



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TERMOREAKTİF DİFÜZYON YÖNTEMİYLE
NİYOBYUM KARBÜR-BOR (NbC-B) KAPLANAN
HARDOX 400 ÇELİĞİN MİKROYAPI
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE TAGUCHİ
YÖNTEMİYLE AŞINMA DAVRANIŞININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Mehmet ERTEM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak – 2021
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Mehmet ERTEM

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TERMOREAKTİF DİFÜZYON YÖNTEMİYLE NİYOBYUM KARBÜR-BOR (NbC-B) KAPLANAN HARDOX 400 ÇELİĞİN MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE TAGUCHİ YÖNTEMİYLE AŞINMA DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Mehmet ERTEM

**Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK
İkinci Danışman: Doç. Dr. Ali Kaya GÜR**

2021, 102 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK
Doç. Dr. Ali Kaya GÜR
Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ
Dr. Öğr. Üyesi Musa KILIÇ
Dr. Öğr. Üyesi Edip ÇETKİN**

Genel olarak çelik malzemelerin mekanik etkiler sonucunda kullanım dışı kalarak ülke ekonomisinde yüksek hasarlara sebebiyet verdiği bilinmektedir. Hem aşınma hem de korozyon gibi etkileşimlerin yol açtığı kayıplar ülke ekonomisine zarar verdiği için, akademik ve sanayi toplulukları harekete geçmiş ve aşınma özellikleri açısından güçlü malzemeler aramaya başlamışlardır. Dolayısıyla sanayide sıklıkla kullanılan çelik malzemelere difüzyon, kimyasal çöktürme ve fiziksel çöktürme kaplama yöntemleri uygulanmaya başlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, altlık malzeme amacıyla yararlanılan Hardox 400 çeliği, katı ortam Termoreaktif Difüzyon (TRD) yöntemi ile karbür yapıcı element tozlarından Ferro Niyobyum ve Ferro Bor tozları kullanılarak kaplanmıştır. Kaplama işlemi üç farklı sıcaklık (950, 1000 ve 1050 °C) ve üç farklı zaman aralığında (1, 2 ve 3 saat) gerçekleştirilmiştir. TRD yöntemiyle kaplama işlemi gerçekleştirilen her bir parametre sonrasında numunelerin optik mikroskop, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Enerji Dağılımlı X-Işını Spektrometresi (EDX) ve X-Işını Kırınımı (XRD) ile mikroyapıları incelenmiş ve kaplama yüzeylerindeki sertlik değerleri ölçülmüştür. Kaplama parametrelerinin kaplama kalınlığına ve sertliğe etkileri analiz edilmiştir. Ayrıca sertliğin ve kaplama parametrelerinin aşınmaya etkisini tespit etmek için numuneler aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Aşınma deneylerinde, Taguchi deney tasarımı düzenine göre faydalanılmıştır. Elde edilen sonuçlar mevcut şartlarda kullanılan Hardox 400 çeliği ile kıyaslanmıştır.

Kaplama parametrelerine bağlı olarak Hardox 400 çelik yüzeyinin TRD yöntemiyle kaplama kalınlığı, kaplama sıcaklığı ve süresinin artmasıyla kaplama kalınlıklarının arttığı optik mikroskop ve SEM görüntülerinden görülmüştür. Minimum kaplama kalınlığı, 950 °C kaplama sıcaklığı ile 1 saat süreyle kaplanan numunelerde, maksimum kaplama kalınlığı ise 1050 °C kaplama sıcaklığı ile 3 saat süreyle kaplanan numunelerde oluşmuştur. Kaplama tabakasının B, C, Fe ve Nb elementlerinden oluştuğu EDX analizinden, kaplama tabakasındaki fazın NbC-B olduğu XRD analizinden gözlemlenmiştir. NbC-B fazının

sertliğinin artmasında önemli bir faktör olduğu, dolayısıyla kaplama sıcaklığı ve süresinin artmasıyla sertliğin arttığı tespit edilmiştir. Maksimum sertlik, 1050 °C’de 3 saat süreyle kaplanan numunede 2934,2 HV ölçülmüştür. Aşınma deneylerinde ise aşınma hacminin kaplama sıcaklığının 950 °C’den 1000 °C’ye çıkmasıyla azaldığı, 1000 °C’den 1050 °C’ye çıkmasıyla çok az da olsa artmaya başladığı görülmüştür. Benzer durum kaplama süresi için de söz konusudur. Uygulanan yükün artması, aşınma hacmini arttırmıştır. Taguchi yöntemine göre 1000 °C’de 2 saat süreyle kaplanan numunenin 5 N’luk yük altındaki aşınması minimum, 950 °C’de 3 saat süreyle kaplanan numunenin 15 N’luk yük altındaki aşınması maksimumdur. Minimum ve maksimum aşınma hacimleri yaklaşık 0,063 mm³ ve 0,328 mm³’tür. Kaplanmış Hardox 400 çelikleri ile karşılaştırıldığında, genel olarak kaplanmamış Hardox 400 çelikleri daha fazla aşınmıştır. Ancak 10 N ve 15 N’luk uygulama yüklerinde, 3 saat süreyle 950 °C ve 1050 °C’de kaplanan numunelerin daha fazla aşındığı görülmüştür. Bunun, kaplama tabakası altında bulunan gözenekli yapının aşınma deneyleri esnasında plastik deformasyondan kaynaklı kırılmaya sebebiyet vermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, Ferro Bor, Ferro Niyobyum, Hardox 400 Çeliği, Mikroyapı, Sertlik, Taguchi Yöntemi, Termoreaktif Difüzyon Yöntemi.

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE PROPERTIES OF NIOBIUM CARBIDE–BORON (NbC–B) COATED HARDOX 400 STEEL BY THERMOREACTIVE DIFFUSION METHOD AND EVALUATION OF WEAR BEHAVIOUR BY TAGUCHI METHOD

Mehmet ERTEM

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING**

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK
Co-Advisor: Assoc. Prof. Ali Kaya GÜR**

2021, 102 Pages

**Jury
Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK
Assoc. Prof. Dr. Ali Kaya GÜR
Assoc. Prof. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ
Asst. Prof. Dr. Musa KILIÇ
Asst. Prof. Dr. Edip ÇETKİN**

In general, it is known that steel materials are out of use because of mechanical effects and cause high damage in the country's economy. Because the losses caused by interactions such as both wear and corrosion have caused to damage to the country's economy, the academic and industry communities have taken action and they have started to search for strong materials in terms of hardness and wear properties. Therefore, diffusion, chemical deposition, and physical deposition coating methods have begun to apply to steel materials frequently used in the industry.

In this thesis study, Hardox 400 steel used as substrate material has been coated with solid media Thermoreactive Diffusion (TRD) method using Ferro Niobium and Ferro Boron powders from carbide forming element powders. Coating has been carried out in three different temperatures (950, 1000 and 1050 °C) and three different time intervals (1, 2 and 3 hours). After each parameter of coating process carried out by TRD method, microstructures of specimens have been examined by optical microscope, Scanning Electron Microscope (SEM), Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX) and X-Ray Diffraction (XRD) and hardness values on the coating surfaces have been measured. The effects of coating parameters on coating thickness and hardness have been analysed. In addition, specimens have been subjected to wear tests to determine the effect of hardness and coating parameters on wear. In the wear tests, the Taguchi test design setup has been benefited. The obtained results have been compared with the Hardox 400 steel used under current conditions.

It has been seen from optical microscope and SEM images that Hardox 400 steel surface could be coated with TRD method depending on coating parameters, and coating thickness has increased with increasing coating temperature and time. Minimum coating thickness was formed in samples coated with coating temperature of 950 °C for 1 hour, while maximum coating thickness was formed in samples coated with coating temperature of 1050 °C for 3 hours. EDX analysis have showed that the coating layer is composed of B, C, Fe and Nb elements and XRD analysis also have showed that the phase in the coating

layer is NbC-B. The NbC-B phase has been determined to be an important factor in increasing the hardness, hence the hardness has increased with the increase of the coating temperature and time. Maximum hardness, 2934.2 HV was measured on the sample coated at 1050 °C for 3 hours. In the adhesive wear experiments, it was observed that the wear volume decreased when the coating temperature increased from 950 °C to 1000 °C and started to increase slightly when it increased from 1000 °C to 1050 °C. A similar situation is also valid for the coating time. The increase of the applied load has increased wear volume. According to the Taguchi method, the wear volume of the sample coated at 1000 °C for 2 hours is minimum and the wear volume of the sample coated at 950 °C for 3 hours is maximum. Minimum and maximum wear volumes are approximately 0.063 mm³ and 0.328 mm³. In general, uncoated Hardox 400 steels have been more worn out compared to coated Hardox 400 steels. The samples coated at 950 °C and 1050 °C for 3 hours has more worn out at application loads of 10 N and 15 N. This is thought to be due to the porous structure under the coating layer causing breakage due to plastic deformation during wear tests.

Keywords: Ferro Boron, Ferro Niobium, Hardness, Hardox 400 Steel, Nb Coating, Microstructure, Taguchi Method, Thermoreactive Diffusion Method, Wear.

ÖNSÖZ

Sağladığı üstün özelliklerden dolayı Termoreaktif Difüzyon (TRD) yöntemi, kaplama yöntemleri arasında oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Bu sebeple, anılan kaplama türünün optimizasyonunun yapılması, zırh çeliklerine kaplama tabakalarının etkilerinin müşahade edilebilmesi ve bununla alakalı ilk çalışmalardan olması, bu tezin önemini artırmaktadır.

TRD yöntemiyle Niyobyum Karbür–Bor (NbC-B) kaplanan Hardox 400 çeliğin mikroyapı özelliklerinin incelenmesi ve Taguchi yöntemiyle aşınma davranışının değerlendirilmesi adlı tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde TRD yöntemi, Kimyasal Buhar Çökeltme (CVD) ve Fiziksel Buhar Çökeltme (PVD) yöntemlerinden bahsedilmiştir. İkinci bölümde kronolojik olarak TRD yöntemi ile ilgili yapılmış bilimsel çalışmalara ve bu çalışmalardan elde edilmiş sonuçlara yer verilmiştir. Üçüncü bölümde yüzey mühendislik teknikleri, Hardox 400 Çeliği, Taguchi Metodu ve Triboloji hakkında genel bilgiler anlatılmıştır. Dördüncü bölümde numunelerin metalografik muayeneleri, aşınma deneyleri, X-ışını ve mikrosertlik analizlerinin yapılışı gibi materyal ve yöntem ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Beşinci bölümde deneysel çalışmalardan elde edilen araştırma sonuçları yorumlanmış ve tartışılmıştır. Son bölümde ise sonuçlar ve önerilerden bahsedilmiştir.

Tez çalışmamda yardımlarını esirgemeyen, ilgi, alaka, bilgi ve tecrübeleriyle her zaman destekçim olan Doç. Dr. Yahya Hışman ÇELİK ve Doç. Dr. Ali Kaya GÜR’e teşekkürlerimi sunarım.

Deney uygulama çalışmalarımда emeklerinden ve desteklerinden dolayı Prof. Dr. Bülent KURT’a teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca hayatımın tüm aşamalarında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ailem ve eşime şükranlarımı sunarım.

