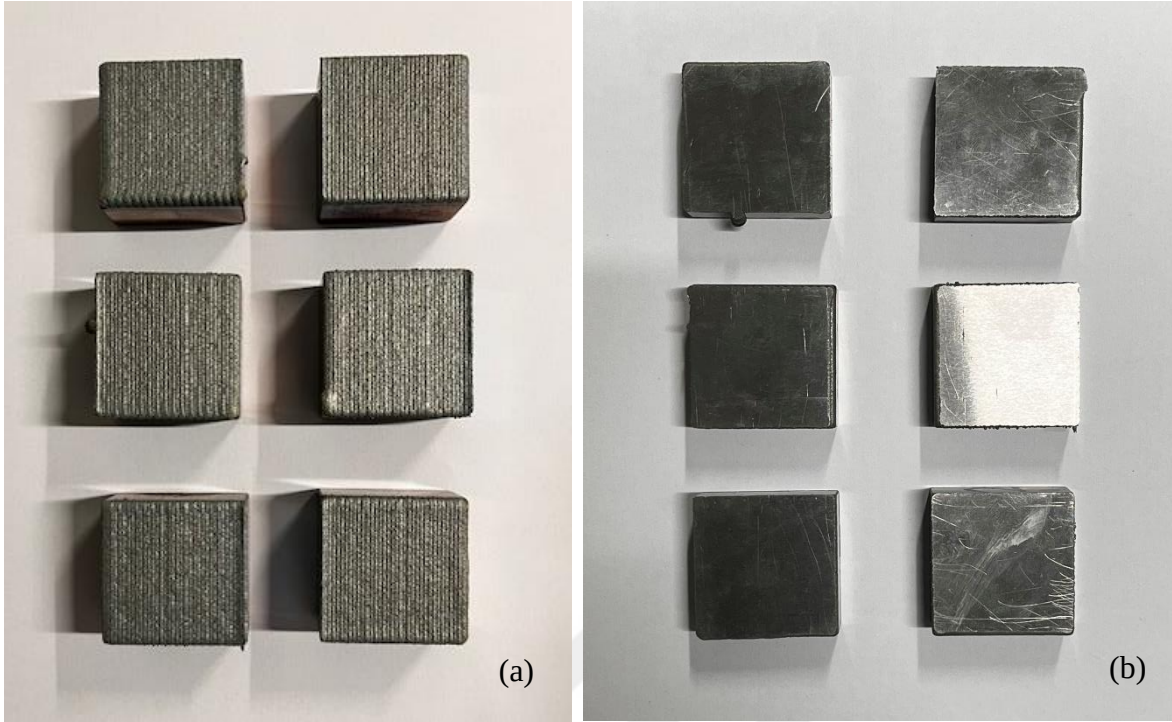
Element	C	Si	Fe	Cr	Ni	Mn	Mo	Co
%	0.25	0.9	0.5	27	2.5	0.7	5.5	Balans

Numuneler üzerine Laserline ile kaplama kalınlığının mekanik karakterizasyon testleri için yetersiz kalma ihtimali gözetilerek, kaynak yönü birbirine dik iki katman olacak şekilde kaplama işlemi yapılmıştır (Bkz. Şekil 4.2). İşlemde kullanılan tozlar çok eksenli karıştırıcı ile karıştırılarak lazere beslenmiştir.



Şekil 4.2. (a) Hazırlanan numuneler üzerindeki kaplama katmanlarını ve yönünü gösterir şema ve (b) kaplama için lazere beslenen karıştırılmış toz.

Kaplama işlemi tamamlanan tüm numuneler, yüzeylerindeki katmanlardan kaynaklanan tepe ve çukurların giderilmesi için satıh taşlama tezgahında taşlama işlemine tabi tutulmuştur (Bkz. Şekil 4.3). Bu sayede hem numune yüzeylerindeki pürüzlülük giderilmiş hem de alt-üst yüzey paralellüğinden emin olunmuştur.



Şekil 4.3. (a) Lazer kaplama sonrası katmanlı yüzey ve (b) satıh taşlama sonrası temizlenmiş yüzey görüntüleri ile hazırlanan numuneler.

4.3. Yapısal Karakterizasyon Çalışmaları

Yürütülen tez çalışmasında kaplama ile kaplama işlemleri tamamlanan numunelerden Al_2O_3 aşındırıcı kesme diski kullanılarak hassas kesme yöntemi ile taramalı elektron mikroskobu (SEM), Elektron dağılım spektroskopisi (EDS) ve X-ışınları difraktometresi (XRD) analizleri için numuneler çıkarılarak soğuk kalıplama yöntemi ile bakalit kalıba alınmıştır. Bakalit kalıba alınana numuneler, metalografik numune hazırlama prosedürü uyarınca zımparalanmış ve elmas pasta yardımı ile parlatılmıştır. Parlatma işleminden sonra numune yüzeyleri 5 ml HNO_3 , 5 ml asetik asit ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$), 20 ml HCl ve 5 ml H_2O içeren çözelti karışımı ile dağlanmış.

Numunelerin SEM görüntülemeleri ve EDS incelemeleri, ESOGÜ Merkezi Araştırma Laboratuvarı ARUM bünyesindeki Hitachi Regulus 8230 FE-SEM cihazı kullanılarak yapılmıştır.

XRD analizleri, Panalytical EMPYREAN marka cihaz ile 2°/dk tarama hızında ve 20-100 derece aralığında gerçekleştirilmiştir. Aşışmlardaki fazların tür ve miktarlarının belirlenmesi için XRD ve Rietveld Analizleri gerçekleştirilmiştir. Aşışmlardaki fazların türlerinin belirlenmesi için ICDD PDF-5+ 2024 veritabanı ile çalışan Sleeve+2023 programı kullanılmıştır. Aşışmların fazlarını temsil eden en uygun CIF (crystallographic information files) dosyaları, PDF Card: 04-001-2681-Co, PDF Card: 00-029-0488-Co₃Mo, PDF Card: 04-007-4726-Cr₇C₃ ve PDF Card: 00-035-0783-Cr₂₃C₆ fazları için kaydedilmiştir. Rietveld analizleri ise MAUD (Materials Analysis Using Diffraction) programının yardımı ile yapılmıştır. Analizlere, uyumun iyiliğinin derecesini yansıtan (Goodness of Fit) Sigma değeri 1'e en yakın değere ulaşınca kadar devam edilmiştir.

Numunelerin taşlama işlemleri sonrasında X-ışını flüoresans yöntemiyle çalışan bir spektrometre olan HITACHI X-MET 8000 Optimum XRF Analiz Cihazı kullanılarak kimyasal analizleri (ağırlıkça % olarak) alınmıştır.

4.4. Mekanik Karakterizasyon Çalışmaları

4.4.1. Sertlik ölçümleri

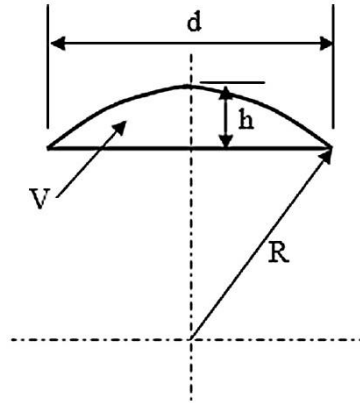
Numunelerin sertlik ölçümleri; Emco Test'in DuraScan G5 Serisi Vickers sertlik ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler; kaplama, ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) ve 32CrMoV12-10 çelik alt malzemeyi tarayacak şekilde, 200 gr yükün 10 sn uygulanması ile yapılan 3 ölçümün ortalaması alınarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca taşlanmış numunelerin yüzeyinden alınan 9 ölçümün ortalaması da yüzey sertliği olarak kaydedilmiştir.

4.4.2. Aşınma testleri

Aşınma testleri, ASTM G99-05 standardı uyarınca, NANOVEA T50 Tribometre test cihazında oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıkta (500 °C) TEI-Malzeme Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Testler 10 N yük altında, toplam kayma mesafesi 1.000 m olacak

şekilde, 6 mm çaplı dairesel bir iz oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı olarak ağırlıkça %94 WC ve %6 Co içeren 6 mm çapında bilya kullanılmıştır.

Aşınma testleri sonrasında numune yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin fotografik morfolojileri çıkarılarak ve kesit profilometre ölçümleri yapılmıştır. Bu sayede aşınma testi sonrasındaki aşınma hacim kayıpları ölçülerek karşılaştırılmıştır. Her alaşım ve sıcaklık koşulu için 3 test tekrar edilmiş, test sonuçlarında bu 3 testin ortalaması alınmıştır. Ayrıca izler üzerinden aşınma mekanizmasının karakterizasyonu için SEM görüntüleri ve EDS analizleri de alınmıştır. İlave olarak aşınma testlerinde kullanılan aşındırıcı bilyaların yüzeyleri NIKON marka optik mikroskopta incelenmiştir. Aşındırıcı bilyalar üzerindeki muhtemel hacim kayıpları Şekil 4.4'te şematize edilmiştir. Şemadan da görüleceği gibi R; bilyanın yarıçapı, h; bilya üzerinde aşınan yükseklik, d; bilya üzerindeki aşınan bölgenin çapı ve V; aşınma sonrası toplam hacim kaybı olarak verilmiştir. Toplam hacim kaybı Denklem 4.1 ve 4.2 üzerinden hesaplanmıştır.



Şekil 4.4. Aşındırıcı bilya üzerindeki aşınma kaybının şematik gösterimi.

$$h = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad \text{Denklem 4. 1}$$

$$V = \pi h^2 \left(R - \frac{h}{3} \right) \quad \text{Denklem 4. 2}$$

4.5. Oksidasyon Deneyleri

Oksidasyon deneyleri için kaplanan numunelerin sadece kaplama alaşımının olduğu bölümünden, altlık olarak kullanılan çelik taşlanarak alınan numunelerin yüzeyi parlatılmış ve dikdörtgen kesite sahip olacak şekilde kesilmiştir. Kesilen numuneler, ultrasonik olarak asetonda temizlenmiştir. Termogravimetrik analizler 500, 800 ve 1000 °C’de izotermal olarak Perkin Elmer Diamond marka termogravimetrik/ diferansiyel termal analizör (TGA) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Oksidasyon işlemi için numuneler, 24 saat boyunca, 50 °C/dk hız ile çıkılan 500, 800 ve 1000 °C sıcaklıkta 100 ml/dk akış hızına sahip saf O₂ gazına maruz bırakılmışlardır. Termogravimetrik analiz sonuçlarından, ağırlık değişimi (Δm), elde edilen ağırlık değerlerinden $m(t_2)$, başlangıçtaki ağırlık değeri $m(t_1)$, çıkarılarak elde edilmiştir (Bkz. Denklem 4.3). Oksitleme süresi ve ağırlık değişimi arasında ise Denklem 4.4’te verildiği şekilde ifade edilebilir.

$$\Delta m = m(t_2) - m(t_1) \quad \text{Denklem 4. 3}$$

$$(\Delta m)^2 = K \cdot t \quad \text{Denklem 4. 4}$$

Denklem 4.4’te K oksitlenme hız sabiti ve t süre (saat) olarak ifade edilmiştir. Stellite 21 ve Mo ilaveli alaşımlarının 500, 800 ve 1000 °C sıcaklıktaki oksitlenmesinde K değerinin belirlenebilmesi için $(\Delta m)^2$ - t grafikleri çizilmiştir. Oksitlenme hız sabiti (K), aktivasyon enerjisi (Q) ve proses sıcaklığı (T) arasındaki reaksiyon kinetiğine ait ilişki Denklem 4.5’te verilen Arrhenius eşitliği ile ifade edilmiştir. Arrhenius eşitliğinde proses sıcaklığı Kelvin ölçeğinde alınmıştır. Ayrıca K_0 frekans faktörü ve R gaz sabitini ifade etmektedir.

$$K = K_0 \cdot e^{\left(\frac{-Q}{RT}\right)} \quad \text{Denklem 4. 5}$$

Denklem 4.5'in doğal logaritması alınarak, Denklem 4.6'daki gibi yazılmıştır. Buradan yola çıkarak $\ln K$ ve $1/T$ arasında çizilen grafiğin eğiminden Q değeri bulunarak Stellite 21 ve Mo alaşımlarının oksitlenme direnci karşılaştırılmıştır.

$$\ln K = \ln K_0 - \left(\frac{Q}{RT} \right) \quad \text{Denklem 4. 6}$$

5. BULGULAR VE TARTIRŞMA

Stellite 21 alaşımlarının Mo ilavesi ile ilgili literatürdeki çalışmalar genellikle döküm yoluyla elde edilen numuneler üzerinde yoğunlaşmıştır. Stellite alaşımlarının lazer kaplama yöntemi ile kaplandığında ince dendritik bir yapıda katılaştığı genel uygulamalarda görüldüğünden, bu tez çalışması ağırlıkça %3, 6 ve 9 oranında Mo içeren Stellite 21 toz karışımı kullanılarak hazırlanan farklı alaşımların lazer kaplama yöntemi ile kaplanarak aşınma ve korozyon davranışlarının incelenmesini kapsamaktadır.

Lazer kaplama yöntemi için yapılan ön çalışmalarda belirlenen optimum parametrelerin kullanımı ile yapılan kaplama kaplamaların yapısal ve mekanik özellikleri incelenerek elde edilen sonuçlar bu bölümde tartışılmıştır.

5.1. Üretilen Alaşımlar ve Yapısal Karakterizasyonları

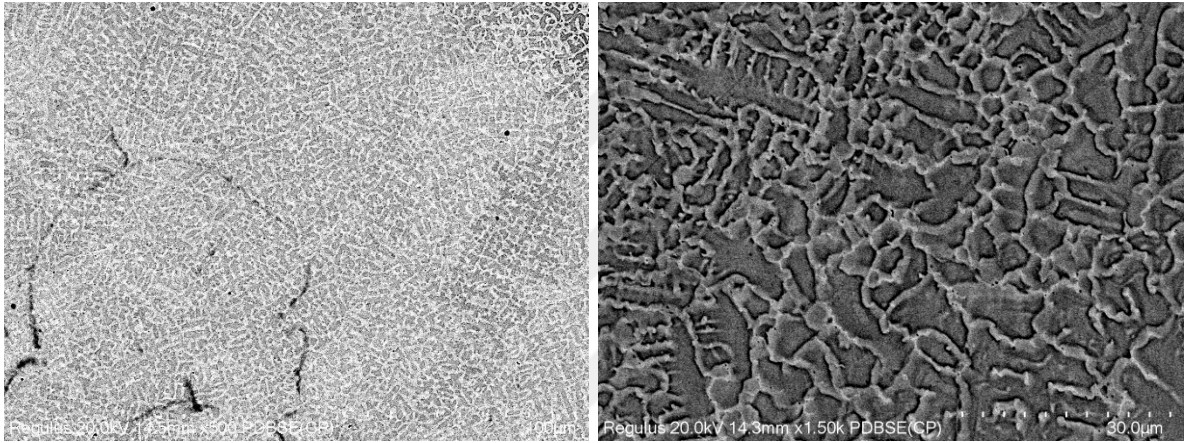
Lazer kaplama ile ağırlıkça %3, 6 ve 9 oranlarında Mo içeren toz karışımlarından üretilen numunelerin hassas taşlama sonrası alınan XRF sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir. Stellite21’in standart koşullarda içerdiği %5,5 Mo oranının, toz karışımına yapılan Mo ilaveleri ile arttığı görülmektedir; ancak kaplama işlemi sırasında toz karışımı içerisinde yüzen Mo tozlarının yanmış olabileceği ve bu nedenle artışın doğrusal olmayabileceği değerlendirilmiştir.

Çizelge 5.1. Kaplama ile kaplanmış numunelerin taşlama sonrası XRF analizleri.