Mehmet ERTEM
BATMAN-2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
ÇİZELGELER LİSTESİ	xv
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	xvii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. GENEL BİLGİLER.....	16
3.1. Yüzey Mühendisliği Teknikleri	16
3.1.1. Karbürleme (Sementasyon).....	19
3.1.2. Nitrürleme	21
3.1.3. Karbonitrasyon (Karbonitrürleme).....	22
3.1.4. Borlama	22
3.1.5. Kromlama.....	23
3.1.6. Kimyasal buhar çökeltme yöntemi	23
3.1.7. Fiziksel buhar çökeltme yöntemi	26
3.1.8. Termoreaktif difüzyon yöntemi	27
3.2. Hardox 400 Çeliği.....	31
3.3. Taguchi Yöntemi	32
3.3.1. Taguchi'nin kaliteye yaklaşımı	35
3.4. Aşınma	36
3.4.1. Adhezif aşınma.....	37
3.4.2. Abrazif aşınma	38
3.4.3. Korozyon aşınma	41
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	42
4.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler	42
4.2. Numune Hazırlama	43
4.3. TRD Kaplama Aparatları ve İşlemi	43
4.4. Metalografik Muayene.....	45
4.5. X-Işını Analizi	46
4.6. Mikrosertlik Ölçümü.....	47
4.7. Aşınma Testi	47
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	50
5.1. Metalografik Muayene Sonuçları	52

5.2. EDX ve XRD Sonuçları.....	61
5.3. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları	74
5.4. Aşınma Testi Sonuçları.....	75
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	94
6.1. Sonuçlar	94
6.2. Öneriler	95
KAYNAKLAR	96
ÖZGEÇMİŞ	102

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Yüzey mühendisliği teknikleri	16
Şekil 3.2. Kaplama yapılan malzemede oluşan bölümler.....	17
Şekil 3.3. Atmosferik basınçlı CVD yöntemi	25
Şekil 3.4. Plazmayla CVD yöntemi	26
Şekil 3.5. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniği	26
Şekil 3.6. TRD kutu sementasyon yönteminin akış şeması.....	28
Şekil 3.7. TRD yöntemlerinde kutu tasarımları.....	30
Şekil 3.8. Hardox 400 çeliğinden imal edilmiş kepçe kovası	32
Şekil 3.9. Taguchi'nin kalite sistemi	33
Şekil 3.10. Taguchi yönteminin usulleri.....	34
Şekil 3.11. Kalite tanımına geleneksel yaklaşım	35
Şekil 3.12. Taguchi'nin kalite tanımına yaklaşımı	36
Şekil 3.13. Aşınma türleri.....	37
Şekil 3.14. Kaynak bağları ve kopma şekli; a) Yüzeyde kaynak bağı, b) A'dan B'ye malzeme taşınması, c) Kopan parçaların serbestlik halleri	38
Şekil 3.15. İki cisim ve üç cisim aşınmanın gösterimi	39
Şekil 3.16. Parçacık erozyonu	41
Şekil 4.1. Paslanmaz çelik pota	43
Şekil 4.2. Yüksek sıcaklık fırını	44
Şekil 4.3. Numunelerin kaplama öncesi ve sonrası hali	44
Şekil 4.4. Nikon MA 100 Mikroskop.....	45
Şekil 4.5. SEM cihazı	46
Şekil 4.6. XRD cihazı	46
Şekil 4.7. Mikrosertlik cihazı	47

Şekil 4.8. AISI 420 Inox misket	48
Şekil 4.9. Aşınma mekanizmasının şematik gösterimi	49
Şekil 4.10. Aşınma Test Cihazı	49
Şekil 5.1. 950 °C ve 1 saat için Ferro Cr ve Ferro B ile kaplanmaya çalışılan Hardox 400 çeliği.....	50
Şekil 5.2. 1000 °C ve 1 saat için Ferro Cr ve Ferro B ile kaplanmaya çalışılan Hardox 400 çeliği.....	50
Şekil 5.3. 1050 °C ve 1 saat için Ferro Cr ve Ferro B ile kaplanmaya çalışılan Hardox 400 çeliği.....	51
Şekil 5.4. 1050 °C ve 3 saat için Ferro Cr ve Ferro B ile kaplanmaya çalışılan Hardox 400 çeliği.....	51
Şekil 5.5. 950 °C sıcaklıkta kaplanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri.....	52
Şekil 5.5. 950 °C sıcaklıkta kaplanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri (devamı)	53
Şekil 5.6. 950 °C'lik sıcaklıkta kaplanan numunelerin SEM görüntüleri	54
Şekil 5.7. 1000 °C sıcaklıkta kaplanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri.....	55
Şekil 5.7. 1000 °C sıcaklıkta kaplanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri (devamı)	56
Şekil 5.8. 1000 °C'lik sıcaklıkta kaplanan numunelerin SEM görüntüleri	57
Şekil 5.9. 1050 °C sıcaklıkta kaplanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri.....	58
Şekil 5.9. 1050 °C sıcaklıkta kaplanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri (devamı)	59
Şekil 5.10. 1050 °C'lik sıcaklıkta kaplanan numunelerin SEM görüntüleri	59
Şekil 5.10. 1050 °C'lik sıcaklıkta kaplanan numunelerin SEM görüntüleri (devamı)	60
Şekil 5.11. Kaplama kalınlığının kaplama sıcaklığı ve süresi ile değişimi	61
Şekil 5.12. 950 °C'de 1 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin EDX analizi.....	62
Şekil 5.13. 950 °C'de 2 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin EDX analizi.....	63
Şekil 5.14. 950 °C'de 3 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin EDX analizi.....	64

Şekil 5.15. 1000 °C’de 1 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin EDX analizi	65
Şekil 5.16. 1000 °C’de 2 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin EDX analizi	66
Şekil 5.17. 1000 °C’de 3 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin EDX analizi	67
Şekil 5.18. 1050 °C’de 1 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin EDX analizi	68
Şekil 5.19. 1050 °C’de 2 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin EDX analizi	69
Şekil 5.20. 1050 °C’de 3 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin EDX analizi	70
Şekil 5.21. Kaplanmamış Hardox 400 çeliğinin SEM görüntüsü ve spektrum alanı	71
Şekil 5.22. Kaplanmamış Hardox 400 çeliğinin EDX analizi	72
Şekil 5.23. Kaplanmamış Hardox 400 çeliğinin XRD analizi.....	72
Şekil 5.24. 950 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile kaplanmış Hardox 400 çeliğinin XRD analizi	73
Şekil 5.25. 1000 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile kaplanmış Hardox 400 çeliğinin XRD nalizi	73
Şekil 5.26. 1050 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile kaplanmış Hardox 400 çeliğinin XRD analizi	74
Şekil 5.27. Ortalama mikrosertliğin kaplama sıcaklığı ve süresi ile değişimi	75
Şekil 5.28. 950 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 5 N’luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili	76
Şekil 5.29. 950 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 10 N’luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili	77
Şekil 5.30. 950 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 15 N’luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili	77
Şekil 5.31. 1000 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 10 N’luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili	78
Şekil 5.32. 1000 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 15 N’luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili	79
Şekil 5.33. 1000 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 5 N’luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili	79
Şekil 5.34. 1050 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 15 N’luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili	80

Şekil 5.35. 1050 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 5 N'luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili	81
Şekil 5.36. 1050 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 10 N'luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili	81
Şekil 5.37. Aşınma hacmi S/N grafiği	82
Şekil 5.38. Kaplama sıcaklığı ve süresi ile uygulanan yüke bağlı aşınma hacmi	83
Şekil 5.39. Aşınma hacmi S/N grafiği için hata bileşen (artık) grafikleri	84
Şekil 5.40. Kaplama sıcaklığı ve süresi ile uygulanan yüke bağlı aşınma hacminin hata bileşen (artık) grafikleri	84
Şekil 5.41. Kaplamasız Hardox 400 çeliğinin 5 N'luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili.....	86
Şekil 5.42. Kaplamasız Hardox 400 çeliğinin 10 N'luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili.....	87
Şekil 5.43. Kaplamasız Hardox 400 çeliğinin 15 N'luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili.....	88
Şekil 5.44. 5 N uygulama yükündeki kaplamasız numunenin aşınma yüzeyinden alınan SEM görüntüsü	89
Şekil 5.45. 10 N uygulama yükündeki kaplamasız numunenin aşınma yüzeyinden alınan SEM görüntüsü	89
Şekil 5.46. 15 N uygulama yükündeki kaplamasız numunenin aşınma yüzeyinden alınan SEM görüntüsü	90
Şekil 5.47. 1050 °C'de 3 saat süreyle kaplanan ve 10 N uygulama yükündeki aşındırılan numunenin EDX analizi	91
Şekil 5.48. 950 °C'de 3 saat süreyle kaplanan ve 15 N uygulama yükündeki aşındırılan numunenin EDX analizi	92

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Tabakaların üretim usulleri ve kullanım yerleri	19
Çizelge 3.2. Hardox 400 çeliğinin ağırlıkça % kimyasal bileşimi	31
Çizelge 3.3. Hardox 400 çeliğinin mekanik özellikleri	32
Çizelge 3.4. 2 ^k ve Taguchi tasarım planı	34
Çizelge 4.1. Hardox 400 çeliğinin kimyasal bileşimi (ağırlıkça %).....	42
Çizelge 4.2. Ferro Krom ve Ferro Bor içeren kaplama tozları ve oranları (ağırlıkça %)	42
Çizelge 4.3. Ferro Niyobyum ve Ferro Bor içeren kaplama tozları ve oranları (ağırlıkça %)	43
Çizelge 4.4. Aşınma deneyi için belirlenen parametreler.....	48
Çizelge 5.1. 950 °C’de 1 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin kütlelesel kimyasal bileşim yüzdesi.....	62
Çizelge 5.2. 950 °C’de 2 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin kütlelesel kimyasal bileşim yüzdesi.....	63
Çizelge 5.3. 950 °C’de 3 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin kütlelesel kimyasal bileşim yüzdesi.....	64
Çizelge 5.4. 1000 °C’de 1 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin kütlelesel kimyasal bileşim yüzdesi.....	66
Çizelge 5.5. 1000 °C’de 2 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin kütlelesel kimyasal bileşim yüzdesi.....	67
Çizelge 5.6. 1000 °C’de 3 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin kütlelesel kimyasal bileşim yüzdesi.....	68
Çizelge 5.7. 1050 °C’de 1 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin kütlelesel kimyasal bileşim yüzdesi.....	69
Çizelge 5.8. 1050 °C’de 2 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin kütlelesel kimyasal bileşim yüzdesi.....	70
Çizelge 5.9. 1050 °C’de 3 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin kütlelesel kimyasal bileşim yüzdesi.....	71
Çizelge 5.10. Kaplama tabakaları için elde edilen mikrosertlik değerleri.....	74

Çizelge 5.11. 950 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 5 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri	76
Çizelge 5.12. 950 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 10 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri	77
Çizelge 5.13. 950 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 15 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri	78
Çizelge 5.14. 1000 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 10 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri	78
Çizelge 5.15. 1000 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 15 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri	79
Çizelge 5.16. 1000 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 5 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri	80
Çizelge 5.17. 1050 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 15 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri	80
Çizelge 5.18. 1050 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 5 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri	81
Çizelge 5.19. 1050 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 10 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri	82
Çizelge 5.20. Aşınma hacminin tahmin edilen model katsayıları	85
Çizelge 5.21. Aşınma hacminin ANOVA sonuçları.....	85
Çizelge 5.22. Aşınma parametrelerinin hacimsel aşınma üzerindeki etki sıralaması.....	85
Çizelge 5.23. Kaplamasız Hardox 400 çeliğinin 5 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri	87
Çizelge 5.24. Kaplamasız Hardox 400 çeliğinin 10 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri	87
Çizelge 5.25. Kaplamasız Hardox 400 çeliğinin 15 N yük uygulanmış aşınma hacmi	88
Çizelge 5.26. 1050 °C'de 3 saat süreyle kaplanan ve 10 N uygulama yükündeki aşındırılan numunenin kütleli kimyasal bileşim yüzdesi	91
Çizelge 5.27. 950 °C'de 3 saat süreyle kaplanan ve 15 N uygulama yükündeki aşındırılan numunenin kütleli kimyasal bileşim yüzdesi	92

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

Semboller

Al₂O₃	: Alümina, Alüminyum oksit
B	: Bor
B₄C	: Bor karbür
BaCO₃	: Baryum karbonat
C	: Karbon
CaCO₃	: Kalsiyum karbonat
CN	: Siyanür
CO	: Karbon monoksit
Co	: Kobalt
CO₂	: Karbon dioksit
Cr	: Krom
CrC	: Krom karbür
Fe	: Demir
FeN	: Demir nitrür
H	: Hidrojen
HCl	: Hidroklorik asit
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
N	: Azot
Nb	: Niyobyum
NbB	: Niyobyum borür
NbC	: Niyobyum karbür
NbC-B	: Niyobyum karbür–bor
NbN	: Niyobyum nitrür
NH₃	: Amonyak
NH₄Cl	: Amonyum klorür
Ni	: Nikel
P	: Fosfor
S	: Kükürt
Si	: Silisyum
SiO₂	: Silisyum oksit

Ta	: Tantal
Ti	: Titanyum
TiBC	: Titanyum bor karbür
V	: Vanadyum
VC	: Vanadyum karbür
VN	: Vanadyum nitrür
W	: Tungsten
WC	: Tungsten karbür
Zn	: Çinko

Kısaltmalar

AISI	: Amerikan demir ve çelik enstitüsü
CVD	: Kimyasal buhar çökeltme
DIN	: Alman standartlar enstitüsü
EDX	: Enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi
GDOES	: Kızdırma deşarj optik emisyon spektrometresi
HBW	: Brinell sertlik
HV	: Vickers sertliği
PVD	: Fiziksel buhar çökeltme
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
S/N	: Sinyal gürültü oranı
TRD	: Termoreaktif difüzyon
XPS	: X-ışını fotoelektron spektrometresi
XRD	: X-ışını kırınımı

1. GİRİŞ

Metalürji ve yüzey işlemlerinin gelişmesinde, içyapıyla mekanik ve fiziksel özelliklerin arasında oluşan bağlar ve bunların planlı olarak tatbik edilmesi büyük rol oynamıştır. Çağımızın metali olan demir (Fe) ve türevleri bu işlemlerin vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Yüzey işlemlerini kapsayan kaplama, metal üzerine element veya bileşiğin depolanarak kabuk sağlaması işlemini kapsar ve metalin mekanik ve termal özelliklerini artırır (İpek, 1996).

Takım çeliklerinin ömürleri, farklı kaplama yöntemleri kullanılarak arttırılmaktadır. Bu kaplama yöntemlerinden en çok kullanılanları kimyasal buhar çökeltme (CVD), fiziksel buhar çökeltme (PVD) ve difüzyonel yöntemlerdir. 5 ila 15 µm arasında kaplama kalınlıklarına sahip üç yöntem kendi içlerinde benzerlik göstermektedir. CVD kaplamanın kalınlığı, difüzyonel yönteminde oluşan kaplama kalınlığına uzak değildir (Arai, 1991). Fakat CVD ve PVD difüzyonel işlemlere göre daha pahalı ve karmaşık olup üretimleri oldukça azdır. Diğer taraftan difüzyonel yöntemler için çok kolay elde edilen aletler gerekir ve bu yöntemlerle kaplanan altlık malzemesi ile kaplama arasındaki birleşme sorunu ortadan kalkar (İpek, 1996).

Termoreaktif difüzyon (TRD) kaplama yöntemi esasen termokimyasal işlem olmasına rağmen, alışlagelmiş termokimyasal işlemlerden farklılık göstermektedir. Kaplama usulünde çelik alt tabakadaki karbon (C) ve azot (N) aşırı sıcaklıkta (800 ila 1250 °C) yüzeye difüze edilmiş halde titanyum (Ti), vanadyum (V), niyobyum (Nb), tantal (Ta), krom (Cr), molibden (Mo) ya da tungsten (W) gibi güçlü karbür ve nitrür oluşturuca refrakter geçiş metalleriyle etkileşime geçerek çelik üstünde kompakt, pürüzsüz ve ana metale güçlü şekilde sıkıca yapışmış kaplama tabakası meydana getirir. Alışlagelmiş yöntemlerin tersine meydana gelen kaplama tabakası alt tabaka üzerinde oluşur. Alt tabakayla kaplama tabakası oluşumunda bariz bir sınır mevcuttur. Fakat proses aşırı sıcaklıkta (800 ile 1250 °C) gerçekleştirildiğinden, karbür sağlayıcı elementin ana metale difüzyonu meydana gelir. Sonuç olarak bu durum metal bilimi olarak yapışık bir yapı meydana getirmektedir. TRD yönteminin olumsuz tarafına gelinecek olursa, çelik yüzeyin alt tabakadaki karbür tabakasında çalışma esnasında karbürizasyon oluşma olasılığıdır. Bu durum neticesinde sertlik ve üst kısmın yükleme kabiliyeti düşmektedir. Yaşanan olumsuzluk kullanılan “dubleks tekniği” ile giderilmiştir. Bu metotta yüzey ilk olarak karbürizasyona maruz bırakılıp ikinci olarak kaplama olayı uygulanmaktadır.

Sonuçta dekarbürizasyondan korunma sağlanır ve karbür meydana gelme olasılığı da yükselir (Matijević ve Stupnišek, 2009).

TRD yönteminde sert karbür, nitrür ve karbonitrür kaplamalar, çeliklere tuz banyosunda veya akışkan yataklı fırınlarda uygulanabilmektedir. İlk olarak Japonya’da gerçekleştirilen tuz banyosuna daldırma metodu ile karbür kaplamalar halen sanayide kullanılmaktadır. Çalışmalarda, ergimiş boraksa ilave olarak V, Ti, Nb veya Cr gibi karbür oluşturuıcı elementler kullanılır. Bu proseste kaplama tabakasının oluşmasında, çeliğin içerisinde bulunan karbonla, karbür oluşturuıcı elementlerin bir araya gelmesi etkili olmaktadır. İşlemin 800 °C’den 1250 °C’ye kadar yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmesinin sebebi, kaplama hızı ve tabakanın gelişmesinin karbonun difüzyonuna bağlı olmasıdır. Kaplanmış malzemeler soğumaya müteakip, sertleştirme amaçlı ısıtılabilir, östenitleme sıcaklığı seçilebilir ve kaplama sonrası doğrudan su verme işlemi uygulanabilir (Arai, 1991).

Tabaka kalınlığı, yüzey çalışmaları sonrasında parçanın iş ömrünü belirleyen önemli fonksiyonlardan birisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kalınlık 1 mikrondan ince olabileceği gibi birkaç milimetreyi de bulabilir. Genellikle parçanın kullanım ömrü ile kaplama kalınlığı doğru orantıya sahiptir. Buna rağmen ince kaplamaların daha çok tercih edilmesindeki sebepler aşağıda belirtilmiştir.

- ✓ Yüzey pürüzlülüğünü aynen yansıttığı için taşlama işlemlerini gerektirmez.
- ✓ Sıcaklık artış ve azalışlarında meydana gelen büzülme veya genleşmelerden çok az etkilenir.
- ✓ Ana parça elastik olduğundan, bükülmelerin meydana getirdiği aralıklar gözlenmez (İpek, 1996).

Bu tez çalışmasında, Hardox 400 çeliği TRD yöntemiyle farklı sıcaklık ve zaman aralıklarında kaplanmıştır. Kaplanan malzemelerin mikroyapı, mikrosertlik ve aşınma davranışları araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar kendi aralarında karşılaştırılarak analiz edilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

TRD yöntemi ile ilgili yapılmış çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda detaylı olarak ele alınmıştır.

Chen ve arkadaşları (1998), akışkan yataklı bir fırında kalıp çeliğinde krom karbürün termoreaktif difüzyon ile kaplanması adlı makalelerinde; saf kromun, 71Cr-29Fe-0.03C ve 66Cr-26Fe-7.7C alaşım tozlarının krom karbür (CrC) tabakalarının oluşum oranı üzerine etkilerini araştırmışlar ve kaplama tabakalarının mikroyapı, kalınlık, sertlik, X-ışını kırınımı (XRD) ve kimyasal bileşim dağılımını analiz etmişlerdir. Karbür tabakalarının oluşumunun sadece Cr tozunun saflığından değil, aynı zamanda çeliklerin nominal karbon içeriğinden ziyade TRD işlem sıcaklığında çeliklerin matrisinde çözünen C miktarından da etkilendiğini ifade etmişlerdir.

King ve arkadaşları (2004), ön nitrokarbürize edilmiş H13 takım çeliğinde, Cr(N,C) difüzyon kaplama oluşumu adlı makalelerinde; ön nitrokarbürize edilmiş H13 takım çeliği üzerine TRD yöntemi ile Cr(N,C) kaplama oluşumunun mikroyapısal süreçlerini taramalı elektron mikroskobu (SEM), XRD ve kızdırma deşarj optik emisyon spektrometresi (GDOES) ile incelemişlerdir. Hem nitrokarbürizasyon hem de TRD yöntemlerini, 570 °C’de akışkan yataklı fırınlarda gerçekleştirmişlerdir. TRD yöntemi sırasında, akışkanlaştırılmış yataktaki Cr tozundan nitrokarbürleşmiş alt tabakalara Cr ile hidroklorik asit (HCl) reaksiyonu sonucu Cr transfer edilmiştir. Giriş inert gazına %30 H₂ ilavesinin kaplama oluşum oranını arttırdığını, ancak bu durumun yüzeydeki N’nin hızlı bir şekilde kaybına sebebiyet vererek hidrojen (H) azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Artan kaplama kalınlığının nedenini tam olarak açıklaya bilmek için daha fazla araştırılma yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Ancak nitrokarbürizasyon sırasında Cr(N,C) kaplamanın mikroyapısı üzerindeki en büyük etkisinin gözeneklilik ve bir demir nitrür (FeN) örtü tabakası olduğunu gözlemişlerdir.

Sen (2005), termoreaktif difüzyon yöntemi ile CrxC kaplı yüksek kromlu çeliğin kinetiği adlı makalesinde; difüzyon yöntemi ile oluşan CrC kaplamanın teknolojik olarak çelik yüzeyler üzerindeki sertlik, aşınma, oksidasyon ve korozyona karşı dayanıklılık gibi özelliklerini incelemiştir. Altlık malzemesi olarak kullandıkları AISI D2 çeliğinin CrC kaplamasını 1223, 1273 ve 1323 K sıcaklıklarında ve 1-4 saat işlem süresi boyunca gerçekleştirmiştir. Çelik altlık tabakaları yüzeyi üzerinde oluşan fazların Cr₇C₃ ve Cr₃C₂ olduğunu XRD ile analiz etmiştir. Optik ve SEM görüntülerinden çelik yüzeyler üzerinde oluşan CrC tabakasının pürüzsüz ve kompakt olduğunu gözlemlemiştir. CrC tabakasının

sertliğini $1850 \pm 35\text{HV}_{0.025}$ olarak hesaplamıştır. Ayrıca karbür tabakası kalınlığı ile işlem süresi arasında parabolik bir ilişkinin olduğunu belirtmiş ve işlem için gerekli aktivasyon enerjisini 278 kJ/mol olarak elde etmiştir.

Wei ve Chen (2005), temassız yöntemle krom karbürün termoreaktif difüzyon kaplanması adlı makalelerinde; düşük basınçlı bir akışkan yataklı fırında modifiye edilmiş bir TRD yöntemini araştırmışlardır. Numuneleri, alaşım tozu yüzeyinin üzerine yerleştirmişlerdir. Aktivatör, gerekli işlem için çalışma atmosferini sağlamak üzere periyodik olarak alaşım tozuna sokulmuştur. Sıvılaştırılmış gaz (argon) tüketimini önemli ölçüde azalmak için imbibik basıncını $6,7 \times 10^2$ ve $5,3 \times 10^4 \text{ Pa}$ arasında tutmuşlardır. Sonuç olarak, AISI D2 takım çeliğinin $1030 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de, 4 saat süre işlenmesi suretiyle $8 \text{ }\mu\text{m}$ kalınlığında bir CrC tabakasının elde edilebildiği gözlemlenmiştir. Aktivatörün amonyum klorür'ün (NH_4Cl 'nin) aktivasyon enerjisini önemli bir şekilde düşürdüğünü ve aynı zamanda karbür tabakasının oluşum hızını arttırdığını ifade etmişlerdir.