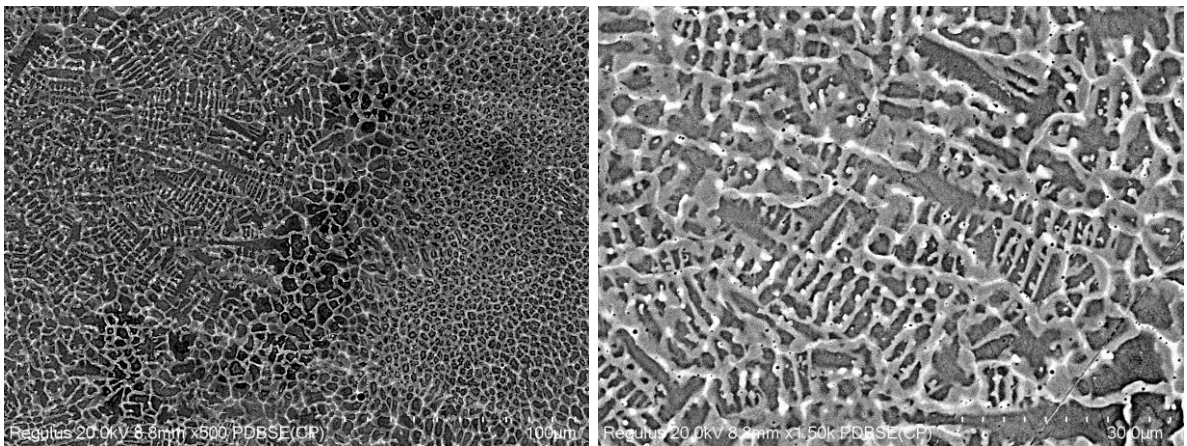
Kaplama Malzemesi	%Co	%Cr	%Mo	%Ni	%Si	%Mn	%W	%Fe
Stellite21	61,98	27,87	5,56	2,22	1,08	0,60	0,05	0,40
Stellite21 + %3Mo	57,67	27,05	8,08	2,08	1,05	0,53	0,08	2,73
Stellite21 + %6Mo	54,97	25,85	9,93	1,91	1,02	0,55	0,07	4,90
Stellite21 + %9Mo	54,70	25,35	13,25	1,89	1,18	0,49	0,06	2,91

Literatürde lazer uygulamasında kullanılan toz karışımı genellikle karıştırma sonrasında kaplanacağı yüzeye sodyum silikat bir bağlayıcı ile ortalama 1 mm olarak, kaplanacağı altlık malzeme yüzeyine, serilmiş ve buna rağmen kaplama alaşımında ağırlıkça ± 1 % oranlarında sapma görülmüştür (Farnia, 2012; Ding vd., 2016).

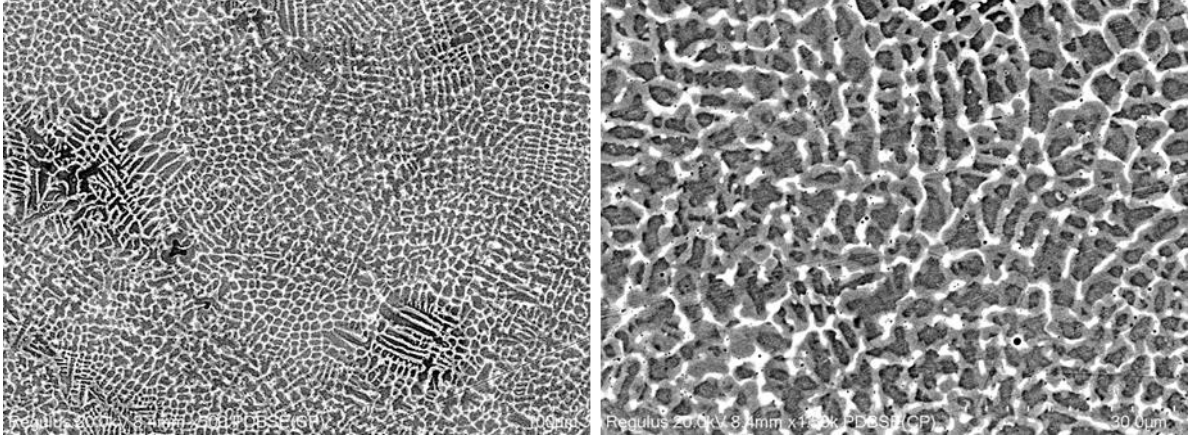
Şekil 5.1 – 5.4’te kaplama ile kaplanan alaşımların geri saçılımlı elektron dedektörü (BSE) kullanılarak alınan 500X ve 1500X büyütmedeki SEM görüntüleri verilmiştir.



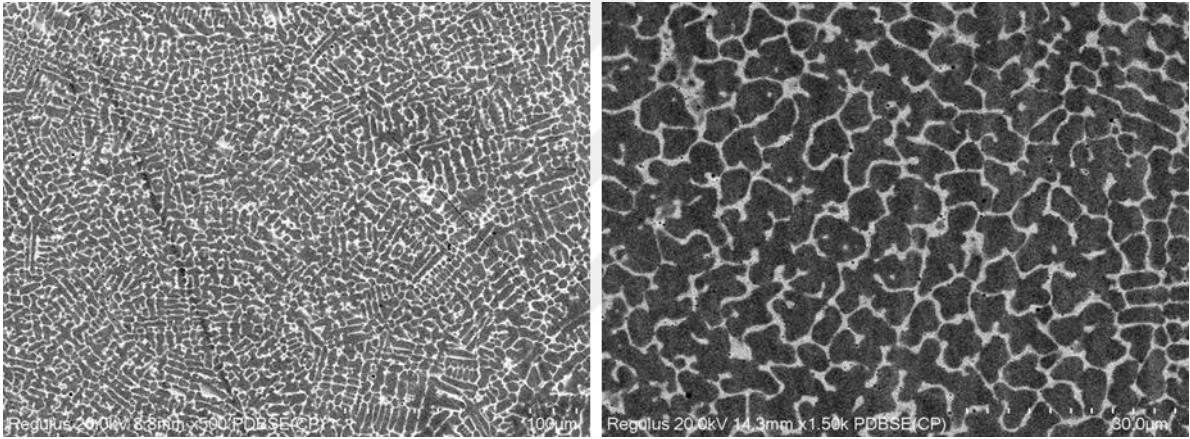
Şekil 5.1. Stellite 21 kaplama alaşımına ait SEM görüntüleri.



Şekil 5.2. %3 Mo ilaveli Stellite 21 kaplama alaşımının SEM görüntüleri.



Şekil 5.3. %6 Mo ilaveli Stellite 21 kaplama alaşımasının SEM görüntüleri.

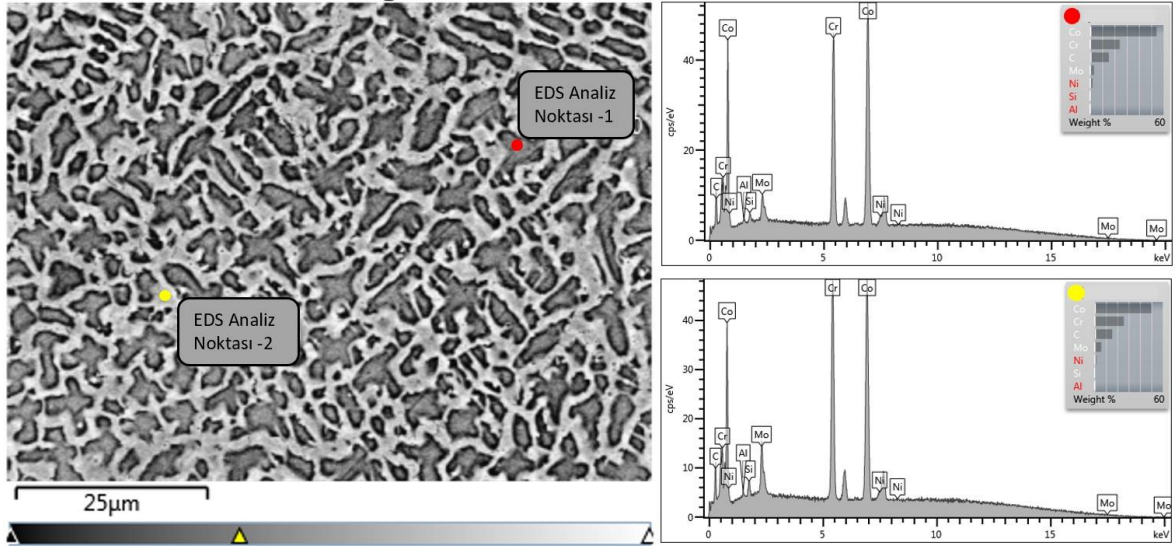


Şekil 5.4. %9 Mo ilaveli Stellite 21 kaplama alaşımasının SEM görüntüleri.

SEM görüntülerinin incelemesi sonucunda tüm numunelerin Co matrisli Stellite alaşımlarının lazer uygulaması sonrasındaki genel karakteristiği olan dendritik yapıda olduğu görülmüştür. Ancak Stellite 21 alaşımında açık gri ile koyu gri fazlardan oluşan yapıda Mo ilavesi ile üçüncü beyaz bir faz oluşmaya başlamıştır. Mo ilavesi %9 olan numunede ise yapıdaki açık gri fazın kaybolduğu, yapının sadece koyu gri ve beyaz fazdan oluştuğu görülmüştür.

Daha detaylı bir inceleme için bu üç farklı bölgeden EDS analizi yapılmıştır. Analiz alınan SEM görüntüleri ve bu fazlara ait EDS analiz Spektrumları Şekil 5.5 – 5.8’de verilmiştir. EDS analizlerine göre koyu gri olarak görülen bölgenin kobaltça zengin matris

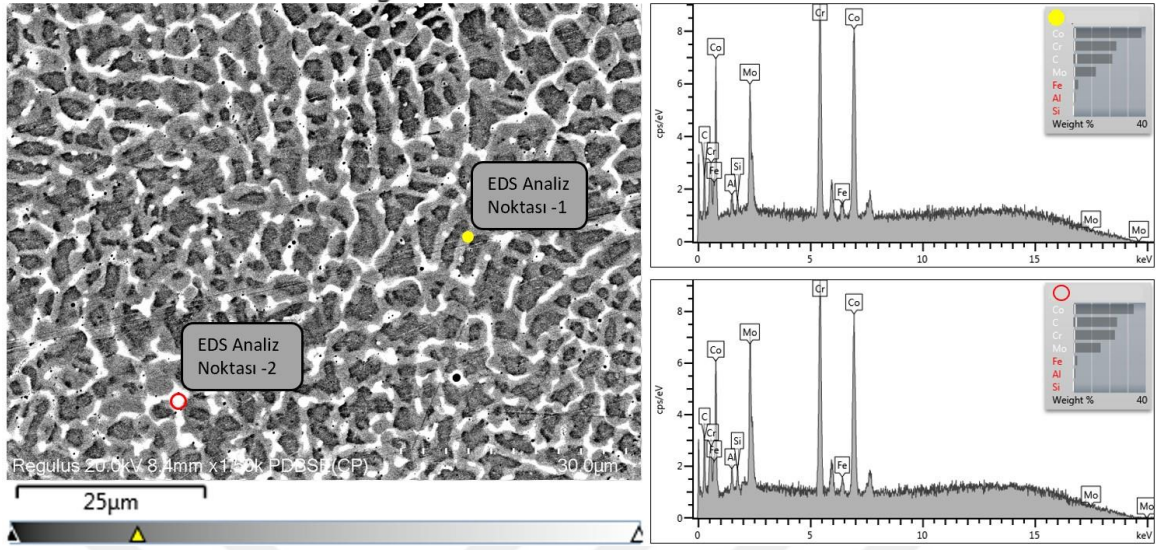
faz, açık gri bölgenin kromca zengin ve beyaz bölgenin molibden bakımından zengin bir faz olduğu ancak; beyaz bölgelerin açık gri bölgeler içerisinde dağıldığı görülmüştür. Düşük karbon içeren Stellite alaşımlarına yapılan Mo ilavesinin, Co_3Mo intermetalik bileşiklerini oluşturduğu daha önceki çalışmalarda bildirilmiştir. Ayrıca intermetalik bileşiklerin yanı sıra katı çözelti içerisinde minör oranda Cr_{23}C_6 ile Cr_7C_3 karbür yapılarının da görülebildiği test edilmiştir (Liu vd., 2015 a; Collier vd., 2020).



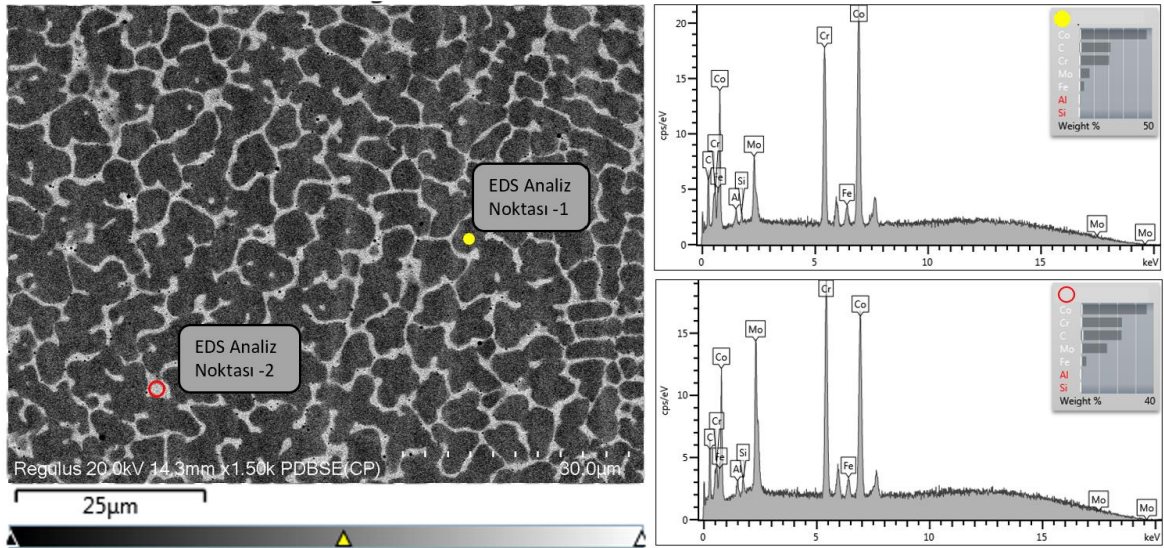
Şekil 5.5. Stellite 21 kaplama alaşımının SEM görüntüsü ve fazlara ait EDS analiz Spektrumları.



Şekil 5.6. %3 Mo ilaveli Stellite 21 kaplama alaşımının SEM görüntüsü ve fazlara ait EDS analiz Spektrumları.

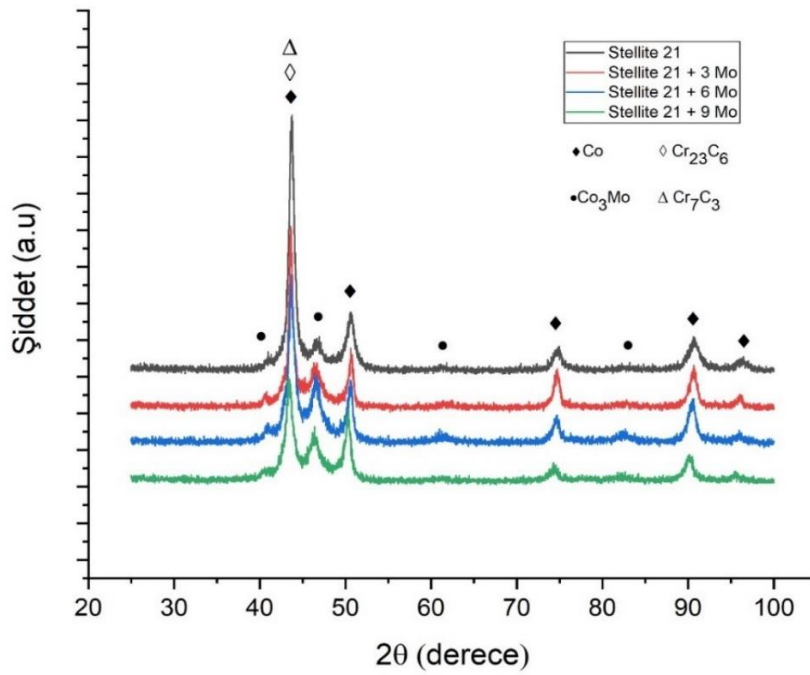


Şekil 5.7. %6 Mo ilaveli Stellite 21 kaplama alaşımlarının SEM görüntüsü ve fazlara ait EDS analiz Spektrumları.



Şekil 5.8. %9 Mo ilaveli Stellite 21 kaplama alaşımlarının SEM görüntüsü ve fazlara ait EDS analiz Spektrumları.

Stellite 21 ve ağırlıkça %3, 6 ve 9 Mo içerikli alaşımlara ait XRD diyagramları Şekil 5.9'da verilmiştir. XRD ve Rietveld analiz sonuçlarından alaşımların YMK yapıdaki Co matris fazı, HSP yapıdaki interdendritik Co_3Mo fazı, YMK yapıdaki M_{23}C_6 ve ortorombik yapıdaki M_7C_3 karbür fazlarından oluştuğu görülmektedir. Fazların dağılım oranları Çizelge 5.2'de verilmiştir.