Liu ve arkadaşları (2006), termal difüzyon işlemi ile karbür kaplama büyümesinin kinetiği üzerine çalışma adlı makalelerinde; matematiksel karbür kaplama gelişimini düzensiz difüzyon teorisi ve düzenli çözelti alt kafes teorisi temelinde modellemişlerdir. Vanadyum karbür (VC) tabakasının kalınlığı ile daldırma süresi, tuz banyosu sıcaklığı ve alt tabaka tipi arasındaki ilişkinin analizini yapmışlardır. Karbür kaplama büyümesinin, kaplamadaki C difüzyonu ile kontrol edildiğini ve tuz banyosu sıcaklığındaki artışın bu büyümeye yardımcı olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca karbür tabakasının kalınlığının daldırma süresinin kareköküne neredeyse doğrusal olduğunu ve deney sonuçlara kıyasla, modelleme sonuçlarının çok başarılı olduğunu belirtmişlerdir.

Kulu ve arkadaşları (2007), toz malzemelerin darbe aşınmasında yüzey yorgunluğu işlemleri adlı makalelerinde; toz malzemelerle ürettikleri kompozitlerin aşınma yorulması davranışlarını Hardox 400 gibi farklı geleneksel malzemelerle karşılaştırmışlar ve bu malzemelere ait yüzey yorgunluklarını incelemişlerdir. Aşınma deneyleri sonucunda, kompozit malzemelerin kütleli kayıplarının ve volumetrik aşınma hacimlerinin geleneksel malzemelerden oldukça daha yüksek olduğunu gözlemlenmiştir. Toz malzemelerle ürettikleri kompozitlerde; aşınmanın, daha sert fazda, tek veya düşük yükleme döngülerinde bir kırılma ile başladığını tespit etmişlerdir. Ayrıca bu kompozitlerde, sert faz çatlamasının ve ayrılmasının, yüzey yorgunluğu direncinde önemli bir rol oynadığını vurgulamışlardır.

Khafri ve Fazlalipour (2008a), iki katlı yüzey işlemi ile üretilen V(N,C) kaplamanın kinetiği adlı makalelerinde; tavllanmış DIN 1.2367 kalıp çeliğinin ön nitrokarbürizasyonunu takiben V'yi, TRD yöntemiyle kaplamayı ve daha sonra sert ve temper işlemeyi içeren bir dubleks yüzey işlemi geliştirmişlerdir. TRD işlemini, 1223, 1323 ve 1423 K sıcaklıklarında elektrikli rezistans fırınında 1–5 saat süre boyunca gerçekleştirilmişlerdir. Sertleştirilmiş bir difüzyon bölgesinin üzerinde ince (5 ila 40 μm) ve sert (2220 ± 40 HV) vanadyum karbonitrür yüzey tabakası oluşturmuşlardır. Mikroyapı ve XRD analizleriyle, kaplamanın V–C–N, V–C ve V–N fazlarından oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, karbonitrür tabaka kalınlığı ve çalışma süresi arasında parabolik bir ilişki olduğunu göstermişlerdir. TRD işlemi için ortalama aktivasyon enerjisinin 145,5 kJ/mol olduğu tahmin etmişler ve büyüme hızı sabitinin işlem sıcaklığına bağlı olarak $4,16 \times 10^{-10}$ ila $1,02 \times 10^{-9}$ cm^2/s arasında değiştiğini ifade etmişlerdir.

Khafri ve Fazlalipour (2008b), termoreaktif difüzyon tekniği ile kalıp çeliğinde vanadyum karbür kaplamalar adlı makalelerinde; VC'nin DIN 1.2367 kalıp çelik altlık malzemesi üzerinde TRD yöntemiyle kaplanmasını, 1-5 saat boyunca 950, 1050 ve 1150 °C'de ferro-vanadyum, NH_4Cl , alümina (Al_2O_3) ve naftalenden oluşan bir toz karışımında gerçekleştirmişlerdir. Karbür tabakalarını, mikroyapı, mikrosertlik, XRD ve kimyasal analizlerle karakterize etmişlerdir. Ayrıca kaplanmamış ve kaplanmış DIN 1.2367 kalıp çeliği için kuru aşınma testlerini, pin on disk cihazıyla 0,13 m/s kayma hızında gerçekleştirmişlerdir. Kaplama işlemi süresine ve sıcaklığına bağlı olarak, altlık malzemesi üzerinde oluşturulan VC tabaka kalınlığının 2,3 ila 23,2 μm arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. VC tabakalarının sertliğini yaklaşık 2487 HV bulmuşlardır. Aşınma deneylerinde ise kaplanmış numunelerin üstün aşınma direnci özellikleri sergilediğini belirtmişlerdir. Ayrıca inceledikleri VC kaplamanın kinetiğinde, TRD işlemi için aktivasyon enerjisinin 173,2 kJ/mol olduğunu öngörmüşlerdir.

Fan ve arkadaşları (2010), termoreaktif difüzyon tekniği ile elde edilen AISI H13 üzerindeki vanadyum karbür kaplamaların değerlendirilmesi adlı makalelerinde; AISI H13 çeliği üzerindeki VC kaplamalarını, erimiş tuz banyosunda sırasıyla 920 °C ve 1000 °C sıcaklıklarda 1 ila 6 saat süre boyunca TRD yöntemi ile hazırlamışlardır. Elde edilen kaplamaları SEM, Enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi (EDX) ve XRD ile karakterize etmişlerdir. Kaplamalarda eş eksenli taneler gözlemlemişlerdir. Tane boyutunun kaplama/altlık arayüzünden üst yüzeye doğru kademeli olarak arttığını belirtmişlerdir.

Kaplamaların düzenli durum V_6C_5 fazı ve düzensiz durum VC_x ($x=0,83-0,88$) fazlarından oluştuğunu görmüşlerdir. Çalışmalarında, kaplamanın nano çentik darbesi ve elastik modülü değerlerin sırasıyla 28.1 ± 0.7 GPa ve 421 ± 14 GPa olduğu bildirilmiştir. İşlem için gerekli aktivasyon enerjisini $199,3$ kJ/mol olarak elde etmişlerdir. Ayrıca artan işlem süresi ve sıcaklığı ile kaplama kalınlığının arttığını vurgulamışlardır.

Fernandes ve arkadaşları (2010), niyobyum karbür kaplı AISI 52100 çeliğinin aşınma davranışı adlı makalelerinde; TRD yöntemi kullanarak üretilen niyobyum karbür (NbC) kaplamanın AISI 52100 çeliğinin aşınma direnci üzerindeki etkisini araştırmışlardır. İşlem görmemiş AISI 52100 numuneleri 600 mesh gözenekli zımpara kâğıdında öğütmüşlerdir. Numuneleri, ağırlıkça %5 ferroniyobyum (ağırlıkça %65 Nb), ağırlıkça %3 alüminyum ve $Na_2B_4O_7$ 'den oluşan banyoda 4 saat boyunca 1000 °C sıcaklıkta tutmuşlardır. Daha sonra numuneleri yağ içinde soğutmuşlardır. Elde edilen kaplama tabakasını SEM ve XRD ile analiz ederek mikroaşındırıcı aşınma testlerine tabi tutmuşlardır. Analizlerden, boraks içindeki TRD işlemi ile NbC'den oluşan sert ve homojen bir kaplama tabakası elde edildiğini gözlemlemişlerdir. NbC kaplamasının AISI 52100 çeliğinin aşınma direncinde büyük bir artış sağlayarak aşınma oranını alt tabakaya göre büyük oranda azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca kaplanmış ve kaplanmamış numunelerde, aşınma hacminin ve aşınma oranının artan yük ile arttığını görmüşlerdir.

Fan ve arkadaşları (2012), termoreaktif difüzyonla işlenmiş vanadyum karbür kaplama: büyüme kinetiği modeli ve difüzyon mekanizması adlı makalelerinde; TRD işlemi ile çelikler üzerinde vanadyum karbür kaplamaların büyüme kinetiği üzerine bir matematiksel model oluşturmuşlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda, TRD işlemindeki VC kaplamaların büyüme kinetiğinin sıcaklığa, daldırma süresine ve özellikle alt tabaka bileşimlerinin kaplama kalınlaştırma oranı üzerindeki etkisine bağlı olduğunu, kaplama kalınlığının ve karbon aktivitesi arasındaki ilişkinin parabolik bir doğruyu izlediğini ifade etmişlerdir. VC kaplamalarda, karbon difüzyonunun aktivasyon enerjisini 226 ± 6 KJ/mol olarak hesaplamışlardır. TRD işleminde karbür kaplamanın büyümesine, kaplama esnasındaki tane sınırları boyunca difüzyon olan karbonun etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Shan ve arkadaşları (2012), V-Nb-RE difüzyon tekniği ile üretilen V(N,C) ve Nb(N,C) kaplamaların kinetiği adlı makalelerinde; TRD yöntemiyle AISI H13 çeliği üzerine nitrokarbürizasyon ve ardından vanadyum, niyobyum ve nadir elementler (V-Nb-RE) dahil edilerek iki katlı bir yüzey işlemi geliştirmişlerdir. TRD işlemini, erimiş boraks

tuzu banyosunda sırasıyla 1223, 1283 ve 1343 K sıcaklıklarda 1-4 saat süre boyunca gerçekleştirmişlerdir. Artan işlem sıcaklığı ve zamanıyla kaplama kalınlığının arttığını ve sertleştirilmiş difüzyon bölgesi üzerinde 6 ila 35 μm vanadyum karbonitrür ve niyobyum karbonitrür kaplama kalınlıklarının elde edildiğini belirtmişlerdir. SEM ve XRD analizlerinde, altlık malzemesi üzerinde V_8C_7 , NbC , niyobyum nitrid (NbN) ve vanadyum nitrid (VN) fazlarından oluşan sıkıştırılmış ve yoğun kaplamaların oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Kaplamaların Vickers sertlik değerinin 848 K'de 2 saat tavlandıktan sonra 1350 $\text{HV}_{0.1}$ 'ye kadar çıktığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında, V-Nb-RE biriktirme yöntemi ile elde edilen vanadyum karbonitrür ve niyobyum karbonitrür kaplamalarının tüm gelişme süreçleri bir parabolik kinetiği izlemiştir. İşlem için aktivasyon enerjisinin vanadyum karbonitrür kaplama için 215,68 kJ/mol ve niyobyum karbonitrür kaplama için ise 134,32 kJ/mol olduğunu tahmin etmişlerdir.

Khalaj ve arkadaşları (2013), termoreaktif biriktirme tekniği ile DIN 1.2210 çeliği üzerinde üretilen krom karbonitrür kaplamanın termodinamiği, kinetiği ve modellenmesi adlı makalelerinde; DIN 1.2210 çeliğine nitrürleme ve sonrasında krom TRD yöntemini barındıran iki katlı yüzey işlemi uygulamışlardır. TRD işlemini, 1-14 saat işlem süresi boyunca 550, 625 ve 700 $^{\circ}\text{C}$ 'de erimiş tuz banyosunda gerçekleştirmişlerdir. İşlem, sertleştirilmiş bir difüzyon bölgesinde 9,5 μm 'ye kadar krom karbonitrür kaplama kalınlığından oluşturulmuştur. Kaplamaların SEM ve XRD ile karakterizasyonu, onlara kaplamaların esas olarak $\text{Cr}(\text{C},\text{N})$ ve $\text{Cr}_2(\text{C},\text{N})$ fazından oluştuğunu göstermiştir. TRD yöntemi ile elde edilen krom karbonitrürün tüm gelişme süreçleri bir parabolik kinetiği izlemiştir. İşlem için aktivasyon enerjisinin 185,6 kJ/mol krom karbonitrür kaplaması olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca numunelerin iki katlı kaplamasının tabaka kalınlığını öngörmek için genetik programlamaya dayanan bir model sunmuşlardır. Modeli oluşturmak için, 82 numuneden deneysel sonuçlar kullanılarak çalışma ve testler gerçekleştirmişlerdir. Genetik programlama modellerinde girdi olarak kullanılan veriler, nitrürleme öncesi zaman, ferro-krom partikül boyutu, ferro-krom ağırlık yüzdesi, tuz banyosu sıcaklığı ve kaplama süresinden oluşan beş bağımsız parametredir. Genetik programlama modellerindeki çalışma ve test sonuçları, iki katlı kaplamanın katman kalınlığını öngörmek için güçlü bir veri sağladığını belirtmişlerdir.