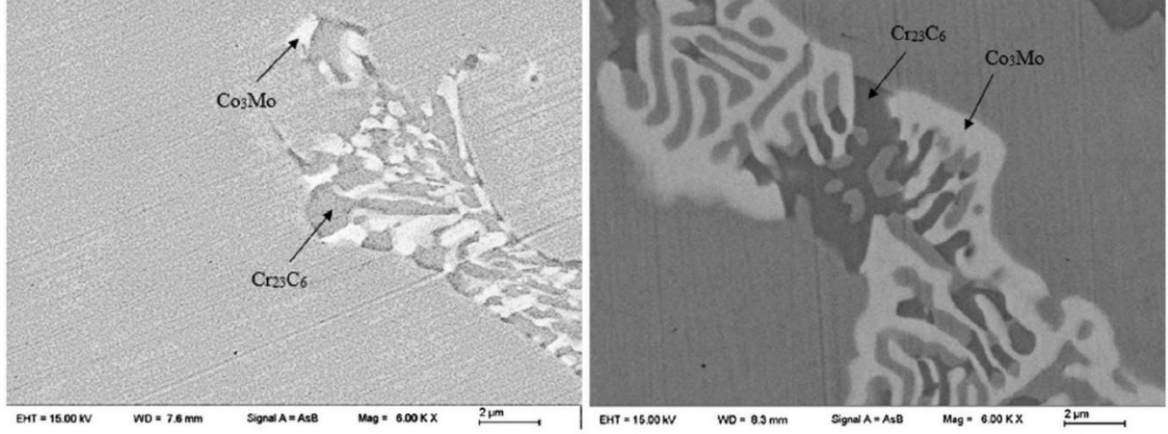
Şekil 5.9. Stellite 21 ve ağırlıkça %3, 6 ve 9 Mo içerikli alaşımlara ait XRD diyagramları.

Çizelge 5.2. Stellite 21 ve ağırlıkça %3, 6 ve 9 Mo içerikli alaşımlara ait (ağırlıkça %) faz oranları.

Faz Oranı (ağ. %)	Stellite 21	Stellite21+ %3 Mo	Stellite21+ %6 Mo	Stellite21+ %9 Mo
Co	91,257	81,699	78,605	74,318
Co₃Mo	4,171	8,155	11,845	11,041
Cr₇C₃	0,956	6,055	6,329	12,12
Cr₂₃C₆	3,615	4,09	3,22	2,52

Alaşımların analizleri SEM görüntülerindeki koyu gri fazın YMK Co katı çözeltisi olduğu; açık gri ve Cr açısından zengin fazın Cr₂₃C₆ ve Cr₇C₃ karbürleri ile beyaz ve Mo açısından zengin fazın ise Co₃Mo intermetalik bileşiği olduğu gösterilmiştir. EDS analizlerinden de görüleceği üzere karbürlerin Co₃Mo intermetalik bileşiklerle karıştığı ve beyaz fazda dağıldığı değerlendirilebilir. Bu durum Liu vd.nin (2015 a) yaptığı çalışma ile paralellik göstermektedir. Öyle ki, bu çalışmada da düşük büyütmelelerdeki SEM görüntülerinde Stellite 21'in %Mo ileveli versiyonlarının gri katı çözelti içerisinde; açık gri ve beyaz olmak üzere, küçük intermetalik bileşikler ve karbürler içeren bir yapıda olduğu

görülmüştür. Ancak, intermetalik bileşiklerin ve karbürlerin açıkça görünmediği düşünülerek 6000X gibi daha yüksek büyütmedeki SEM görüntüleri alınarak, Stellite 21'in çözelti matrisine gömülü laminer yapıdaki küçük Co_3Mo intermetalik bileşikler (beyaz) ve Cr_{23}C_6 karbürleri (gri) içerdiği raporlanmıştır (Bkz. Şekil 5.10).



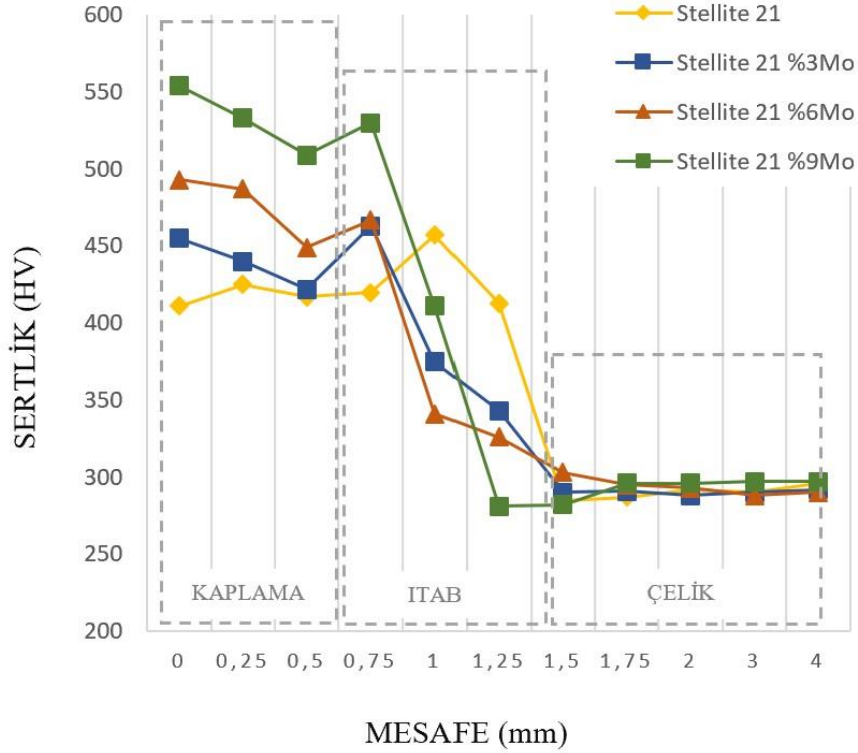
Şekil 5.10. Mo ilaveli Stellite 21 alaşımlarının 6000X SEM görüntüleri; çözelti matrisine gömülü laminer yapıdaki küçük Co_3Mo intermetalik bileşikler (beyaz) ve Cr_{23}C_6 karbürleri (gri) (Liu vd., 2015 a).

5.2. Alaşımların Mekanik Karakterizasyonları

5.2.1. Sertlik ölçümleri

Kaplama sonrasında taşlanan numune yüzeylerinden ve kesitlerinden alınan $\text{HV}_{0.2}$ sertlik ölçüm sonuçları Şekil 5.11'de verilmiştir. Stellite 21'in kaplaması, yaklaşık 411 $\text{HV}_{0.2}$ 'lik ortalama bir değerle en düşük sertliği sergilediği görülmektedir. Mikro sertliğin, kaplamanın üstünden altına doğru kademeli olarak azaldığı Şekil 5.11'de açıkça görülebilmekte ve bu durumun, belirli bir derecede temperlemeye tabi tutulmaya eşdeğer olan, kaplama uygulamasında önceki katman üzerine sonrakini biriktirme işleminin termal etkisinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Isı tesiri altındaki bölgede (ITAB) sertliğin daha yüksek olması, öncelikle lazer enerjisinden etkilenen alt tabakanın (namlu çeliğinin) martensit oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. ITAB sertliğindeki artış literatürde lazer kaplama çalışan farklı araştırmacılar tarafından da görülmüş ve kaplama sırasında bu

bölgenin içindeki alt tabakada meydana gelen faz dönüşümleri ile açıklanmıştır (Farnia vd., 2012; Zhao vd., 2024). Mo alaşımlı Stellite 21 kaplamaların (ağırlıkça %3, 6 ve 9) ortalama sertlikleri ise sırasıyla 455 HV_{0.2}, 493 HV_{0.2} ve 554 HV_{0.2} ölçülmüştür. Kaplamaların sertliklerinin Mo ilavesi ile paralel olarak sırasıyla %11, %20 ve %35 artığı görülmektedir.



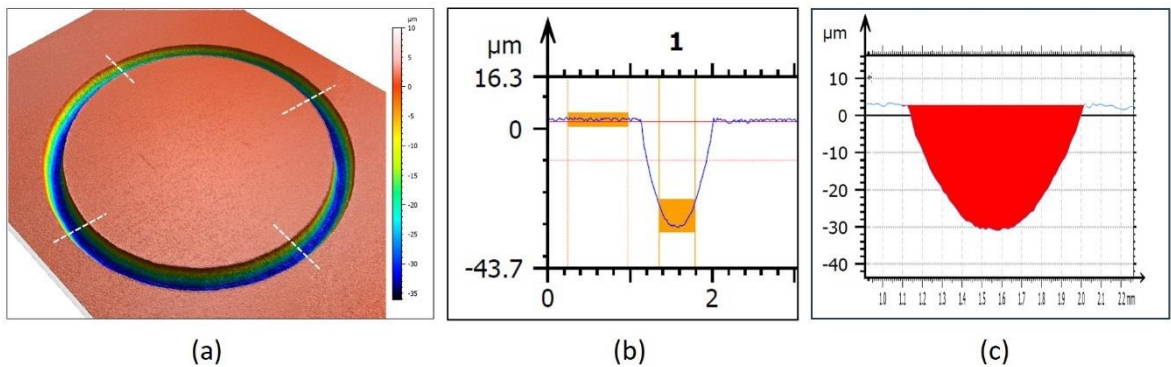
Şekil 5.11. Stellite 21 ve Mo'li alaşımlarının sertlik ölçüm sonuçları.

Mo ilaveli yeni alaşımların Stellite 21'den daha yüksek sertliğe sahip olması, ağırlıkça %Mo ilavesi ile artan Co₃Mo intermetalik bileşiklerinin Stellite alaşımlarının sertliğini artırmış olabileceği şeklinde yorumlanmıştır. Bu durum Stellite alaşımlarındaki Mo ilavelerini inceleyen araştırmacılar tarafından benzer şekilde yorumlanmıştır (Malayoglu ve Neville, 2005; Kapoor, 2012, Liu vd. 2015 a; Alhattab vd. 2020; Collier vd. 2020). Ancak alaşımların içerdiği karbür seviyelerinin de sertlik sonuçlarına etkisinin olduğu düşünülmektedir. Öyle ki, intermetalik bileşik oranının hemen hemen aynı olduğu ağırlıkça %6 ve %9 Mo ilaveli alaşımların sertlikleri karşılaştırıldığında, %9 Mo içeren numunenin sertliğinin %15 daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durumun, alaşımların

içerdikleri karbür oranlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Mo içeren alaşımların Cr_{23}C_6 karbür oranları yakinken, ağırlıkça %9 Mo içeren alaşımın Cr_7C_3 karbür oranı diğerlerine göre iki katıdır. Bu durum Kapoor'un (2012) farklı alaşımlardaki Stellite numuneleri üzerinde yaptığı çalışmasında, yüksek miktarlarda Cr_7C_3 karbür görülen alaşımların sertliklerinin daha yüksek olması sonucu ile örtüşmektedir. Öyle ki çalışmada yapılan indentasyon testinde Cr_7C_3 tipi karbürlerin diğer karbürlerden daha yüksek sertlikte olduğu görülmüştür.

5.2.2. Aşınma testleri

Test edilen her alaşım numunesinin aşınma direnci, aşınma izinin hacmine eşit olan hacim kaybıyla ilişkilendirilmiştir. Numunelerin aşınma izleri dijital olarak taranıp, toplam hacim kaybı çıkarılmıştır (Bkz. Şekil 5.12). Her aşınma izi için, aşınma izi boyunca dört konum düzgün bir şekilde seçilerek; kesit profilleri sunulmuştur. Kesit profilleri üzerinden aşınma izinin derinliği, genişliği ve kesit alanı hesaplanmıştır. İlgili hesaplamalar, aşınma test cihazının yüzey profili ölçüm sistemini içeren yazılımı üzerinden otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma testlerinin sonuçları, her alaşım için üç testin ortalaması şeklinde elde edilmiştir.

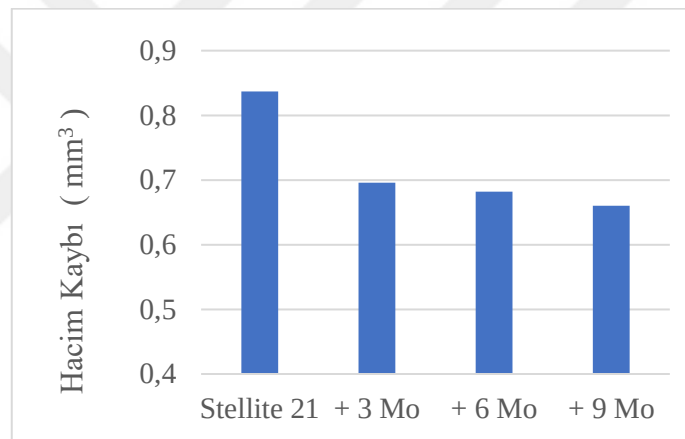


Şekil 5.12. Alaşımların aşınma testleri sonrasında (a) hacim kaybı tespiti için dijital olarak taranan aşınma izi ve kesit profillerinin çıkarıldığı dört konum, (b) aşınma izinin derinlik ve genişlik ölçümleri ile (c) hesaplanan kesit alanı.

Stellite 21 ve Mo ilaveli alaşımlarının oda sıcaklığındaki aşınma testlerinde elde edilen bulgular Çizelge 5.3 ve Şekil 5.13’ te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Oda sıcaklığında yapılan aşınma testlerinin aşınma izi profilleri.

Oda Sıcaklığı	Derinlik (mm)	Genişlik (mm)	Kesit Alanı (mm ²)
Stellite 21	35,2	0,991	0,0248
Stellite 21 + %3 Mo	33	0,947	0,0236
Stellite 21 + %6 Mo	32,1	0,939	0,0217
Stellite 21 + %9 Mo	29,5	0,875	0,019

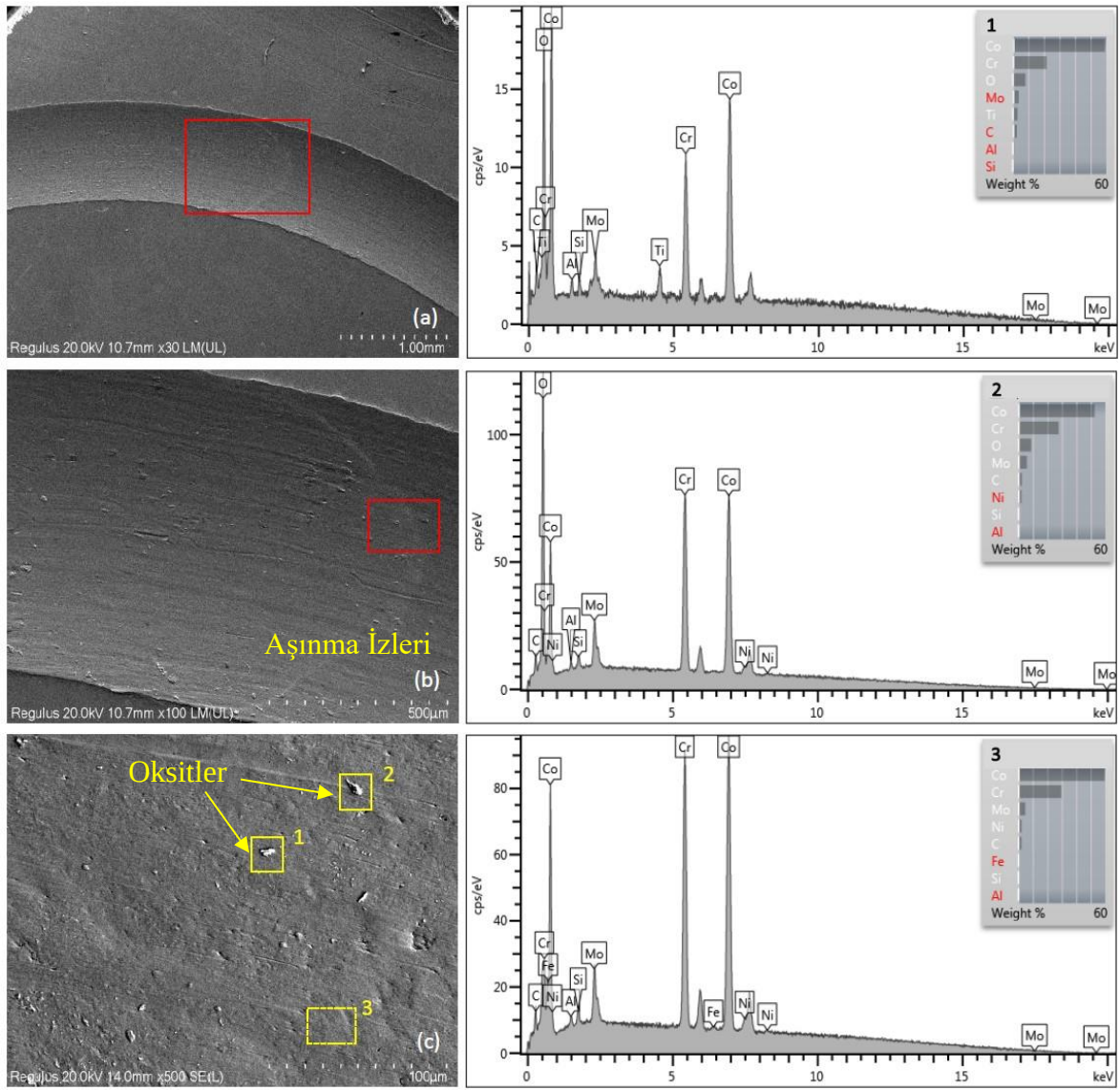


Şekil 5.13. Stellite 21 ve Mo ilaveli alaşımlarının oda sıcaklığındaki aşınma testlerindeki hacim kayıpları (mm³).