Castillejo ve arkadaşları (2014), TRD ile üretilen AISI D2 üzerinde niyobyum-krom karbür kaplamaların aşınma ve korozyon direnci adlı makalelerinde; AISI D2 çelik altlık malzemesi yüzeylerine TRD yöntemini kullanarak NbC , CrC ve Nb-CrC

kaplamalar yapmışlardır. Elde ettikleri kaplamaların aşınma ve korozyon direncini incelemişlerdir. Kaplamaların morfolojisini optik mikroskop ve SEM ile kristal yapısını XRD ile ve kimyasal bileşimini EDX ve X-ışını fotoelektron spektrometresi (XPS) ile analiz etmişlerdir. Kaplamaların sertliği nanoindentasyon yoluyla ölçmüşler ve aşınmalarını ball on disk cihazında gerçekleştirmişlerdir. XRD sonuçlarından, NbC kaplama için NbC temel fazının, CrC kaplama için Cr₂₃C₆ ve Cr₇C₃ temel fazlarının ve Nb-CrC kaplama için NbC, Cr₂₃C₆ ve Cr₇C₃ temel fazlarının oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Sertlik değerlerini, Nb-CrC kaplama için $27,62 \pm 2,56$ GPa, NbC kaplama için $21,66 \pm 0,5$ GPa, CrC kaplama için $14,7 \pm 1,1$ GPa ve kaplanmamış çelik için $6,70 \pm 0,28$ GPa olarak ölçmüşlerdir. Diğer kaplamalara göre Nb-CrC kaplamanın aşınma direncinin daha yüksek, ancak korozyon direncinin daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir.

Kurt ve arkadaşları (2014), termoreaktif difüzyon tekniği ile depolanan VC ve CrC kaplamaların mikroabrazyon aşınma davranışı adlı makalelerinde; DIN 1.2367 kalıp çeliğinin alt katmanı üzerinde TRD yöntemi ile kaplama işlemini, 2-4 saat boyunca 1000, 1050 ve 1100 °C sıcaklıklarında ferrovanadyum, ferrokrom, NH₄Cl, Al₂O₃ ve naftalenden oluşan bir toz karışımıyla gerçekleştirmişlerdir. Karbür tabakalarını, mikroyapı, mikrosertlik, XRD ve kimyasal analizlerle karakterize etmişlerdir. Ayrıca kaplamalı numunelerin aşınma deneylerini üç farklı yük (1, 2 ve 3 N) ve üç farklı dönme devirlerinde (40, 80 ve 160 rpm) gerçekleştirerek aşınma izlerini SEM ve EDX ile analiz etmişlerdir. Kaplama işleminin süresine ve sıcaklığına bağlı olarak, altlık malzemesi üzerinde oluşan VC ve CrC tabakalarının kalınlıklarını sırasıyla 7 ila 30 µm ve 5 ila 17 µm aralığında elde etmişlerdir. VC ve CrC tabakalarının maksimum sertlik değerlerini sırasıyla 2537 ve 1973 HV olarak ölçmüşlerdir. Aşınma deney sonuçlarında, uygulanan yük ve dönme devri değerlerine bağlı olarak, yiv açma ve yuvarlanma mekanizmalarının aşınmış yüzeylerde baskın aşınma mekanizmaları oluşturduğunu belirtmişlerdir.

Woydt ve Mohrbacher (2014), kobalt (Co) veya Fe₃Al ile bağlanmış NbC'lerin tribolojik ve mekanik özellikleri adlı makalelerinde; hacimde %8 kobalt (NbC-8Co), %12 kobalt (NbC-12Co) veya %12 Fe₃Al (NbC-12Fe₃Al) ile bağlanmış NbC kaplamaların mekanik ve tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Kaplamaların sertliklerini ve sıcaklığa bağlı elastik ve bulk modüllerini belirledikten sonra tribolojik özelliklerini kuru kayma şartları altında 23 °C ve 400 °C sıcaklıklardaki ortamlarda incelemişlerdir. Aşınma oranını, 21 mm çapındaki Al₂O₃ (%99,7) küresel ucun yaklaşık 600 MPa basınç ve 10

N'luk yük altında, 5000 m kayma mesafesi boyunca farklı kayma hızlarında kaplamalara temas ettirilmesiyle hesaplamışlardır. Hacimce %12 Fe₃Al ile bağlanmış NbC kaplama (NbC-12Fe₃Al), herhangi bir girinti yükünde hacimce %12 kobalttan (NbC-12Co) daha yüksek bir sertlik seviyesi sergilediğini ve en düşük sertliği %8 kobalt içeren kaplamada (NbC-8Co) elde ettiklerini belirtmişlerdir. Artan sıcaklıkla kaplamaların elastik ve bulk modüllerinin azaldığına değinmişlerdir. Hacimce %8 ve %12 kobalt (Co) ile bağlanmış NbC kaplamanın, 7 m/s kayma hızının üzerinde, en düşük aşınma oranı sergilediğini vurgulamışlardır.

Avila ve arkadaşları (2015), termoreaktif biriktirme/difüzyon tekniği kullanılarak gri dökme demir üzerinde üretilen vanadyum karbür kaplamalar adlı makalelerinde; perlitli matris, lamel grafit ve toplam karbon oranı %3,5 olan gri dökme demiri VC ile kaplamışlardır. TRD işlemin erimiş boraks banyosunda 2, 4 ve 6 saat boyunca 1173, 1223 ve 1273 K sıcaklıklarda gerçekleştirilmişlerdir. Karbür oluşturuca eleman olarak ferro vanadyum ve indirgeyici etken olarak alüminyum kullanılmışlardır. Kaplamaları, SEM, Auger elektron spektroskopisi ve XRD ile karakterize etmişlerdir. TRD yöntemi ile gri dökme demirin VC kaplanabildiğini, elde edilen kaplama kalınlıklarının 10 mikrondan daha fazla olduğunu, VC'nin gri dökme demir üzerindeki aktivasyon enerjisi değerin, düşük karbon içeriğine sahip çelik altlık malzemesi için bildirilenlerden daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Bu sayede karbon içeriği ve oluşum oranı arasında orantılı bir ilişki olmadığını belirlemişlerdir.

Castillejo-Nieto ve arkadaşları (2015), TRD ile büyütülen vanadyum-niobyum karbür tabakaların aşınma direnci adlı makalelerinde; çeliğin yüzey sertliğini ve aşınma direncini arttırmak için TRD tekniğini kullanarak, Nb-V kompleks karbür kaplamaları, AISI D2 çelik yüzeyler üzerine uygulamışlardır. Karbür kaplama işlemini; 2, 3, 4 ve 5 saat boyunca 1223, 1293 ve 1363 K sıcaklıklarda ferroniobium, ferrovanadyum ve alüminyum içeren erimiş boraks kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Kaplama tabakalarını, SEM, XRD ve EDX ile karakterize etmişlerdir. Ayrıca kaplamaların sertlik ve aşınma performanslarını belirlemişlerdir. Sonuçta, karbür kaplamaların TRD yöntemi ile gerçekleştirilebildiğini, kaplama süresi ve sıcaklığının artmasıyla kaplama kalınlığının arttığını gözlemlemişlerdir. XRD ile kaplama bileşiklerinin ikili bileşikler (NbC ve VC) ve üçlü bir bileşik (NbVC₂) tarafından oluştuğunu analiz etmişlerdir. Elde edilen sertlik değelerinin ikili bileşiklerde yaklaşık olarak 24 ile 25 GPa arasında, üçlü bileşikte ise 38 GPa olduğunu ve üçlü bileşikte oluşan sertlik değerin süper sert malzemelerden elde

edilen değere yakın olduğunu ifade etmişlerdir. Son olarak, kaplama tabakasının altlık malzemesinden daha düşük bir sürtünme katsayısına sahip olduğunu ve kaplanmamış D2 çeliğinden daha iyi aşınma performansı gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Orjuela-Guerrero ve arkadaşları (2015), V ilavesinin termoreaktif difüzyon yöntemi ile üretilen VC kaplamalarının sertlik, yapışma ve sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi adlı makalelerinde; VC kaplamaları, vanadyum içeriğinin bir fonksiyonu olarak mekanik özelliklerini değerlendirmek için TRD yoluyla AISI H13 ve AISI D2 çelik altlık malzemeleri üzerine uygulamışlardır. Kaplamaların kimyasal bileşimini X-ışını floresanı, kristal yapıyı XRD ve kaplamanın morfolojisini SEM ile karakterize etmişlerdir. Ayrıca kaplama yüzeyindeki sertlik değerini nanoindentasyon ile ölçmüşler ve kaplamanın tribolojik davranışlarını bal on disk ile incelemişlerdir. TRD işleminde, V ilavesinin kaplanmış yüzey içerisindeki VC içeriğini ve kaplamanın sertliğini arttığını ve kaplamanın altlık malzemesine daha iyi yapışmasını sağladığını belirtmişlerdir. Kaplamadaki VC artışın kaplanmış D2 çeliğinde ağırlıkça %61,507'ye, kaplanmış H13 çeliğinde ise ağırlıkça %52,166'ya kadar çıktığını, sertliklerinin ise sırasıyla 3000 HV ve 2300 HV civarlarında olduğunu vurgulamışlardır. SEM analizlerinden, D2 çeliğine uygulanan kaplamaların H13 çeliğine uygulanan kaplamalardan daha kompakt olduğunu gözlemlemişlerdir. Aşınma testlerinde ise kaplamadaki V artışıyla sürtünme katsayısının azaldığını belirlemişlerdir.

Biesuz ve Sglavo (2016), UNI 42CrMoS4 (AISI 4140) çeliğinde TRD tekniği ile elde edilen krom ve vanadyum karbür ve nitrür kaplamalar adlı makalelerinde; farklı TRD davranışlarını analiz etmişlerdir. İşlemleri, 825, 900 ve 1000 °C sıcaklıklarda hem nitrürlenmiş hem de yalın haldeki çelik üzerinde gerçekleştirilmişler ve numuneleri daha sonra su içinde soğutmuşlardır. Farklı işlem koşulları altında Cr_7C_3 , V_6C_5 ve VN'den oluşan sert ve yoğun V, CrC ve VN kaplamaları elde etmişlerdir. Tabakaların iki farklı karbürden oluşan iki fazlı (bifazik) olduğunu gözlemlemişlerdir. Kaplamaların ortalama mikrosertliğini 1717 ± 170 ila 2451 ± 236 HV_{0.02}, yüzey pürüzlülüğünü (Ra) ise 0,2 ila 1,2 µm değerleri arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Tabaka kalınlığının parabolik olarak zamana ve Arrhenius benzeri bir davranışla sıcaklığa bağlı olduğunu vurgulamışlardır.

Ghadi ve arkadaşları (2016), termal reaktif difüzyonla CK45 çeliğinde krom ve vanadyum karbür kompozit kaplamaların araştırılması adlı makalelerinde; TRD yöntemi ile CK45 çeliğinde Cr ve VC kompozit kaplamaların oluşma olasılığını araştırmışlardır. İki farklı banyo (metal ve oksit) ve farklı altlık malzemeleri (CK45 çelik ve saf demir)

kullanmışlardır. CK45 çeliğinde, CrC'nin temel fazını (Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3) ve VC'nin temel fazını (V_8C_7) içeren kompozit karbür kaplamalar elde etmişlerdir. Ayrıca XRD sonuçlarına dayanarak karbür kaplama tabakasında Cr_2VC_2 karmaşık karbür fazı oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Takviyenin temel faza oranının, metal banyosu ve oksit banyosu için sırasıyla 0,37 ve 0,47 olduğunu belirtmişlerdir. Metal banyoda CrC temel fazındaki VC'nin faz dağılımını oksit banyosundakinden daha homojen gözlemlemişlerdir. Kompozit karbür kaplamanın kalınlığını, metal banyoda oksit banyosundan 6 μm daha büyük bulmuşlardır. Karbona ek olarak, altlık malzemesinden kaplamaya demir difüzyonu da meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak Cr/V metal tozları veya Cr/V oksit tozlarından oluşan boraks banyolarındaki CK45 numunesi üzerinde kompozit CrC ve VC kaplamaların başarıyla oluşturulduğunu ifade etmişlerdir.

Wu ve arkadaşları (2016), toz daldırma yöntemi ile Cr_7C_3 – CrB kompozit tozlarının sentezi adlı makalelerinde; Cr_7C_3 – CrB difüzyon tabakası kaplı B_4C kompozit tozları, reaktanlar olarak Cr ve B_4C tozlarını kullanarak bir toz daldırma yöntemiyle sentezlemişlerdir. İşlemden geçirdikleri tozların faz bileşimlerini ve mikro yapılarını, XRD ve SEM ile karakterize etmişlerdir. Sonuçta, faz bileşimlerinin ve üretilen Cr_7C_3 ve CrB'nin oranlarının, reaksiyon sıcaklıkları ve başlangıç tozlarının bileşimi ile değiştiğini belirlemişlerdir. Ayrıca Cr'nin B_4C 'ye mol oranının 3:1 olduğu ve 4 saat boyunca 900°C 'de işlemden geçirdikleri toz karışımlarının, Cr_7C_3 -CrB kaplı B_4C kompozit tozlarının sentezleri için daha uygun olduğunu ifade etmişlerdir.

Soltani ve arkadaşları (2017), termoreaktif difüzyon tekniği ile AISI L2 çeliğinde üretilen niyobyum karbür kaplamaların değerlendirilmesi adlı makalelerinde; TRD yöntemiyle, karbon içeren alt tabakalar üzerinde sert metal karbür kaplamaların üretilmesi için yapılan yüksek sıcaklıktaki işlemi incelemişlerdir. Çalışmalarında, NbC kaplamaları, düşük alaşımlı özel amaçlı takım çeliği (AISI L2) üzerinde termoreaktif toz paketi işlemi ile üretmişlerdir. İşlem, farklı zamanlarda ve sıcaklıklarda ferroniyobyum, NH_4Cl ve Al_2O_3 tozlarından oluşan bir toz karışımı ile kapalı bir kutu içinde yapılmıştır. Tozların oranını kaplamaların kalınlığına göre optimize etmişlerdir. NbC'nin varlığını XRD ile incelemişlerdir. Ayrıca işlem süresi ve sıcaklığa bağlı olarak kaplamanın kalınlığı tahmin eden ampirik denklemler üzerinde durmuşlardır. Bununla birlikte, kaplamanın farklı yükler altındaki aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak, kaplama işlem sıcaklığı ve zamanının artması kaplama kalınlığını arttırdığını ve altlık malzemesi üzerinde NbC kaplamasının oluştuğunu, altlık malzemesinin Nb

difüzyonundan etkilenmediğini ve dolayısıyla kaplama ile altlık malzemesi arasında geçiş bölgesi olmaksızın düz bir yüzeyin elde edildiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca yalın metale kıyasla, kaplanmış metallerde daha yüksek aşınma direnci ve daha düşük sürtünme katsayısı elde edildiğini vurgulamışlardır.

Amaya ve arkadaşları (2018), termoreaktif difüzyon niyobyum karbür (NbC) kaplama kullanılarak palm biyodizel uygulamasında gri dökme demir için korozyon direnci geliştirilmesi adlı makalelerinde; dizel yakıt ve palm biyodizeliyle sürekli temas halinde gri dökme demir üzerinde TRD kullanarak biriken NbC kaplamaların korozyon direncini incelemişlerdir. Hem kaplanmış hem de kaplanmamış numuneleri daldırma testlerine, 473 K'de döngüsel oksidasyona ve bir elektrokimyasal empedans spektroskopisi testine tabi tutmuşlardır. Kaplamaları, SEM ve XRD ile karakterize etmişlerdir. Daldırma ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi kullanarak yaptıkları korozyon testlerinin sonuçlarında, NbC kaplamaların gri demire kıyasla palm biyodizel ortamındaki bozulmaya karşı koruma için yüksek antikorozyif özellikler sunduğunu görmüşlerdir. NbC ile kaplanmış numunelerdeki korozyon oranının, gri döküm numunelerinkinden üç kat daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. SEM ve XRD testlerinde, Fe_2O_3 , Fe_3O_4 ve $FeO(OH)$ varlığının gri dökme demirde korozyonunun şiddetini ortaya çıkardığını analiz etmişlerdir. Sonuç olarak, NbC kaplamaların, gri dökme demirin biyoyakıtla sürekli temas halinde kullanıldığı uygulamalarda, palm biyodizelinin aşındırıcı etkilerini azaltmak için uygun bir alternatif olabileceği sonucuna varmışlardır.

Görka ve arkadaşları (2018), abrazyif aşınmaya dirençli seçilmiş konstrüksiyon malzemeleri ile ilgili çöktürülmüş nanokristal kaplamaların özellikleri ve yapısı adlı makalelerinde; S355N çelik bir altlık malzemesi üzerinde, bir demir nano alaşım matrisine uygulanan manuel metal ark ile biriktirilmiş nanokristal kaplamaların (Fe-Cr-Nb-B) özelliklerini incelemişlerdir. Elde edilen bindirme kaynaklarını, makro ve mikroskobik metalografik incelemelere tabi tutmuşlar, tane boyutunu XRD ile gözlemlemişler ve çöktürülen kimyasal bileşimini SEM ve EDX ile analiz etmişlerdir. Analiz sonuçlarında, kaplamaların nanokristal olarak sınıflandıran 20 nm boyutunda kristalitlerden oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Nanokristal kaplamaların diğer malzemelere kıyasla daha yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Nanokristal kaplama sertliğinin tipik bir Hardox 400 çeliğinden yaklaşık %60 daha fazla, aşınma direncinin ise 11 kat daha yüksek olduğunu vurgulamışlardır.

Hacısalıhoğlu ve arkadaşları (2018), NaCl çözeltisinde plazma nitrürlenmiş Hardox çeliklerinin aşınmaya etkisi adlı makalelerinde; plazma nitrürlenme işleminin farklı Hardox çeliklerinin (400, 450 ve 500 tipi) yapısal, aşınma, korozyon ve tribokorozyon özellikleri üzerindeki etkisini XRD, SEM, mikro sertlik, 3D profilometre ve pistonlu aşınma ile analiz etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, artan nitrürlenme süresinin, Hardox çeliğinin yumuşamasına neden olduğunu ve 4 saatlik nitrürlenmenin, aşındırıcı ortamda aşınma direncini azalttığını tespit etmişlerdir. Bununla beraber, nitrürlenmenin malzemelerin korozyon davranışını kötüleştirdiğini, homojen korozyon davranışının kaybolduğunu ve oyuk korozyonuna neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Buna karşın, 1 saatlik nitrürlenmenin, özellikle kuru koşullarda aşınma ve korozyon direncinin artmasında daha etkili olduğunu müşahade etmişlerdir. Sonuç olarak, kısa süreli nitrürlenme işleminin, farklı Hardox çeliklerinin aşınma ve korozyon direnci açısından daha etkili olduğunu vurgulamışlardır.

Kılınç ve arkadaşları (2018), AISI 1010 çeliğinde nitro-kromize işlemi ile depolanan Cr-Al-N esaslı kaplamaların özellikleri adlı makalelerinde; AISI 1010 çeliğini 560 °C’de 8 saat boyunca N ve amonyak (NH₃) ortamında nitrürlenmişlerdir. Nitrürlenmiş çelik numuneleri etil alkol ile temizledikten sonra 1000 °C’de 2 saat boyunca ferro Cr, alüminyum, NH₄Cl ve Al₂O₃ oluşan toz karışımında TRD yöntemi ile kaplamışlardır. Kaplama işlemlerinde toz karışımlar içerisindeki alüminyum miktarını ağırlıkça farklı kombinasyonlarda seçmişlerdir. Kaplama banyosundaki alüminyum içeriğinin, krom alüminyum nitrür tabakasının özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuçta, AISI 1010 çeliğinde oluşturulan krom alüminyum nitrür tabakasının Optik ve SEM incelemesinin kompakt ve pürüzsüz bir morfolojiye sahip olduğunu, kaplama tabakasının yoğun, gözeneksiz ve laminar bir yapı sergilediğini gözlemlemişlerdir. XRD ile önceden nitrürlenmiş AISI 1010 çeliğinde oluşan kaplama tabakasının Cr₂N, (Cr, Fe)₂N_{1-x}, Fe₂N ve AlN fazlarına sahip olduğunu analiz etmişlerdir. Kaplama banyosundaki alüminyum içeriğine bağlı olarak, krom alüminyum nitrür tabakasının kalınlığının 5,67 ± 0,8 ila 14,8 ± 1,5 µm arasında değişmekte olduğunu, alüminyum içeriği arttıkça kaplama tabakasının kalınlığının da arttığını belirlemişlerdir. Yüzeyden içeriye doğru kesit üzerinde krom alüminyum nitrür kaplı AISI 1010 çeliğinin EDX analizinde, Cr, alüminyum ve N konsantrasyonlarının matrisinkinden daha yüksek olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca kaplama tabakasında Cr, Al, N, C ve Fe elementlerinin varlığını belirlemişlerdir.

Amaya ve arkadaşları (2019), termoreaktif difüzyon vanadyum karbür (VC) kaplama ile kaplanmış gri dökme demirde palm biyodizelin koroziyifliği adlı makalelerinde; palm biyodizelin aşındırıcılığını değerlendirmek ve gri dökme demir korozyon davranışı ile karşılaştırmak için TRD yöntemini kullanarak gri dökme demiri VC kaplamışlardır. VC kaplı ve kaplanmamış gri dökme demir numuneleri, daldırma korozyon (291 K ve 313 K), döngüsel oksidasyon ve elektrokimyasal empedans spektrometri testlerine tabi tutmuşlardır. Korozyona daldırma testinde, VC kaplamanın gri dökme demiri biyodizelin koroziyifliğine karşı koruduğu sonucuna varmışlardır. Elektrokimyasal testlerde, kaplanmış numuneler için polarizasyon direncinin 2,5 kat daha yüksek olduğunu görmüşler, bunun da daldırma testleri ile elde edilen sonuçları güçlendirerek VC kaplamaların koruyucu davranışını onayladığı kanısına varmışlardır.