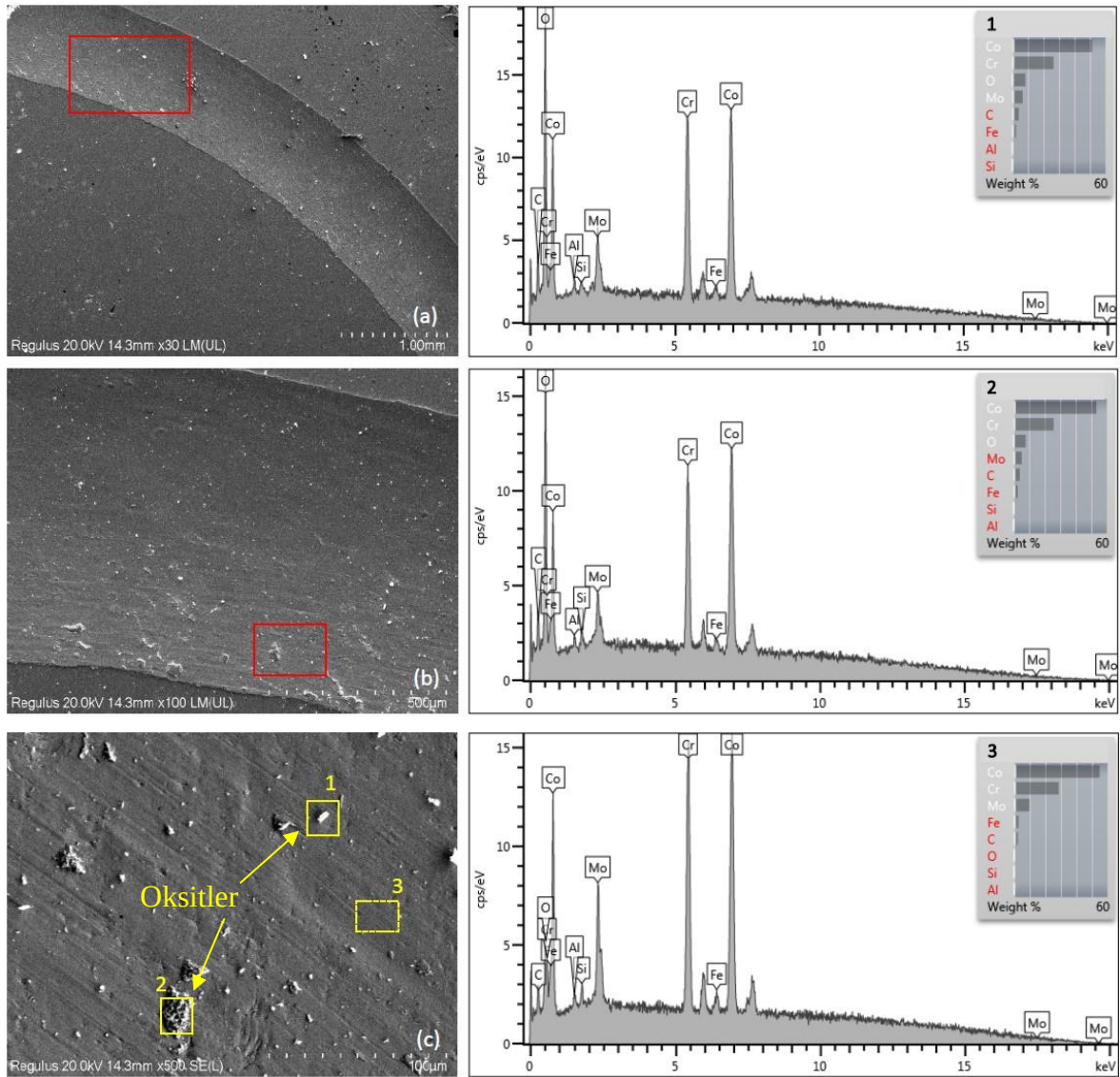
Oda sıcaklığında yapılan aşınma testlerinin sonuçları karşılaştırıldığında %Mo ilavesi arttıkça aşınma izinin profiline küçüldüğü ve hacim kaybının azaldığı görülmüştür. Stellite 21 ile ağırlıkça %3, 6 ve 9 Mo ilaveli alaşımlarının aşınma kayıplarındaki iyileşmeler sırasıyla %17, 19 ve 21’dir. Bu durum %Mo ilavesi ve sertlik artışı ile de paralellik göstererek; ‘aşınma dayanımının malzemelerin sertliği ile paralel olarak arttığı’ yönündeki hipotez ile örtüşmektedir (Kapoor, 2012; Liu vd., 2015 a). Bu hipotez, sertliğin katı bir malzemenin kalıcı deformasyona karşı direncinin bir ölçüsü olduğu gerçeğine dayanmaktadır. Literatürdeki benzer çalışmalarda da Stellite alaşımlarındaki intermetalik bileşik ve karbür hacim oranı arttıkça artan sertlik ile paralel olarak aşınma dayanımının arttığı

bildirilmiştir (Kapoor, 2012; Liu vd., 2015 a; Collier vd., 2020). Bu çalışmada da Stellite ve alaşımlarının oda sıcaklığındaki testlerde artan aşınma dayanımı, yapısal karakterizasyonda değinilen ve %Mo ilavesi ile artan Co_3Mo intermetalik bileşiği ile ilişkilendirilmiştir.

Aşınma testi sonuçlarını daha iyi anlamak ve Stellite alaşımlarının aşınma mekanizmalarını detaylandırabilmek için, test edilen numunelerin aşınmış yüzeyleri SEM altında incelenmiş ve EDS analizleri alınmıştır. Numunelerin oda sıcaklığı testlerinden aşınmış yüzey morfolojilerinin görüntüleri Şekil 5.14 ile Şekil 5-17'de verilmiştir.



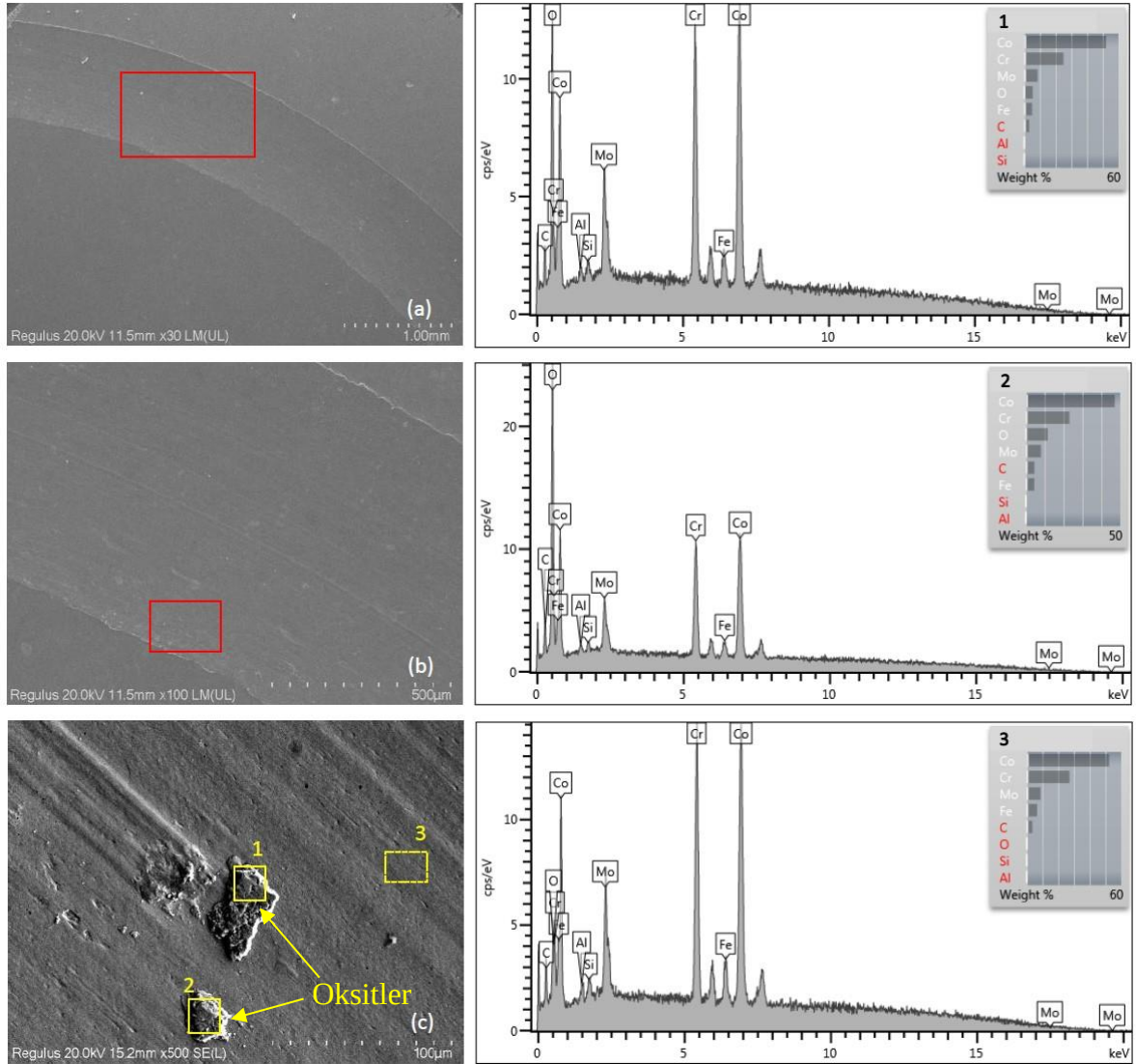
Şekil 5.14. Stellite 21 alaışımının oda sıcaklığındaki aşınma testlerinden (a) 30x, (b) 100x ve (c) 500x büyütmedeki yüzey görüntüleri ile (c) 500x üzerinde işaretlenmiş alanlardan alınan EDS analizleri.



Şekil 5.15. Stellite 21'in %3 Mo ilaveli alaşımının oda sıcaklığındaki aşınma testlerinden (a) 30x, (b) 100x ve (c) 500x büyütmedeki yüzey görüntüleri ile (c) 500x üzerinde işaretlenmiş alanlardan alınan EDS analizleri.

Oda sıcaklığında yapılan testlerin sonrasında aşınma izleri SEM altında incelendiğinde abrazyondan kaynaklanan aşınma olukları kayma yönünde hizalandığı görülmüştür. Bu tipik oluk izleri, yüzeyde aşınmaya karşı plastik deformasyon meydana geldiği anlamına gelmektedir. Ayrıca yüzeyde yer yer yapışmış oksit partikülleri ve mikro çatlaklar görülmüştür. Oda sıcaklığında aşınma testinde oksidasyon, yalnızca aşınan yüzeylerin birbirine sürtünmesi sonucu oluşan sürtünme ısısının olduğu temas yüzeylerinde meydana gelebileceğinden düşük oranda görülmektedir. Mikro çatlaklar ise, yapıdaki sert ama kırılgan intermetalik bileşiklerin aşınma testi sırasındaki mekanik etkiler

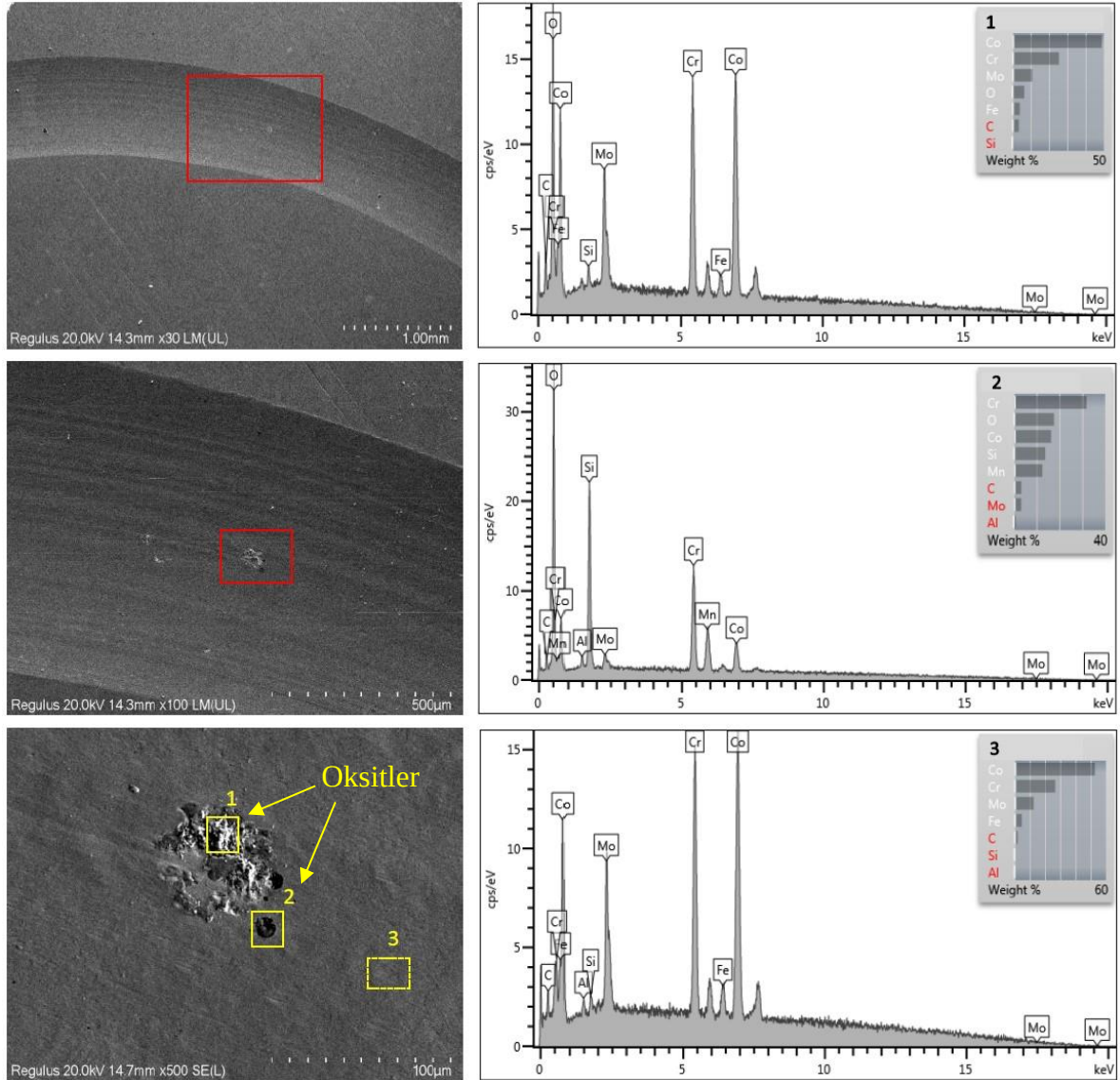
altında kırılması ya da çatlaklara neden olması ile ilişkilendirilmektedir. Yüzeylerden alınan EDS alan analizlerinde, alaşımda ağırlıkça artan %Mo oranı ile paralel olarak Mo yoğunluğunun arttığı değerlendirilmiştir.



Şekil 5.16. Stellite 21'in %6 Mo ilaveli alaışımının oda sıcaklığındaki aşınma testlerinden (a) 30x, (b) 100x ve (c) 500x büyütmedeki yüzey görüntüleri ile (c) 500x üzerinde işaretlenmiş alanlardan alınan EDS analizleri.

Literatürdeki benzer çalışmalarda Stellite 21'in yapıdaki Co matris ve intermetaliklerinin farklı davranışından dolayı adhezif ve abrasif olmak üzere iki farklı aşınma şekli sergilediği değerlendirilmiştir. Alaışımın Co esaslı matrisinde adhezyon kaynaklı aşınma sürerken oksit ve katı çözelti kalıntılarından kaynaklanan abrasif aşınma da

görülmektedir. Ancak Mo alaşımlarında intermetalik bileşiklerin kırılıp parçalanmasından kaynaklandığı değerlendirilen sert partiküller, üçüncü gövde aşındırıcı olarak abrazif aşınma mekanizmasına dahil olmaktadır (Liu vd., 2015 a; Collier vd., 2020).



Şekil 5.17. Stellite 21'in %9 Mo ilaveli alaışımının oda sıcaklığındaki aşınma testlerinden (a) 30x, (b) 100x ve (c) 500x büyütmedeki yüzey görüntüleri ile (c) 500x üzerinde işaretlenmiş alanlardan alınan EDS analizleri.

Bu tez çalışmasındaki bulgular da sürtünme ısısından kaynaklanan yüzeylerdeki aşınma izleri ve çatlamış/kırık oksit katmanları ile karakterize edilen aşınma mekanizması, literatürdeki adhezif ve abrazif aşınmanın birleşimi ile çalışan Stellite 21 aşınma

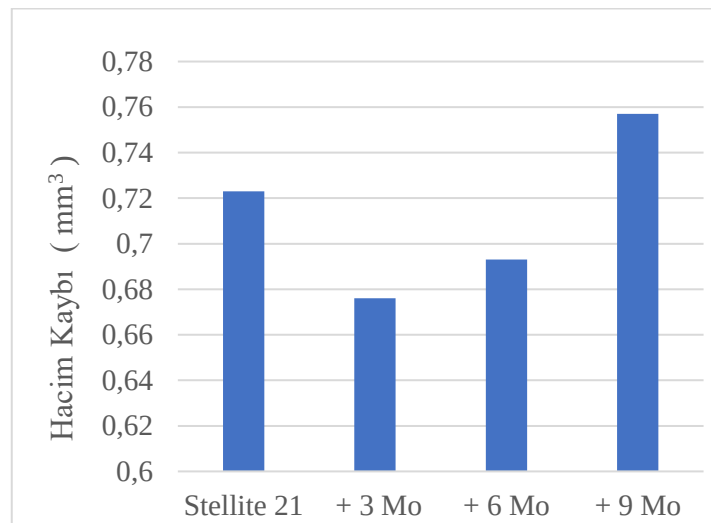
mekanizması ile uyuşmaktadır. Ancak yüzeydeki yoğun oluk izlerinden kaynaklı olarak baskın mekanizmanın abrazif aşınma olduğu değerlendirilmiştir.

Aşınma izlerinin SEM altında incelenmesine ilave olarak, aşınma testlerinde numuneye özel olarak ayrı ayrı kullanılan bilyalar da optik mikroskop altında incelenmiş ve Denklem 4.1 ile 4.2 uyarınca hacim kayıpları hesaplanmıştır. Ancak aşınan bilyalardaki hacim kayıpları benzer ve çok düşük olduğundan göz ardı edilmiştir.

Stellite 21 ve Mo ilaveli alaşımlarının 500 °C sıcaklığındaki aşınma testlerinde elde edilen bulgular ise Çizelge 5.4 ve Şekil 5.18’ de verilmiştir.

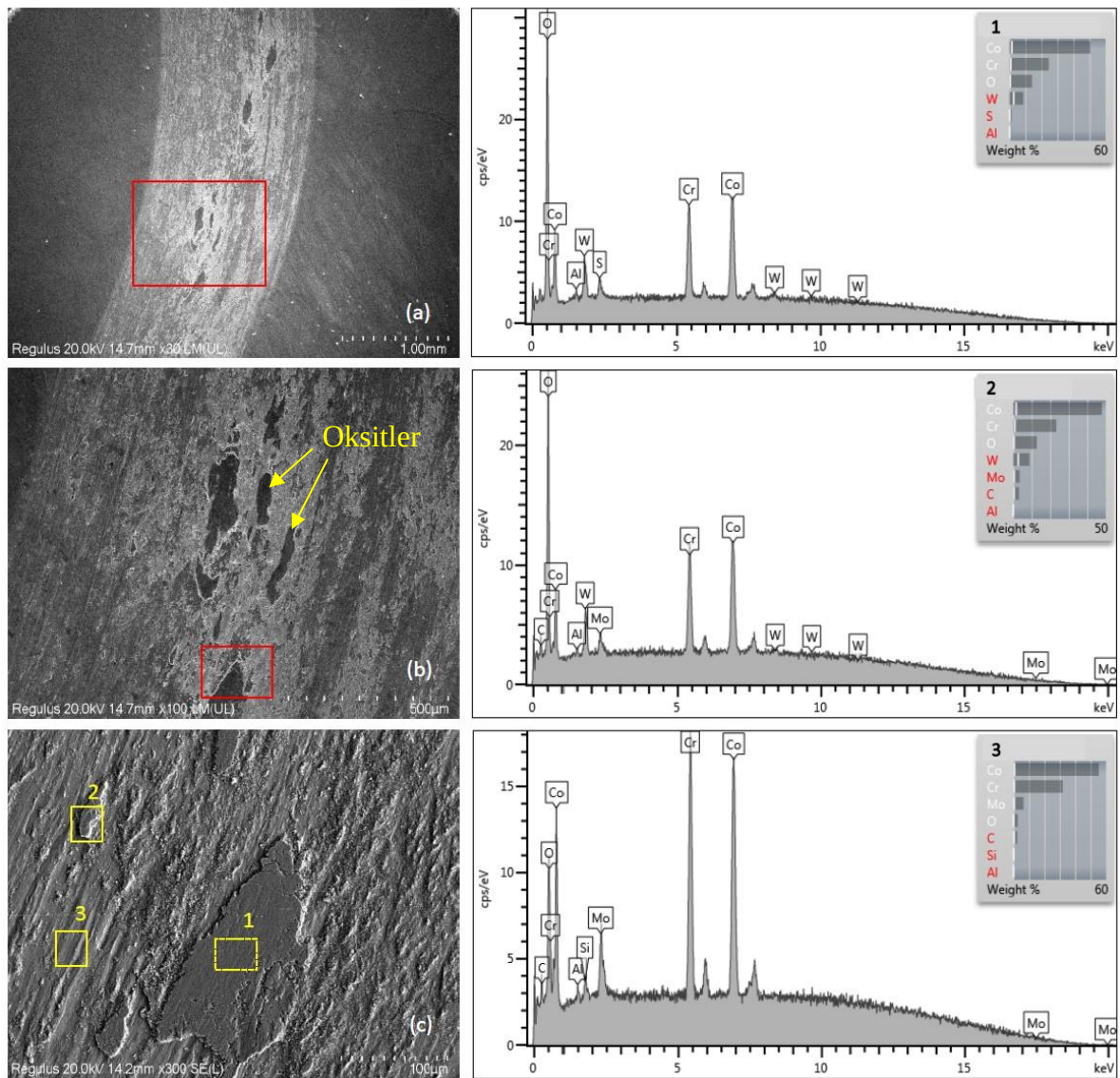
Çizelge 5.4. 500 °C sıcaklığında yapılan aşınma testlerinin aşınma izi profilleri.

Oda Sıcaklığı	Derinlik (mm)	Genişlik (mm)	Kesit Alanı (mm ²)
Stellite 21	29,45	1,53	0,0312
Stellite 21 + %3 Mo	28,25	1,45	0,0276
Stellite 21 + %6 Mo	19,3	0,96	0,017
Stellite 21 + %9 Mo	25,4	1,21	0,019

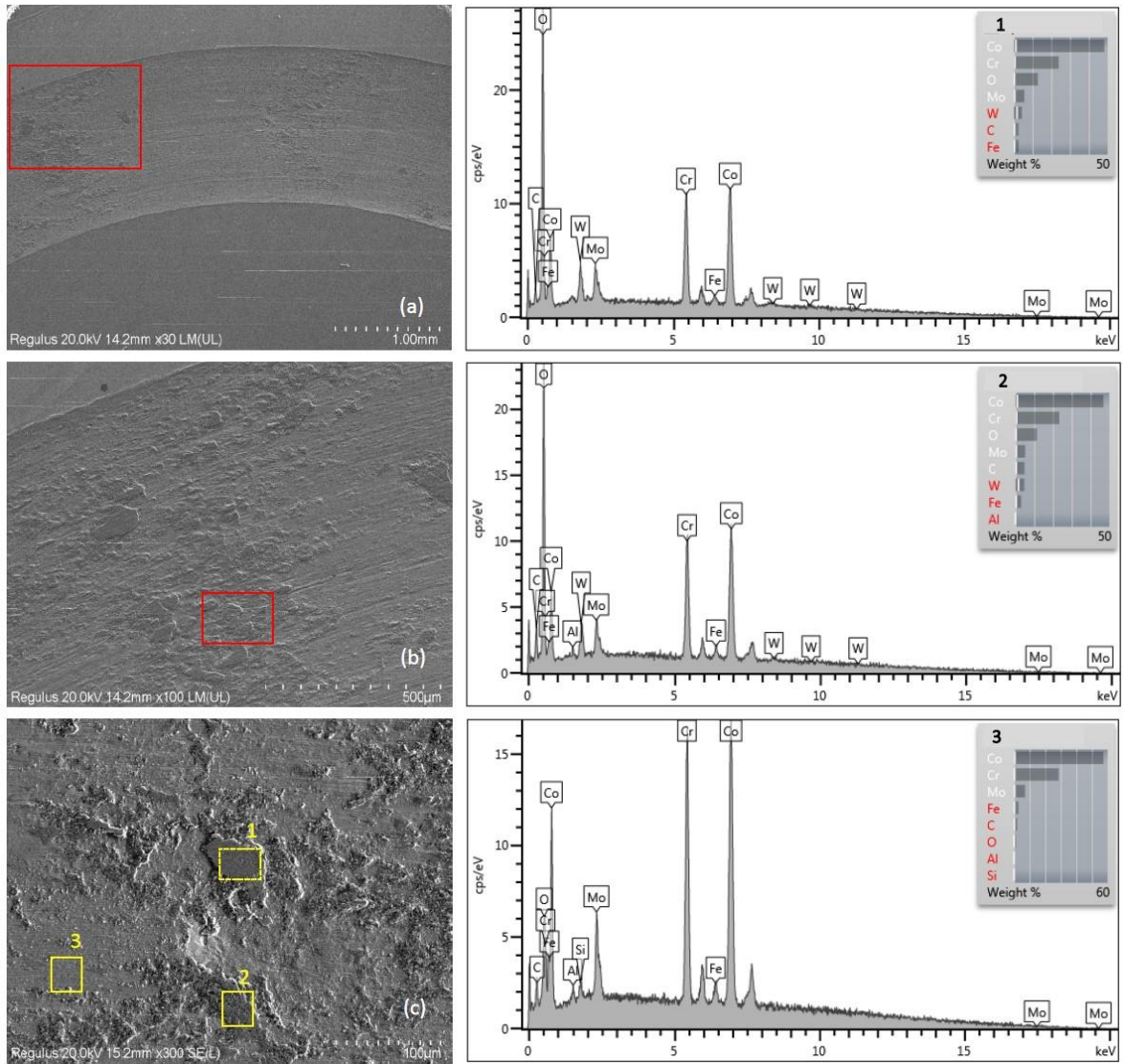


Şekil 5.18. Stellite 21 ve Mo ilaveli alaşımlarının 500 °C sıcaklığındaki aşınma testlerindeki hacim kayıpları (mm³).

500°C’de yapılan aşınma testlerinde, oda sıcaklığındaki testlere göre daha düşük hacim kaybı görülsede sertlik artışı ile paralel bir iyileşme görülmemiştir. Aşınma profilinin ve aşınma kesitinin Mo ilavesi ile küçüldüğü ancak; ağırlıkça %6 ve %9 Mo ilaveli numunelerde yakın değerlerde olduğu görülmüştür (Bkz. Çizelge 5.4). Ancak bu durumun aşınma yüzeyinin tamamından alınan hacim kaybı ile uyuşmadığı değerlendirilmiştir. Aşınma mekanizmasını daha iyi anlamak ve uyuşmazlıkları irdeleyebilmek adına aşınma yüzeyleri SEM altında incelenmiş ve EDS analizleri alınmıştır (Bkz. Şekil 5.19 – Şekil 5.22).

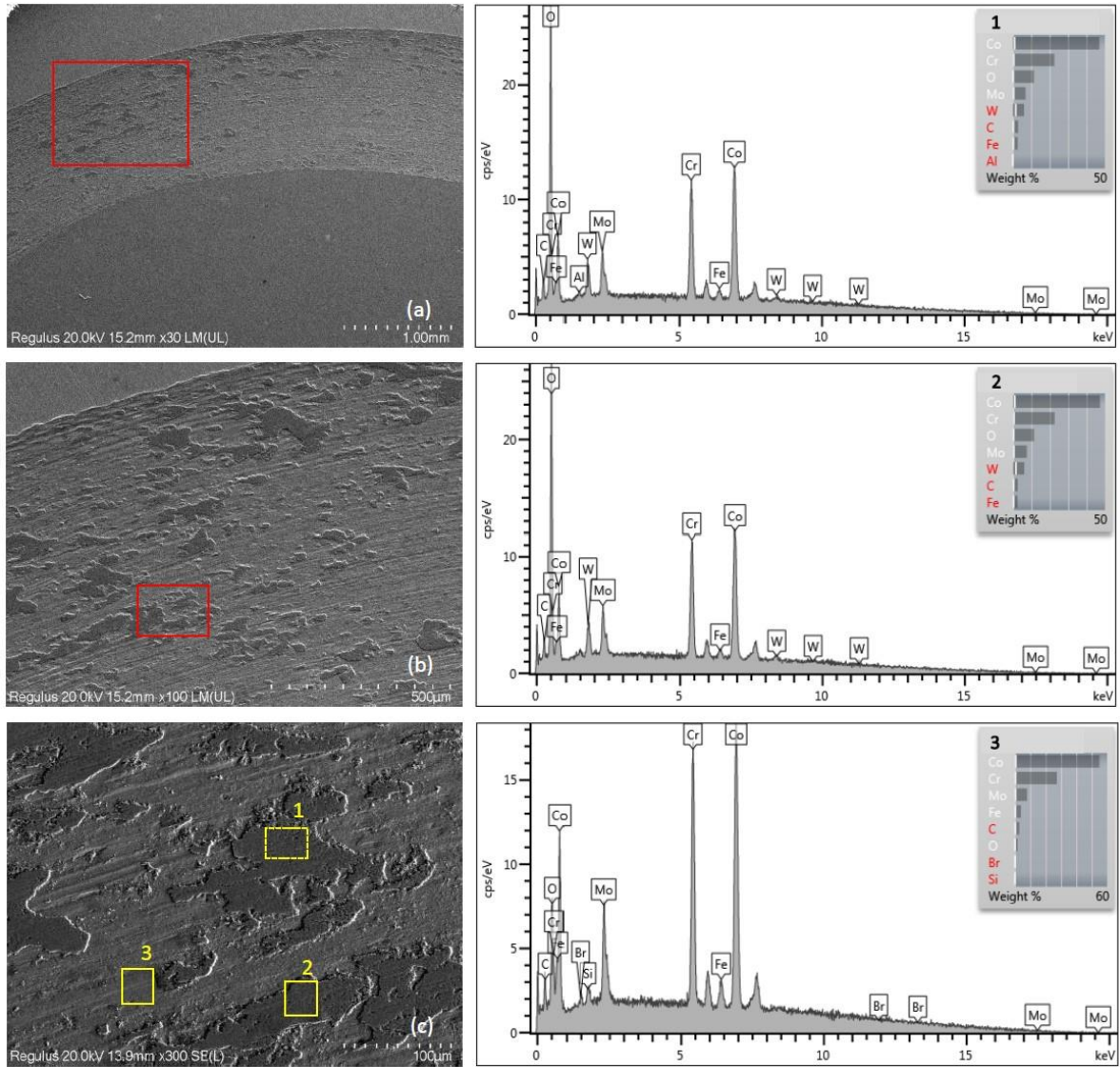


Şekil 5.19. Stellite 21 alaşımının 500 °C’deki aşınma testlerinden (a) 30x, (b) 100x ve (c) 500x büyütmedeki yüzey görüntüleri ile (c) 500x üzerinde işaretlenmiş alanlardan alınan EDS analizleri.