Katinas ve arkadaşları (2019), electro-kıvılcım biriktirmesi ile çelik Hardox 400 için abrazif aşınma direncinin geliştirilmesi adlı makalelerinde; Hardox 400 çeliğinin yüzeyini sert alaşımlı karbürlerden yapılmış elektrotlar [T15K6 (79% WC + 15% TiC + 6% Co), WK6 (94% WC + 6% Co)], demir [12S2 (12% Ni + 2% Si + 15% Cr₃C₂ + 71% Fe), K4F (15% WK3 (97 WC + 3 Co) + 4% Cr₃C₂ + 1% V + 80% Fe)] ve tungsten sisilisit bazlı [WSi₂ (76.6% W; 23,4% Si)] kompozit malzemeler kullanarak elektro kıvılcım biriktirme yöntemi ile kaplanmışlardır. Kaplanmış Hardox 400 çeliğinin fiziksel, mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Kaplanmış yüzeylerdeki kaplama kalınlıklarının ve sertliklerinin kaplama kompozit malzeme türüne bağlı olarak farklılıklar gösterdiğini belirtmişlerdir. T15K6, WK6 ve WSi₂ alaşımlarını içeren sert alaşımlı elektrotlar ile kaplanmış yüzeylerin en yüksek sertliğe sahip olduğunu, bazı kaplamaların Hardox 400 çeliğinden daha yüksek aşınma direnci sergilediğini ifade etmişlerdir. Ayrıca kaplamaların optimal kalitesinin 1,5 J'den düşük bir elektrik darbe enerjisi durumunda elde edildiğini, daha yüksek elektrik darbe enerjisinin tabakalarda gözeneklerin ve mikroçatlakların oluşmasına olanak sağladığını ve dolayısıyla bu durumun da aşınma direncini olumsuz etkilediğini vurgulamışlardır.

Franco ve arkadaşları (2020), toz metalürjisi ile işlenmiş M2 yüksek hız çelik üzerine çok bileşenli bor ve niyobyum kaplama adlı makalelerinde; toz metalürjisi yöntemi ile üretilen yüksek hız çeliği M2 üzerinde bor (B) ve Nb esaslı bir kaplama gerçekleştirmişlerdir. İlk olarak, Nb borlama parametrelerini tahmin etmek için ThermoCalc ile hesaplamalar yapmışlardır. Daha sonra, sementasyonla termokimyasal işlemleri aşamalı olarak ve eş zamanda gerçekleştirmişlerdir. Kaplamaların

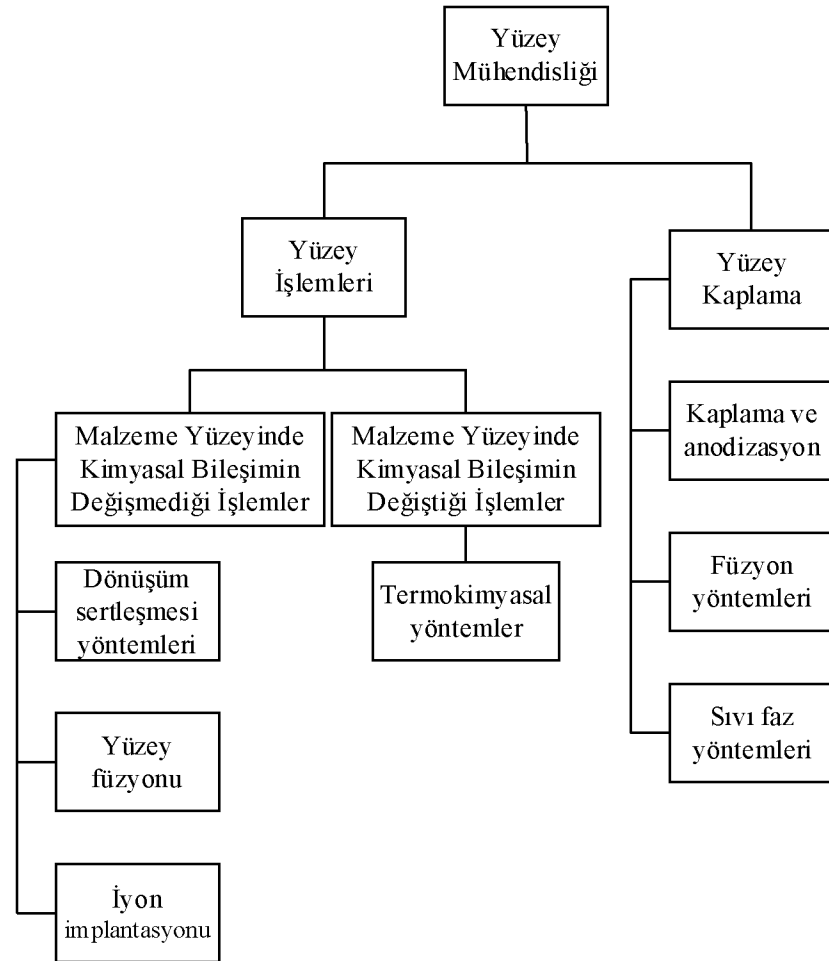
mikroyapılarını, fazlarını, sertliklerini, pürüzlülük değerlerini, aşınma dirençlerini ve sürtünme katsayılarını incelemişlerdir. B-Nb esaslı kaplamalarda NbC, demir boridler ve niyobyum borürlerin (NbB'lerin) oluştuğunu, B₂Nb fazının niobize etme ve ardından borlama işlemi ile sağlandığını gözlemlemişlerdir. Elde edilen fazların ThermoCalc tarafından hesaplananınkinden biraz farklı bulunduğunu ve bu durumun B₂Nb fazının amorf B kullanılarak eşzamanlı niyobyum boronizasyonu ile oluşturulmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Eşzamanlı amorf B ve niobize edici işlemlerle üretilen kaplama sertliğinin 3000 HV_{0.025}'ten daha yüksek bir sertliğe ulaştığını, ancak beklendiği gibi sert katmanın altında sertlik değerlerinde bir değişiklik olmadığını vurgulamışlardır. Ayrıca kaplamaların altlık malzemesinden daha yüksek bir pürüzlülüğe sahip olduğunu, buna rağmen altlık malzemesine göre çoğu sert kaplamaların daha düşük bir sürtünme katsayısı sağladığını belirtmişlerdir. En iyi aşınma direncinin ise B kaplamasından elde edildiğini ifade etmişlerdir.

3. GENEL BİLGİLER

3.1. Yüzey Mühendisliği Teknikleri

Yüzey mühendisliği teknikleri, sağladığı teknik ve ekonomik avantajları sayesinde büyük bir ilgi görmüştür. Bunun nedeni, teknolojik ihtiyaçlara cevap verebilecek bazı ürünlerin sadece kaplama işlemleriyle elde edilebilmesi ya da bu yolla ekonomik hale getirilmesinin sağlanmasıdır.

Yüzey mühendisliği teknikleri temelde iki gruba ayrılır. Bunlar, yüzey işlemleri ve yüzey kaplamalarıdır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Yüzey mühendisliği teknikleri (Yılmaz, 2008)

Yüzey işlemleri, malzeme yüzeyinde kimyasal bileşimin değişmediği ve değiştiği işlemler olarak ikiye ayrılır ve bunlarda kendi aralarında gruplandırılır. Genellikle bir malzeme yüzeyine başka bir malzeme difüzyonu ile yüzeyde bir bileşik tabakası oluşturma esasına dayalı tekniklerdir. Bunlardan en çok kullanılanlarına karbürleme, nitrürleme, karbünitrürleme, borlama ve kromlama örnek verilebilir. **Yüzey kaplamaları**

ise bir malzeme yüzeyine başka bir malzemenin katılması ya da çöktürülmesi esasına dayanır. Kaplama malzemesi bulunduğu fiziksel hale göre;

1. Gaz halinde yapılan kaplamalar (CVD, PVD ve plazma destekli diğer kaplamalar),
2. Çözültiden gerçekleştirilen kaplamalar (Elektrokimyasal kaplama, kimyasal redüksiyon işlemleri, akımsız kaplamalar),
3. Sıvı veya yarı sıvı halden yapılan kaplamalar (Lazer, kaynak, termal sprey yöntemleri) olarak sıralanır (İnternet adresi 1, 2020).

Kaplama, metal ve alaşımların yüzeylerini korozyona karşı güçlü hale getirmenin en etkili yollarından biri olup ana malzemeden farklı özellikler sergilerler. Kaplama yöntemleri çok çeşitlidir ve çalışmanın amacına göre değişiklik gösterir. Bunlar altlık ve kaplama malzemesi, kullanım alanları, üretim yöntemleri ve ekonomik koşullardır. Kaplanacak malzemenin seçimi ve türü malzemeden istenen sertliğe ve korozyona olan dayanımına bağlıdır (İpek, 1996).

Parça ömrünün arttırılmasında kullanılan önemli yollardan birisi, sert kaplamalarla malzemenin korunmasıdır. En uygun kaplama malzemesi için birçok kriterle ihtiyaç duyulur. Bu durum çok sert malzemelerin özel ihtiyaçlarını karşılamak için gereklidir. Bir dizi avantajdan vazgeçmenin yanında altlık ile kaplama özelliklerinin birbirinden farklı olması, istenilen kompoziti sağlar. Şekil 3.2, bize bu durumu göstermektedir.



Şekil 3.2. Kaplama yapılan malzemede oluşan bölümler

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi kaplama işlemi yapılan bir malzemede, altlık, tabaka/altlık arayüzeye ve tabaka olmak üzere üç bölge bulunmaktadır ve her bölge değişik özelliklere sahiptir. Altlık bölgesi meydana gelen yapışmayı/yüzey etkileşimini ve termal genleşmeyi gösterir. Tabaka/altlık arayüzey bölgesi, kaplama malzemesi olmanın yanı sıra sertlik, mukavemet, gerilmeler, termal kararlılık ve iletkenlik gibi

özellikleri ihtiva eder. Tabaka bölgesi ise dış etkenlere karşı ana (altlık) malzemeyi koruyan kaplama bölgesidir (İpek, 1996).

Malzeme yüzeylerinin dekarbürizasyon işlemi, karbürleme, borlama, niyobyumlama, nitrürleme ve vanadyumlama, termokimyasal difüzyon bir diğer deyişle termokimyasal işlemler olarak çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilir. Bu yöntemlerle amaçlanan, difüzyon yöntemiyle malzemenin yüzeyinde değişikliğe yol açmaktır. Bu durum da yabancı element atomlarının kullanılmasıyla mümkündür. Bu sayede üretilmiş olan tabakalar malzemenin özel kullanma amacına göre uygulanır ve alaşımı düşük veya alaşımsız olarak malzemenin yüzeyine alaşım elementi biriktirilir (Sinoplu, 2012).

Kromlama, vanadyumlama, niyobyumlama ve krom–vanadyumlama daha az yaygınlaşmış metal difüzyon teknikleriyken, karbürleme ve nitrürleme en bilinen yöntemlerdendir. Bahse konu yöntemlerle malzemelerde karışık kristal yapıya sahip yüzey tabakaları oluşturulabilir. Malzemelerin korozyon dayanımını ve aşınma direncini yükseltmek termokimyasal tekniklerin yardımıyla mümkün olmaktadır. Çizelge 3.1’de oluşturulmak istenen tabakaların hangi usullerle üretilebilecekleri, çalışma sıcaklıkları ve hangi mekânlarda nispeten etkili uygulanabilecekleri sunulmuştur. Difüzyonla kaplama tekniğinde, metal (Ti, Nb) veya metal olmayan (N, C) kaplama malzemesiyle altlık arasında kimyasal bir tepkime meydana gelmektedir. Altlık ile kaplama arasında bu denli güçlü bağların oluşması taban ile tabaka arasındaki element alışverişi sonucu ortaya çıkmaktadır (Sinoplu, 2012).

Difüzyonel kaplama işleminin, çift türlü yüzey modifikasyonuna sahip olması difüze olan elementin atom çapına bağlılığındandır. Bu işlemin birincisi, harici tabaka oluşumudur ki bu, ufak boyutlu atomun alt tabaka ürününe göre difüzyon sonucunda arayer solid eriyiğin meydana gelmesiyle oluşur. Karbonitrürlemede arayer katı eriyik oluşurken, nitrürleme ve borlamada ise yüzeyde yeni bir bileşik oluşmaktadır. İkincisi ise birincisiyle aynı biçimde büyük boyutlu atom solid eriyik oluşturur. Bununla beraber kromlamada ve alüminyumlamada olduğu gibi bileşik oluşumu söz konusudur (Yıldırım, 2016).