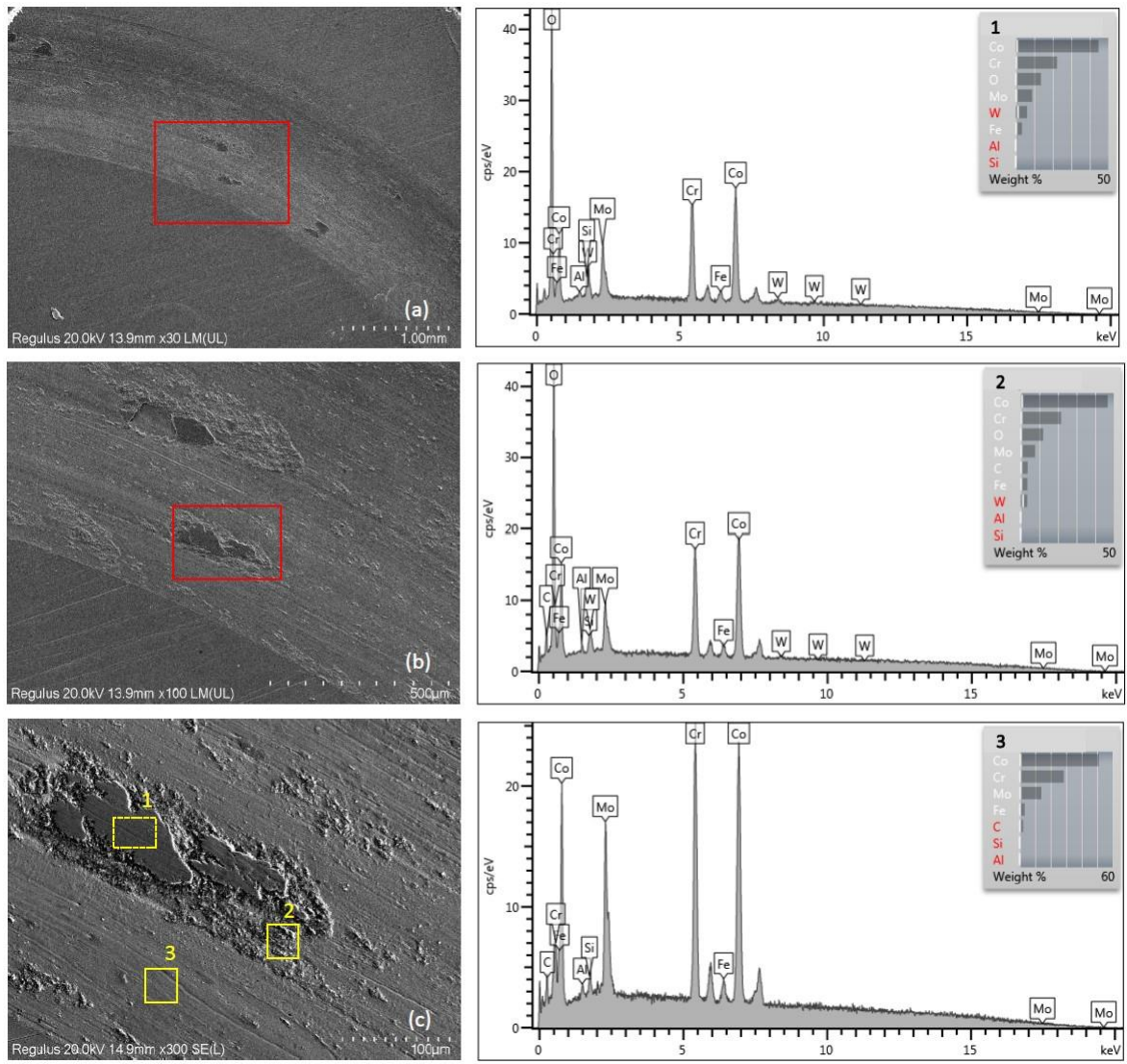
Şekil 5.20. Stellite 21'in %3Mo alaşımasının 500 °C'deki aşınma testlerinden (a) 30x, (b) 100x ve (c) 500x büyütmedeki yüzey görüntüleri ile (c) 500x üzerinde işaretlenmiş alanlardan alınan EDS analizleri.

Yüksek sıcaklık aşınma yüzeyleri SEM altında incelendiğinde, oda sıcaklığındaki görüntüler ile benzer şekilde abrazif aşınma oluklarının kayma yönünde hizalandığı ve yüzeylerin daha düşük oranla mikro çatlak içerdiği görülmüştür. Ancak oda sıcaklığındaki testlerde yer yer görülen oksitlerin aksine, yüksek sıcaklık aşınma testleri sonrasında yüzeyde yoğun tabakaların oluştuğu ve tabakaların farklı yerlerinden alınan EDS analizleri ile oksit tabakaları olduğu görülmüştür. EDS analizleri sonrasında yüzeyde alaşım içerisinde bulunmayan W elementinin de tespit edildiği görülmüştür. W'in aşınma yüzeyine WC+Co bileşimindeki aşındırıcı bilyadan gelmiş olabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 5.21. Stellite 21'in %6Mo alaşımlarının 500 °C'deki aşınma testlerinden (a) 30x, (b) 100x ve (c) 500x büyütmedeki yüzey görüntüleri ile (c) 500x üzerinde işaretlenmiş alanlardan alınan EDS analizleri.

Literatürde Stellite alaşımlarının yüksek sıcaklıklardaki aşınma davranışlarını inceleyen çalışmalarda, genellikle 450 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda aşınma yüzeylerinde yoğun oksit tabakası oluşumu raporlandırılmıştır (Kapoor, 2012; Alhattab vd., 2020). Çalışmalarda Cr içeriği yüksek alaşımların oksitlenme direncinin yüksek olduğu belirtilse de genel olarak oluşan oksit tabakasının aşınma testindeki mekanik etki ile kırılıp, aşınma kaybına dahil olduğu değerlendirilmiştir. Bu durum Kapoor'un (2012) çalışmasında Stellite alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda aşınma kaybının artmasının nedeni olarak değerlendirilmiştir.

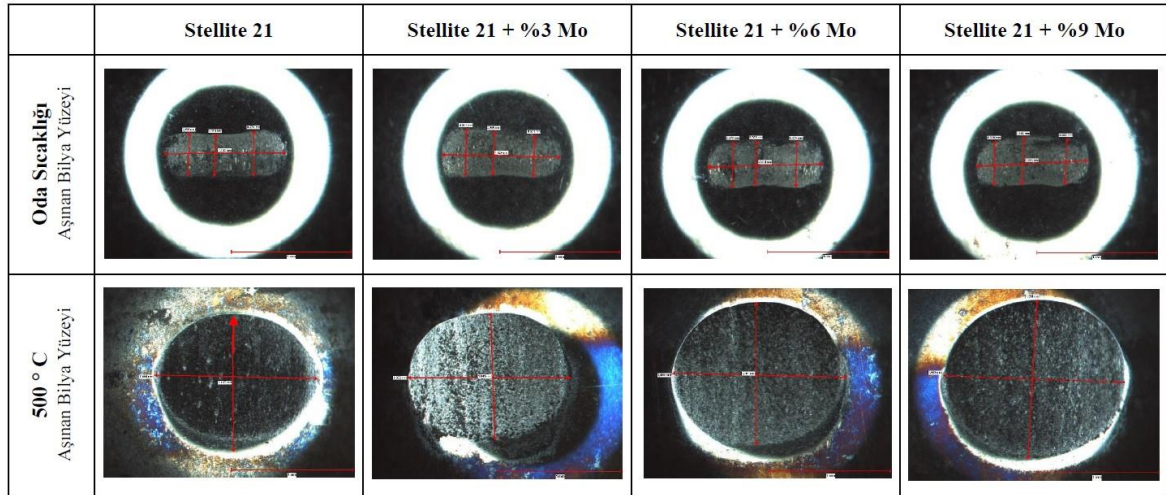


Şekil 5.22. Stellite 21'in %9Mo alaşımasının 500 °C'deki aşınma testlerinden (a) 30x, (b) 100x ve (c) 500x büyütmedeki yüzey görüntüleri ile (c) 500x üzerinde işaretlenmiş alanlardan alınan EDS analizleri.

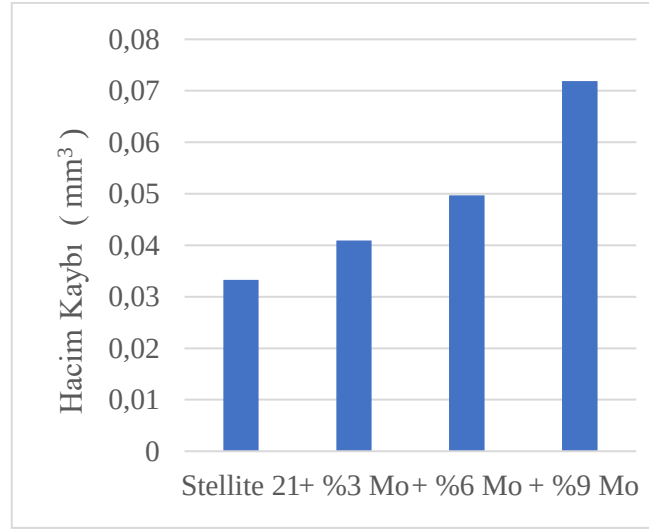
Yüksek sıcaklıklarda aşınmanın mekanik etkileri nedeniyle katı çözeltide oluşan dislokasyonlar, artan atom hareketi nedeniyle daha da kötüleşerek aşınma yüzeyini gerinimsertleşmesine neden olmaktadır. Bu süreçte, hem yüksek sıcaklık hem de indüklenen stresin katı çözeltilerin YMK -> HSP dönüşümünü desteklediği ve böylelikle yüzey sertleşmesine katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Bu alaşımlarda yüzey sertleşmesinin sadece aşınmış bölgede meydana geldiği, yüksek sıcaklıklarda genel yüzeyin yine de yumuşayabileceği ifade edilmektedir (Liu vd., 2004). Diğer bir deyişle, aşınma işlemi sırasında sadece aşınan bölgede meydana gelen yüzey sertleşmesi sonucunda, malzeme yüzeyinden kopan ince ve

sert parçacıklar, yüksek sıcaklıklarda aşınma yükü altında çözelti matrisine saplanabilir ve malzemenin aşınma kaybını etkileyebilir. Malzemelerin yüksek sıcaklık aşınma testlerindeki yüzey morfolojisinde görülen büyük plastik deformasyon izleri, literatürdeki bu bulgu ile örtüşmektedir. Bazı çalışmalarda bu mekanizma ‘camlama’ olarak isimlendirilmiş ve Stellite alaşımlarının yüksek sıcaklıklardaki aşınma dayanımını artırdığı değerlendirilmiştir (Kapoor, 2012; Stott vd.den (1973)).

Aşınma izlerinin SEM altında incelenmesi ve EDS analizlerinde W ile karşılaşılması üzerine, aşınma testlerinde numuneye özel olarak ayrı kullanılan bilyalar da optik mikroskop altında incelenmiş (Bkz. Şekil 5.23) ve Denklem 4.1 ile 4.2 uyarınca hacim kayıpları hesaplanmıştır (Bkz. Şekil 5.24). Oda sıcaklığındaki testlerde kullanılan bilyaların aksine, yüksek sıcaklık aşınma testlerinde kullanılan bilyaların hacimsel olarak aşınma kaybına uğradığı görülmektedir. Stellite alaşımına yapılan ağırlıkça %Mo eklentisi ile paralel olarak bilyadaki aşınma hacim kaybı artmaktadır. Bu durum EDS analizlerinde kaplamanın aşınma yüzeyinde tespit edilen W’in bilyadan geldiğini doğrulamaktadır. WC+Co bilyanın aşınmasında camlama etkisi ile sertleşen yüzeyin etken olabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 5.23. Oda sıcaklığı ve 500 °C sıcaklıktaki aşınma testlerinde kullanılan bilyaların aşınmış yüzey görüntüleri.



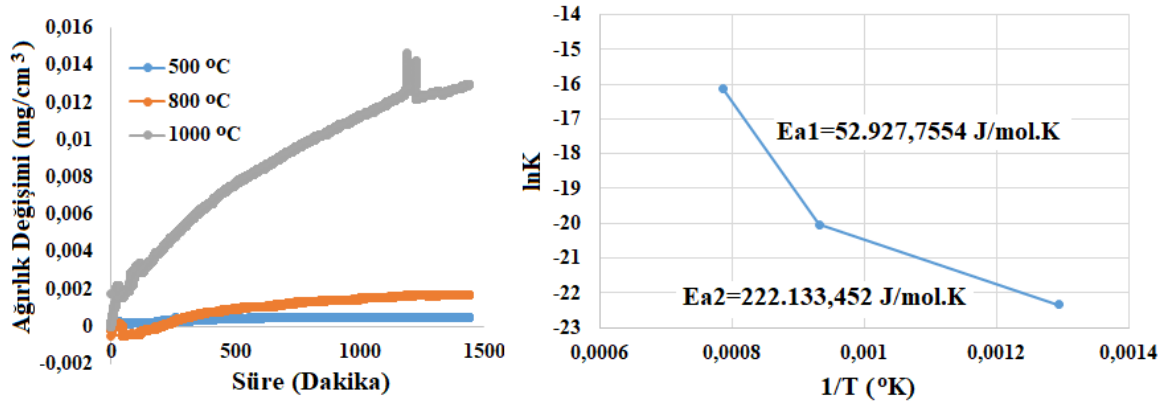
Şekil 5.24. 500 °C sıcaklıktaki aşınma testlerinde kullanılan bilyaların hesaplanan hacim kayıpları.

Yüksek sıcaklıkta yapılan aşınma testlerinde genel olarak, oda sıcaklığındaki adhezif ve abrazif aşınmanın daha şiddetli versiyonunun çalıştığı ve bu ortak aşınma mekanizmasına oksidatif aşınmanın da ilave olduğu görülmüştür. Yüzey sertleşmesi sonucu gelişen camlama etkisinin alaşımın aşınma direncini artırdığı ancak; Mo alaşımlarında intermetalik bileşiklerin kırılıp parçalanmasından kaynaklandığı değerlendirilen sert partiküllere ek olarak, oksidatif aşınma ile gelişen geniş oksit tabakalarının kırılması ile oluşan partiküller ve aşındırıcı bilyadan gelen W içerikli partiküllerin de abrazif aşınmaya dahil olduğu değerlendirilmiştir. Aşınma yüzeyine dahil olan bu partiküller, alaşımların yüksek sıcaklıklarda aşınma kaybının artmasının nedeni olarak değerlendirilmiştir.

5.3. Oksidasyon Çalışmaları

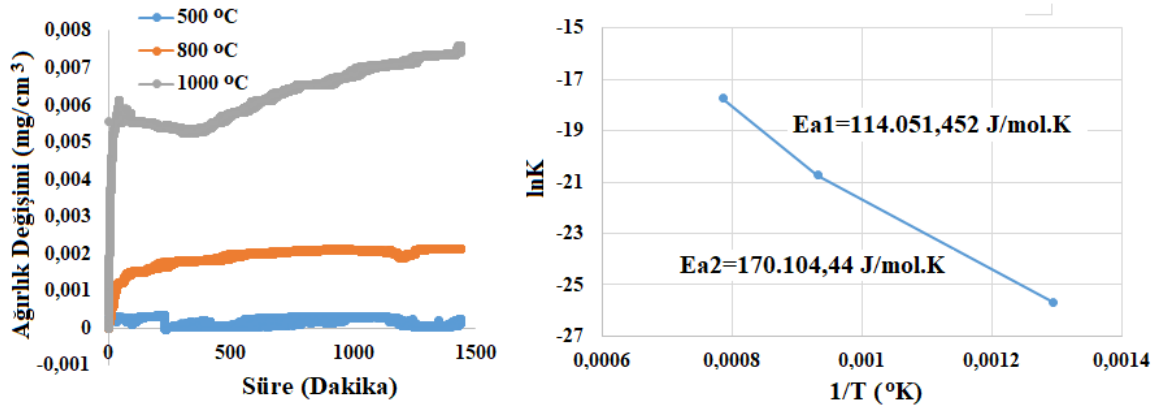
Stellite 21 alaşımlarına ilave edilen Mo elementinin, alaşımın yüksek sıcaklıklardaki oksitlenme özelliklerine etkisinin incelenmesi için termogravimetrik analiz verilerinden yararlanılmıştır. İlk etapta Stellite 21 için 500, 800 ve 1000 °C’ de 24 saat oksitlenmesi sonrasındaki ağırlık artışları ile $\ln K$ ve $1/T$ arasında çizilen Arrhenius eğrileri oluşturularak karşılaştırılmıştır (Bkz. Şekil 5.25). Stellite 21, düşük ve orta sıcaklıklarda oksidasyona

dayanıklı görünse de yüksek sıcaklıklarda hızlı bir oksitlenme(logaritmik) göstermiştir. Yüksek sıcaklıklarda oksit tabakasının yapısal bütünlüğünü koruyamadığı görülmüştür.



Şekil 5.25. Stellite 21 numunesinin 500°C, 800°C ve 1000°C'de izotermal oksidasyonu; (a) Zamana göre ağırlık değişimi, (b) Arrhenius eğrisi.

Benzer şekilde Stellite 21 ve %3 Mo ilaveli alaşım için de 500, 800 ve 1000 °C' de 24 saat oksitlenmesi sonrasındaki ağırlık artışları ile lnK ve 1/T arasında çizilen Arrhenius eğrileri oluşturularak karşılaştırılmıştır (Bkz. Şekil 5.26).



Şekil 5.26. %3Mo ilaveli Stellite 21 numunesinin 500°C, 800°C ve 1000°C'de izotermal oksidasyonu. (a) Zamana göre ağırlık değişimi, (b) Arrhenius eğrisi.

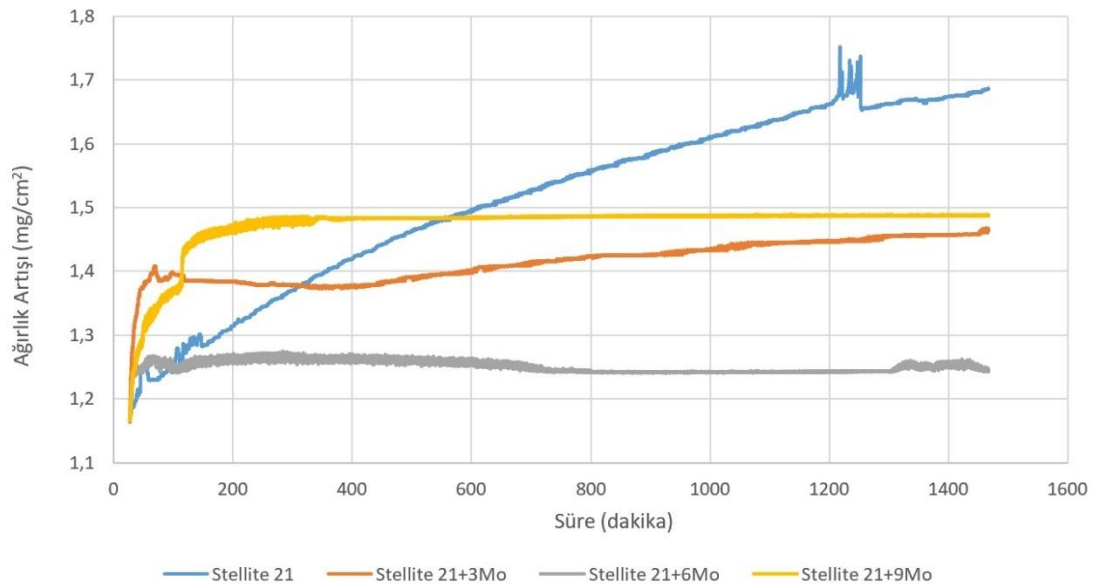
Eğrilerin eğiminden %3 Mo ilaveli alaşımının farklı sıcaklıklardaki oksitlenme hız sabiti elde edilmiş ve yüksek sıcaklıklarda düştüğü görülmüştür (Bkz. Çizelge 5.5).

%3 Mo ilavesinin, Stellite 21 alaşımının oksitlenme direncini belirgin şekilde artırdığı görülmüştür. Özellikle yüksek sıcaklıklarda (1000 C), oksitlenme hızının yavaşlaması ve aktivasyon enerjisinin yükselmesi, Mo katkısının oksitlenme mekanizmalarını olumlu yönde etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu durum, alaşımı daha yüksek sıcaklıklarda kullanım için daha uygun hale getirmektedir.

Çizelge 5.5. %3 Mo ilaveli Stellite alaşımlarının farklı sıcaklıklardaki oksitlenme hız sabitleri (K).

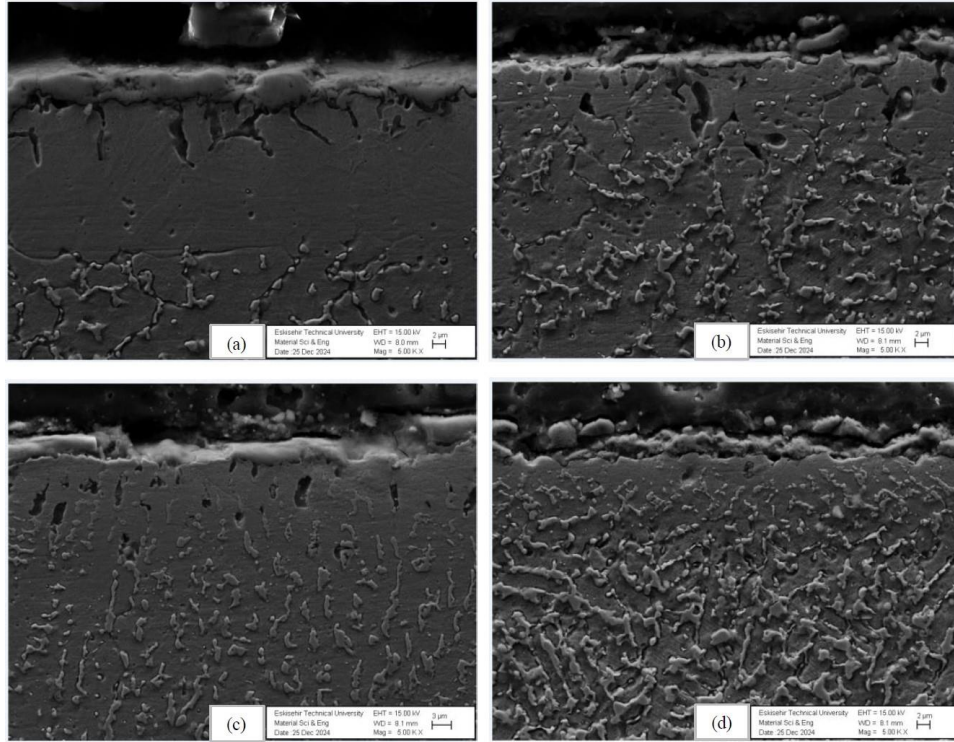
Stellite 21 %3Mo	500�C	800�C	1000�C
K (mg^2s^{-1})	-7E-12	1E-09	2E-08

%3 Mo katkısının yüksek sıcaklıklardaki oksitlenme mekanizmalarını olumlu yönde etkilediği yönündeki bulguların sonucunda Mo ilaveli diğer alaşımların da 1000 C'deki izotermal oksidasyonu sonucu zamana bağlı ağırlık değişimleri şekil 5.27'de verilmiştir.



şekil 5.27. 1000  C' de 24 saat oksitlenme sonrası alaşımların ağırlık artışları.

Molibden (Mo) oranının artırılması, (%3 gibi) düşük seviyelerde oksitlenme direncini önemli ölçüde artırarak alaşım yüzeyinde kararlı ve koruyucu bir krom oksit (Cr_2O_3) tabakasının oluşumunu teşvik etmektedir. %3 oranında Mo katkısı, özellikle kromu destekleyerek Cr_2O_3 tabakasının daha homojen, sürekli ve sıkı bir yapı kazanmasını sağlamaktadır. Bu koruyucu tabaka, oksijenin alaşım yüzeyine nüfuz etmesini büyük ölçüde engelleyerek oksidasyon hızını azaltmaktadır. Ayrıca, bu seviyede Mo, krom oksit tabakasının termodinamik kararlılığını artırmakta ve yüksek sıcaklıklarda oksidasyona karşı dirençli bir bariyer oluşturmaktadır. Ancak, Mo oranının bu seviyenin üzerine çıkması, oksitlenme direncinde azalmaya yol açabilmektedir. Bu durum, yüksek Mo içeriğinin alaşım mikro yapısında faz dengesizliğine neden olması, süreksiz veya zayıf koruyucu oksit tabakalarının oluşması ve yüksek sıcaklıklarda uçucu ve kararsız Mo oksitlerinin (örneğin, MoO_3) oluşumu ile ilişkilendirilmektedir. Bu tür uçucu oksitler, koruyucu tabakanın bütünlüğünü bozarak oksijenin metal yüzeyine nüfuz etmesini kolaylaştırmakta ve oksidasyon hızını artırmaktadır (Bakınız Şekil 5.28). Ayrıca, aşırı Mo içeriği galvanik hücre oluşumuna yol açarak alaşımın bölgesel olarak oksidasyon direncini zayıflatabilmektedir.



Şekil 5.28. 1000 °C’ de 24 saat oksitleme sonrası (a) Stellite 21, (b) Stellite21 %3Mo ilaveli, (c) Stellite21 %6Mo ilaveli ve (d) Stellite21 %9Mo ilaveli numunelerinin oksitlenen yüzeylerinin büyük büyütme ile SEM görüntüleri.

Genel olarak elde edilen ağırlık artışları verilerine göre Stellite alaşımlarının belirli bir sıcaklık oksidasyon direncine sahip olduğu ve Mo ilavesi ile yüksek sıcaklıktaki oksidasyon direncinin arttığı söylenebilir. Bu durum, Cheng vd.nin (2020) Stellite 12 alaşımlarının 800 °C’de 50 saat olarak gerçekleştirdikleri oksitleme test sonuçları ile paralellik göstermektedir. Cheng vd. oksitleme testlerinde Stellite 12 alaşımına farklı oranlarda yaptıkları Ti/B₄C ilaveli numunelerinin tamamının ağırlığının oksidasyon süresinin artması ile birlikte artan bir eğilime sahip olduğunu; ancak %6 Ti/B₄C ilaveli numunenin ağırlık artışının en düşük olduğunu raporlamışlardır. Araştırmacılar alaşım ilavesinin artmasıyla azalan ağırlık kazanımını oksidasyon direncinin artması ile ilişkilendirmişlerdir. Ayrıca yapılan Ti/B₄C ilavesi ile incelen alaşım mikroyapısının oksit filmin yapışmasını artırdığı ve bunun da kaplamanın oksidasyon direncini daha iyi hale getirdiği ifade edilmiştir. Cheng vd. Ti/B₄C ilavesi ile oluşan TiO₂’nin, oksitlenme sonucu yapıda genel olarak görülen Cr₂O₃ içeren pasif oksit filmine dahil olarak oksitlenme direncini arttırdığını ifade etmişlerdir. Ancak artan % Ti/B₄C ile birlikte oluşan TiO₂’nin de arttığını, bu durumun koruyucu pasif oksit filminin gevşek ve gözenekli bir yapıya evrilmesine ve pasif oksit filminin yüzeyden dökülmesine neden olduğunu raporlandırmışlardır. Cheng vd.nin raporlandığı bu durum, Stellite 21 alaşımlarında artan %Mo ilavesi ile birlikte koruyucu tabakanın bütünlüğünün bozulmasına neden olan uçucu ve kararsız Mo oksitlerinin oluşması ile benzerlik göstermektedir.

Oksitleme reaksiyon kinetiği değerlendirildiğinde, genel olarak artan %Mo ilavesi ile oksitlenme hız sabitinin (*K*) düştüğü ve aktivasyon enerjisinin arttığı görülmüştür. Bu durum Mo ilavesinin Stellite alaşımlarının oksidasyon direncini arttığı şeklinde değerlendirilebilir. Ancak oksidasyon direnci ile ilişkilendirilen aktivasyon enerjisindeki artış, Mo ilavesi ile doğrudan paralellik göstermemektedir. Bu durumun Mo ilaveli alaşımların yüzeyinde oluşan oksit tabakalarının içerdikleri farklı intermetalik ve karbür fazlarının oranları ile ilişkilendirilebileceği değerlendirilmiştir. Liu vd.nin (2015 a) Stellite alaşımlarında karbür fazlarının daha yoğun olduğu versiyonlarının korozyon dirençlerinin intermetalik içerenlere göre daha düşük olduğu yönündeki test sonuçları ile uyumaktadır. Liu vd. yaptıkları çalışmada Stellite alaşımlarının yüksek sıcaklık oksidasyon direncini oluşan C₂O₃ pasif oksit filmi ile ilişkilendirmiştir. Yapıda oluşan Cr zengini karbürlerin fazla olmasının katı çözeltilerindeki %Cr oranının azalmasına ve bu durumun oluşacak C₂O₃

miktarının azalmasına neden olacağı şeklinde yorumlanmıştır. Liu vd. çalışmada Cr zengini karbür oranı yüksek Stellite alaşımlarının azalan C_2O_3 miktarını alaşımın korozyon direncinin düşmesi ile ilişkilendirmişlerdir. Benzer şekilde ağırlıkça %9 oranında Mo ilavesi içeren alaşımların intermetalik seviyesi %6 ile yakın olsa da içerdiği karbür fazı oranı daha yüksek olarak kaydedilmiştir. Bu durumda %9 oranında Mo içeren alaşımın, yüksek Cr karbür oranı nedeni ile daha ince ve kırılgan C_2O_3 koruyucu oksit filmi geliştirmiş olabileceği ve bu nedenle daha yüksek oranda oksitlenmiş olabileceği değerlendirilmiştir.

Tüm bu etkiler göz önüne alındığında, optimum Mo oranı olarak %3 belirlenmiş olup, bu seviyede hem yüksek oksitlenme direncinin sağlandığı hem de mikro yapısal bütünlüğün korunduğu görülmüştür.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada termo-mekanik etkiler ile ortaya çıkan namlu iç yüzeylerindeki yoğun aşınmalara karşı koruyucu uygulamalara alternatif geliştirilebilmesi hedeflenmiştir. Tez çalışmasının paralelinde namlu içi uygulama alternatifi Lazer Kaplama için sistem geliştirilmiştir. Bu kapsamda potansiyel olarak kullanılabilecek farklı alaşımların lazer kaplama sonrası yapısal ve mekanik özellikleri karakterize edilerek, aşınma ve korozyon davranışlarının incelenmesi hedeflenmiştir. Karakterizasyon amacı ile testler; silah sisteminin tekli ve çoklu (seri) atış şeklini referans alarak hem oda sıcaklığında hem de 500 °C’de gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Gerçekleştirilen Stellite 21’in alaşımlandırma çalışmalarında literatür ile uyumlu olarak, ağırlıkça % Mo miktarındaki artış ile düşük karbonlu Stellite 21 alaşımının yapısında Mo zengini sert Co_3Mo intermetalik fazının yoğunluğunu artırdığı görülmüştür.
- Mo ilavesinin Stellite 21 alaşımlarında sadece Mo zengini intermetaliklerin değil, Cr_7C_3 ve Cr_{23}C_6 gibi karbür fazlarının oluşumuna da katkı sağladığı görülmüştür.
- Stellite ve Mo ilaveli alaşımlarında oluşan intermetalik ve karbürlerin alaşımların sertliğini ve kayma aşınma direncini artırdığı, ancak intermetaliklerin kırılganlıkları nedeniyle alaşımların katı parçacık aşınma direncini desteklemediği görülmüştür.
- Oda sıcaklığında gerçekleştirilen aşınma testlerinde literatür ile uyumlu olarak, Stellite 21 ve Mo ilaveli alaşımlarının birleşik adhezif ve abrasif aşınma mekanizması sergilediği görülmüştür. Aşınma kaybı sürtünmeden

kaynaklanan adhezyon ve sürtünme ısısından kaynaklanan yüzey oksitlerinin süren aşınma ile çatlaması/kırılması sonucu abrasif aşınmaya dahil olması ile gerçekleşmektedir. Ancak %Mo ilavesi ile artan intermetalik ve karbür miktarı alaşımların yüzey aşınmasını büyük ölçüde bastırırken, bu sert fazların aşınma yükü altında kırılıp oksit kalıntıları ile birlikte aşınma kaybına eklenebileceği değerlendirilmiştir.

- Stellite 21 ve alaşımlarının yüksek sıcaklıktaki aşınma davranışlarının oda sıcaklığındakilere göre daha karmaşık olduğu görülmüştür. 500 °C’de yapılan testlerde birleşik adhezif ve abrasif aşınma mekanizmasına ek olarak oksidatif aşınma mekanizmasının çalıştığı görülmüştür. Yüzey sertleşmesi sonucu gelişen camlama etkisinin alaşımın aşınma direncini artırdığı görülürken; intermetaliklerin kırılıp parçalanmasından kaynaklanan sert partiküllerin, oksidatif aşınma ile gelişen geniş oksit tabakalarının kırılması ile oluşan partiküllerin ve aşındırıcı bilyadan gelen W içerikli partiküllerin aşınma yüzeyine dahil olarak aşınma kaybını artırdığı değerlendirilmiştir.
- Oksitleme çalışmalarının sonucunda yapılan Mo ilavesinin Stellite alaşımlarının oksidasyon direncini artırdığı değerlendirilmiştir. Genel olarak artan %Mo ilavesi ile oksitlenme hız sabitinin (K) düştüğü ve aktivasyon enerjisinin arttığı görülmüştür. Bu durum Mo ilavesinin Stellite alaşımlarının oksidasyon direncini artırdığı şeklinde değerlendirilmiş, ancak %Mo ilavesi ile oksidasyon direncindeki artış arasında paralel bir ilişki görülememiştir. Ağırlıkça %9 Mo alaşımına göre benzer oranda intermetalik ve daha düşük karbür içeren %3 ve %6 Mo alaşımlarının oksidasyon direncinin daha yüksek olduğu değerlendirilmiştir. Optimum Mo oranı olarak %3 belirlenmiş olup, bu seviyede hem yüksek oksitlenme direncinin sağlandığı hem de mikro yapısal bütünlüğün korunduğu görülmüştür.

Yüksek sıcaklıklarda aşınma ve korozyon içeren uygulamalarda Stellite 21’in Mo ilaveli alaşımlarının kullanılması önerilebilir. Özellikle savunma sanayinde namı içi koruyucu kaplama alternatifi olabilecek bu uygulama; yüksek sıcaklıkta kayma aşınmaları içeren nükleer tesis kilitleme mekanizmalarında, yüksek performanslı fren diski

uygulamalarında ve uçak türbin motorlarının belirli bölümlerinde kullanılabilir. Ancak bu çalışmada ağırlıkça %6 ile 9'un sağladığı aşınma dayanımları arasında büyük bir fark görülememiştir. Bu durum oksitlenme faktörü nedeni ile yüksek sıcaklık aşınma mekanizmasının tam olarak karakterize edilememesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle alaşımların yüksek sıcaklıklardaki aşınma mekanizmaları daha detaylı araştırılmalıdır. Ayrıca literatürdeki bazı çalışmalarda Stellite alaşımlarına itriyum ilavesi ile oksidasyon direncinde ve niyobyum ilavesi ile mekanik özelliklerde iyileşme sağlandığı raporlanmıştır. Lazer kaplama öncesi mekanik toz karıştırma ile yapılacak alaşımlandırma çalışmalarının molibden haricinde; çeşitli iyileştirmeler sağlayabileceği öngörülen itriyum ve niyobyum gibi elementlerle genişletilmesi Stellite alaşım ailesi ile ilgili literatürün zenginleşmesini sağlayacaktır. Ayrıca alaşımların oksitlenme davranışları üzerinde de çok fazla yayın olmaması nedeni ile bu alanda da ilave çalışmaların yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Abel, F. (1886). *Iron and Steel Institute*. 2, (s. 465).

Ahmad, I. (1988). *The problem of gun barrel erosion: an overview in Gun propulsion technology*. Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, 109, 311-356.

Alhattab, A.A.M., Dilawary, S.A.A., Motallebzadeh, A., Arisoy, C.F., Cimenoglu, H. (2020), *Room and High Temperature Sliding Wear Characteristics of Laser Surface Melted Stellite 6 and Mo-Alloyed Stellite 6 Hardfacings*.ASM International, 30, p.302-311.

Amateau M., G. W.A. (1964) *Survey of Materials for High-Temperature Bearing and Sliding Applications*. Wear, 7, p. 385-418.

Antony, K.C. (1983). *Wear-resistant cobalt-base alloys*. Journal of Metals, 35(2) p. 52-60.

Audino, M. J. (2006). *Use of Electroplated Chromium in Gun Barrels*. Army Benet Laboratories.

Beltran, A.M.(Ed.). (1987). *Cobalt-base alloys, in Superalloys II*, Wiley, p. 135-63.

Betteridge, W. (1982). *Cobalt and Its Alloys*. Chichester, Halted Press.

Bracuti, A. J. (1988). *Wear-reducing additives – role of the propellant in Gun propulsion technology*. Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, 109, 377-412.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Chaudhari, P.E, Chopade, M.R, Putti, A.A. (2016). *A review on gun barrel erosion*. International Journal of Current Engineering and Technology, 4(1):231235.
- Chen, R., Chen, X., Liu, B., Wang, T., Wu, B., Zhang, K., Zheng, J., Zou, Z. (2018). *Strain-based health monitoring and remaining life prediction of large caliber gun barrel*. Measurement, 122:297-311.
- Cheng, Q., Shia, H., Zhanga, P., Yua, Z., Wu, D. Hea, S., Tian, Y. (2020). *Microstructure, oxidation resistance and mechanical properties of stellite 12 composite coating doped with submicron TiC/B4C by laser kaplama*. Surface and Coating Tecnology, 395.
- Collier, R., Zhang, X., Liu, R., Wu, X., Yao, M. (2020). *Tribological Performance of Molybdenum Stellite Alloys under Dry-Sliding Wear*. Journal of Materials Engineering and Performance.
- Çelik, H., Kaplan, M. (2004). *Effects of silicon on the wear behaviour of cobalt-based alloys at elevated temperature*. Wear, Volume 257, Issues 5, p. 606-611.
- Davis, J.R. (1980 Ohio). *Metals handbook*. American Society for Metals.
- Davis, J. (2000). *Nickel, Cobalt, and Their Alloys*. ASM International, Materials Park.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Dilawary, S.A.A., Motallebzadeh, A., Paksoy, A.H. (2017). *Influence of laser surface melting on the characteristics of Stellite 12 plasma transferred arc hardfacing deposit*. Surf Coat Technol. 317, p.110–116.
- Dilawary, S.A.A., Motallebzadeh, A., Akhter, R., Atar, E., Cimenoglu, H. (2017). *Enhanced wear resistance of Stellite 12 by Mo addition and LSM*. Surface Engineering, 1743-2944.
- Dilawary, S.A.A., Motallebzadeh, A., Afzal, M., Atar, E., Cimenoglu, H. (2018). *Laser Surface Melting of 10 wt. % Mo Alloyed Hardfacing Stellite 12 Plasma Transferred Arc Deposits: Structural Evolution and High Temperature Wear Performance*. Opt. Laser Technol., 101, p. 404–412.
- Ding, L., Shengsun, H., Xiumin, Q., Jungi, S. (2016). *Effect of VN alloy addition on the microstructure and wear resistance of Co-based alloy coatings*. Journal of Alloys and Compounds, 659, p. 8-16.
- Flame Spray Technologies BV. 2017. *About Laser Kaplama*. Erişim: <https://www.fst.nl/about/laser-kaplama/>, Erişim tarihi: 01.06.2017.
- Farnia, A., Ghaini, F.M., Rao, J.C., Ocelik, V., De Hosson, J.Th.M. (2012). *Effect of Ta on the microstructure and hardness of Stellite 6 coating deposited by low power pulse laser treatments*. Surface & Coatings Technology, 213, p.278-284.
- Frenk, A., Wagniere, J. (1991). *Laser kaplama with cobalt-based hardfacing*, J. Phys. IV France, 1(C7), p. 65-68.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Frenk, A., Kurz, W. (1993). *High speed laser kaplama: solidification conditions and microstructure of a cobalt-based alloy*. Materials and Science Engineering, A173, p. 339-342.
- Frenk, A., Kurz, W. (1994). *Microstructural effects on the sliding wear resistance of a cobalt-based alloy*, Wear, 174(1-2), p. 81-91.
- Harris, C.K., Broussard, J.P., Keska, J.K. (2002). *Determination of Wear in a Tribo-System*. 2002 ASEE Gulf-Southwestern Annual Conference, Lafayette, Louisiana.
- Hasenbein, R.G. (2004). *Wear and Erosion in Large Caliber Gun Barrels*. NATO/OTAN U.S. Army Armament Research, Development & Engineering Center.
- Huang, F.X., Jiang, Z.H., Liu, X.M., Lian, J.S., Chen, L. (2011). *Effects of process parameters on microstructure and hardness of layers by laser kaplama*. ISIJ International, 51(3), p. 441–447.
- Heathcock, C.J., Ball, A., Protheroe, B.E. (1981). *Cavitation erosion of cobaltbased Stellite alloys, cemented carbides and surface-treated low alloy steels*, Wear, 74-1, p.11-26.
- Jeshvaghani, R., Shamanian, M., Jaberzadeh, M. (2011). *Enhancement of wear resistance of ductile iron surface alloyed by stellite 6*. Materials and Design, 2, p. 2028-2033.
- Johnston, I.A. (2005). *Understanding and predicting gun barrel erosion*. Weapon Systems Division Defence Science and Technology Organisation, DSTO-TR-1757.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Kapoor, S. (2012). *High-Temperature Hardness and Wear Resistance of Stellite Alloys* [M.Sc. thesis, Carleton University, Mechanical Engineering]. Ontario, Ottawa.
- Kapoor, S., Liu, R., Wu, X.J., Yao, M.X. (2012). *Temperature-Dependence of Hardness and Wear Resistance of Stellite Alloys*. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Materials and Metallurgical Engineering, 6 (7).
- Lawton, B. (2001). *Thermo-chemical Erosion in Gun Barrels*. WEAR, 251, 827-838.
- Liu, R., Yao, J., Zhang, Q., Yao, M.X., Collier, R. (2015). *Effects of molybdenum content on the wear/erosion and corrosion performance of low-carbon Stellite alloys*. Materials and Design, 78, p. 95-106.
- Liu, R., Yao, J., Zhang, Q., Yao, M.X., Collier, R. (2015). *Microstructures and Hardness/Wear Performance of High-Carbon Stellite Alloys Containing Molybdenum*. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International.
- Liu, Y., Yang, H., Tan, G., Miyazaki, S., Jiang, B., Liu, Y. (2004). *Stress-induced FCC-» HCP martensitic transformation in CoNi*. J. Alloy. Comp., 368 (1-2), p. 157-163.
- Malayoglu, U., Neville, A. (2005). *Mo and W as alloying elements in Co-based alloys-their effects on erosion-corrosion resistance*. Wear, 259, p. 219-229.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Mohanty, P.S., Mazumder, J. (1998). *Solidification behavior and microstructural evolution during laser beam–material interaction*. Metallurgical and Materials Transactions B, 29B, p. 1269-1279.

Motallebzadeh, A., Atar, E., Cimenoglu, H. (2015). *Sliding wear characteristics of molybdenum containing Stellite 12 coating at elevated temperatures*. Tribology International, 91, p. 40–47.

Motallebzadeh, A., Dilawary, S.A.A., Atar, E., Cimenoglu, H. (2018). *High-Temperature Oxidation of Stellite 12 Hardfacings: Effect of Mo on Characteristics of Oxide Scale*. Journal of Materials Engineering and Performance, 28.

Perkovic, M. (2020). *Mapping and Characterisation of Surface Damage and Wear Mechanisms in Gun Barrels* [M.Sc. thesis, Karlstads Universitet, Faculty of Health, Science and Technology]. Karlstad.

Persson, D.H.E. (2005), *On the Mechanisms behind the Tribological Performance of Stellites* (ISBN: 91-554-6420-3) [Doctoral dissertation, Uppsala University, Faculty of Science and Technology], 51 p.

Qian, M., Lim, L.C., Chen, Z.D., Chen, W.L. (1997). *Laser Kaplama Of Nickel-Based Hardfacing Alloys*. Surface and Coating Technology, 63, 590-593.

Qian, M., Lim, L.C., Chen, Z.D. (1998). *Parametric Studies of Laser Kaplama Processes*. Journal of Materials Processing Technology, 106, 174-182.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Radu, I., Li, D., Llewellyn, R. (2004). *Tribological behaviour of Stellite 21 modified with Yttrium*, Wear, 257, p. 1154-1166.
- Radu, I., Li, D. (2005). *Investigation of the role of oxide scale on Stellite 21 modified with yttrium in resisting wear at elevated temperatures*. Wear, 259, p. 453-458.
- Radu, I., Li, D. (2007). *The wear performance of yttrium-modified Stellite 712 at elevated temperatures*, Tribology International, Volume 40, Issue 2, p. 254-265.
- Rickerby, D.S., Matthews, A. (1991). *“Introduction,” in Advanced Surface Coatings: A Handbook of Surface Engineering*. Glasgow, p. 1-11.
- Rosset, W.S., Montgomery, J.S. (2010). *Gun Liner Bond Strength Studies*. Army Research Laboratory, ARL-CR-649.
- Sexton, C.L., Byrne, G., Watkins, K.G. (2000). *Alloy development by laser kaplama: An overview*. Journal of Laser Applications, 13-1.
- Sheikh, M.A. (2007) *Modelling & simulation of laser material processing: predicting melt pool geometry and temperature distribution*. in Proceedings of International Conference MS'07, Kolkata.
- Shin, J.C., Doh, J.M., Yoon, J.K., Lee, D.Y., Kim, J.S. (2003). *Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of cobalt-base Stellite hardfacing alloys*. Surface and Coatings Technology, 166, p. 117-126.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Sohi, M.H., Kashi, A.A., Hadavi, S.M.M. (2003). *Comparative Tribological Study of Hard And Crack-Free Electrodeposited Chromium Coatings*. Journal of Materials Processing Technology, 138, 219-222.
- Stott, F., Lin, D., Wood, G. (1973). *Glazes produced on Nickel-base Alloys during High Temperature Wear*, Nature Physical Science, 242, p. 75-77.
- Toyserkani, E., Khajepour, A., Corbin, S. (2005). *Laser Kaplama*. CRC Press, p. 8- 10.
- Undewood, J.H. (2006). *Thermomechanically Controlled Erosion in Army Cannons: A Review*. Transactions of ASME, 128, s.169.
- Vilar, R. (Ed.). (1999). *Laser alloying and laser kaplama*, in *Lasers in materials science*. Trans Tech Publications Ltd: Switzerland, p. 229-252.
- Wang, L., Li, D. (2003). *Effects of yttrium on microstructure, mechanical properties and high temperature wear behaviour of cast Stellite 6 alloy*. Wear, 255, p. 535-544.
- Yao, M.X., Wu, J.B.C., Xu, W., Liu, R. (2005). *Metallographic study and wear resistance of a high-C wrought Co-based alloy Stellite 706K*. Materials Science and Engineering: A, Volume 407, Issues 1–2, p. 291-298.
- Yao, M.X., Wu, J.B.C., Xie, Y. (2005). *Wear, corrosion and cracking resistance of some W-or Mo-containing Stellite hardfacing alloys*, Materials Science and Engineering: A, Volume 407, Issues 1–2, p. 234-244.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Yu, H., Ahmed, R., de Villiers L.H., Davies, S. (2007). *Tribo-Mechanical Evaluations of Cobalt-Based (Stellite 4) Alloys Manufactured via HIPing and Casting*. Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol II WCE, London, U.K.

Zanzarin, S. (2015). *Laser Kaplama with Metallic Powder* [Doctoral dissertation, University of Trento]. Department of Industrial Engineering, Trento.

Zhang, S., Zhao, D. (2013). *Aerospace Materials Handbook*, CRC Press.

Zhao, Y., Ge, C., Wu, Y., Deng, Y., Zhang, W., Liu, X., Liu, Y., Chen, H. (2024) *The impact of Nb on the microstructure and mechanical properties of Stellite 21 alloy coatings*. Surface and Coatings Technology, 489.

Zimmer, M. F., Haukland, A. C. (1971). *Gun corrosion – Its Cause and Prevention*. Corrosion Science 11(1), 553-555.