Çizelge 3.1. Tabakaların üretim usulleri ve kullanım yerleri (Yıldırım, 2016)

Usul	Difüze Edilen Elementler	Uygulanan Madde				Kaplama Sıcaklığı (°C)	Altlık Ürün						Sertlik	Uygulama Alanı
		Toz	Toz Banyosu	Gaz	Plazma		Düşük Alaşımlı Çelik	Cr Çeliği	Cr+Ni Çeliği	Süper Alaşım	Dökme Demir	Ti Malzeme		
Karbürleme	C	x	x	x	x	850-950	x	x					700-1000	Aşınma
Nitrürleme	N	x	x	x	x	500-600	x	x				x	700-1500	Aşınma Sürtünme
Karbonitrürleme	C + N		x	x	x	500-900	x	x					700-1500	
Borlama	B	x	x	x	x	800-1050	x	x	x	x			1500-2500	Aşınma Oksidasyon Korozyon
Silisyumlama	Si	x		x	x	950-100	x	x					-	
Alüminyumlama	Al	x				750-1200	x	x		x			200-1200	
Kromlama	Cr	x				900-1100	x	x		x			1400-200	Aşınma Korozyon Oksidasyon
Çinko difüzyon tabakaları	Zn	x				400-450	x				x		300-400	

3.1.1. Karbürleme (Sementasyon)

Sünek ancak sertleştirilemeyen düşük karbonlu çeliklerin yüzeyine atomsal karbon difüze edilmesi prensibine dayanan karbürleme veya diğer ismiyle sementasyon, bir termokimyasal işlemdir. Karbürleme işlemi, katı, sıvı ve gaz fazlarında plazma olarak uygulanabilir (Said, 2012).

Odun kömürleri, kok veya kemik kömürü, katı karbürleme işleminde ana bileşen olarak kullanılmaktadır. Baryum karbonat ($BaCO_3$) ve kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) gibi en etkili alkali bileşikler de karbürizasyon işlemine ilave edilebilirler. Bunlar karbürizasyon süresini kısaltır. Ortam sıcaklığının arzu edilen konuma gelmesi uzun sürer. Bunun sebebi, ısı iletiminin odun kömürüne bağlı olarak yetersiz olmasıdır. Uzun

süren zaman zarfından sonra elde edilen yüksek sıcaklıklarda karbon monoksit (CO) ve CO'dan oluşan 2CO gaz karışımı oluşur. Bu gaz karışımı C ve karbon dioksit (CO₂) olarak parçalanır. C ostenit tarafından yapıya alınır. CO₂ ise tekrar karbonla reaksiyona girerek tepkime işlemleri devam eder. Başlangıçta hızlı bir şekilde yüzeyde artan karbon miktarı gittikçe yavaşlayarak sıcaklık ve CO ile CO₂ gazlarının oranına bağlı olarak bir değer alır (Çelik, 1989).

Tuz banyoları, sıvı karbürleme çalışmasında kabürleme ortamı olarak kullanılmaktadır. Bu işlemde, düşük karbonlu çelik malzemeler bir ön ısıtmaya tabi tutulduktan sonra bir tuz eriyiği içine daldırılırlar, sıcaklık 850-990 °C civarlarındadır. Bu tuzlar siyanür (CN) içeren ve kolay bulunan tuzlardır. CN, yüksek banyo sıcaklıklarında parçalanarak C ve N verir. N, karbürleme işlemini kolaylaştırır. Çalışma süresi, tuz eriyiğinin ısı iletimine bağlı olarak kısadır ve iş parçası üzerindeki çarpılma ve tane büyümesi riski azalış gösterir. Bu tekniğin olumsuz yönü ise yatırım maliyetinin yüksek ve CN'nin zehirli maddelerden oluşmasıdır (Çelik, 1989).

Metan, etan ve propan gibi farklı hidrokarbonlar fırın dışında oluşturularak, fırına verilir. Karbürleme etkisi, kullanılan gazın etkileşimine göre farklılık gösterir ve iş parçası yüzeyinde arzu edilen karbon konsantrasyonu elde edilebilir. Gaz karbürleme çalışmasında elde edilen veriler optimum düzeyde ayarlanabilmektedir. Çalışma sonrası ve öncesindeki iş parçalarının yüzey kaliteleri birbirine çok yakın kalabilmektedir. Gaz ortamda karbürlemenin temiz bir yöntem olması sürekli çalışmayı mümkün kılmaktadır. Ancak gazın elde edilmesi ve bileşimin sürekli kontrol edilmesi zordur. Ayrıca karbürleme ünitesinin kurulum maliyeti yüksektir (Yıldırım, 2016; Yurdakul, 2016).

Karbon verici olarak kullanılan katı, sıvı ve gaz ortamlarına bakılmaksızın, düşük karbonlu çelik malzemeye CO gazından C yayılımı üzerine odaklanılmaktadır. Böylece, yüksek sıcaklıklarda, C elementi düşük karbonlu çeliğin yüzeyine difüze olur. Karbürleme çalışmasıyla, düşük karbonlu çelik yüzeyindeki %0,1–0,2 C seviyesi, %0,7–0,8 C seviyelerine çıkabilmektedir. Ancak bu çeliklerin yüzeyinden merkeze doğru gidildikçe C seviyesinin hızlı olarak azaldığı ve içyapıda herhangi bir değişikliğin olmadığı görülür (Said, 2012).

Karbürleme işlemi sonunda parça işlemi yüzeyinde karbon emdirme işlemi tamamlanmış olmaktadır. Bu işlemi takiben yüzeyi sertleştirmek için çift sertleştirme ve doğrudan sertleştirme gibi yöntemler geliştirilmiştir. Bu işlemler, ostenit faz kısmında 900 ila 950 °C sıcaklıklarında gerçekleştirilmektedir. Bu işlemler akabinde çoğunlukla

çeliğe su verilir veya soğutulur tekrar ısıtılır ve tekrar yağda yahut ılık banyoda su verilir. Burada amaç martenzitik bir yapı elde etmektir. 700 ila 900 kg/mm arasındaki sertlik sementasyon sonucu oluşan değerdir. Çoğunlukla sementasyon işleminin gerçekleşmesiyle, aşınmaya karşı koyulan direnç, yüzeyin sertlik artışıyla birlikte artmaktadır. Bununla beraber çeliğin karbürleşmiş bölgelerinde basma gerilmesine bağlı olarak, iş parçasının yorulmaya karşı gücü de artar. Bazı işlemler için kullanılagelen sementasyon çeliklerinin farklı malzemelere oranla maliyeti daha düşüktür. Bunlara örnek olarak dişli, kılavuz yatakları, rulman yatakları, mil, piston, zincir parçaları ve dişlileri, makaralar, diskler, merdaneler ve daktilo parçalarının sertleştirilmesi verilebilir (Yıldırım, 2016; Yurdakul, 2016).

3.1.2. Nitrürleme

Nitrürleme, karbürleme gibi termokimyasal bir işlem olup, Al, Cr, Mo ve V gibi nitrür yapıcı elementler ihtiva eden çelik malzemelerin yüzeyine 500 ila 590 °C sıcaklıklar aralığında ferrit fazında, difüzyon metoduyla azot ilavesi işlemidir. Azot olarak gaz ve tuz eriyikleri tercih edilir. Nitrürleme sıcaklığında azot demir içerisinde çözünür. Nitrürleme ile sertleşmede malzeme yüzeylerinde kuvvetli nitrürler meydana gelir. Sertlik yüksek sıcaklıktayken oluşmaya başlar. Bu yüzden su verme işlemine gerek yoktur (Şakar, 1998). Nitrürleme işlemiyle elde edilen sertlik derinliği 0,1 ila 0,9 mm arasındadır. Bunun sebebi nitrülemeyi etkileyen sıcaklık, işlem süresi, ortamın azot konsantrasyonu ve çeliğin bileşim parametreleridir. Nitrürleme sonucu çeliğin kazandığı özellikler;

- ✓ Yüksek yüzey sertliği ve aşınma mukavemeti,
- ✓ Temperlemeye karşı direnç,
- ✓ Yüksek yorulma mukavemeti
- ✓ Yüksek boyutsal kararlılık,
- ✓ Korozyona karşı dayanımdır (Çelik, 1989).

Nitrürleme çeşitli şekillerde uygulanabilir. Bunlar; sıvı, gaz, toz ve plazma nitrürlemedir. Gaz nitrürleme, endotermik oluşturulan N_2 veya H_2 ihtiva eden karışım içinde yapıldığı gibi NH_3 içeren bir gaz atmosferinde de yapılmaktadır. NH_3 , gaz nitrürlemede, 500 ila 600 °C sıcaklıklarında hidrojen ve azota dönüşür. Nitrürleme meydana gelen azotun çelik yüzeyine difüze olmasıyla oluşur. Nitrürleme zamanı çoğaldıkça yüzeyin sertliği azalırken, gaz nitrürleme zamanı 50 ila 100 saat arasındadır.

Sıvı nitrürlemede, $570^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ sıcaklığındaki CN içeren tuz banyosundaki yüzeyi sertleştirilecek çelik malzemeye, CN bileşimindeki karbon yayılımı gerçekleşir. Isınmanın 1 ila 10 saat gibi kısa bir sürede gerçekleşmesi, işlemi kısaltır. Gaz nitrür işlemi ise plazma nitrür prosesi, yöntem olarak birbirinden farklıdır. Plazma nitrürleme, güçlü bir vakuma sahip (0.1-100 mbar) soğuk duvarlı kaplama ünitesinde yapılır. Malzeme katot iken kaplama reaktörünün duvarları ise anottur ve topraklıdır. Kaplama işleminde reaktörde ilk olarak H_2 sonra $\text{H}_2\text{-N}_2$ gaz karışımı kullanılır. Böylece iş parçasında 1000 V'luk DC potansiyeli uygulanır ve plazma meydana gelir. Maddenin dördüncü hali olan plazma, elektriği iyi iletir. Nitrürleme etkisi, azotun katılmasıyla ve ilk hidrojenin gönderilmesiyle başlar. Malzemenin yüzeyini ısıtan (350 ila 600°C) ve temizleyen bir akkor boşalması oluşturur (Yıldırım, 2016).

3.1.3. Karbonitrasyon (Karbonitrürleme)

Karbonitrürleme, çeliğin yüzeyine karbonun ve azotun sertleştirme amacıyla kullanılması işlemini kapsar. Bu işlemde, sementasyona ilaveten fırın atmosferine NH_3 ilave edilir. Karbonitrürleme, karbürlemeye nazaran daha düşük sıcaklıklarda (560 ila 760°C) ve işlem sürelerinde gerçekleşir. Karbonitrürleme işlemi, genellikle $0,05\text{-}0,5$ mm sertlik derinliğinin istendiği durumlarda ve sementasyona uygun olmayan çeliklerin seçilmesi durumunda uygulanır. Karbürleme işlemi sonrası çelik menevişlenerek malzemede bulunan gerilimler azaltılır ve istenen nihai sertlik değeri elde edilir. Elde edilen tabaka sert, pürüzlü, aşınmaya ve korozyona karşı dirençlidir. İşlem anında korozyona dayanımın artırılabilmesi için oksidasyon işlemi de yapılabilir (Yıldırım, 2016).

3.1.4. Borlama

Borlama, termokimyasal bir yüzey kaplama işlemi olup prensip olarak B atomunun metal yüzeye difüzyonunu içerir. Borlama işlemi, genellikle 850 ila 1000°C derecelerde, 2-8 saat arasında değişen sürelerde katı, sıvı ve gaz ortamlarda gerçekleştirilmektedir. Bor ile yapılan yüzey işlemlerinde, bor karbür (B_4C) veya borik asidin aktivatör ve katkı maddeleri ile işlemler yapılmaktadır. Borlayıcı ortam ile yüzey işlemi gerçekleştirilecek malzeme arasında bir reaksiyon oluşur. Bu reaksiyon sonucunda

çekirdekleşme gözlemlenir. Taneler yüzeyde çekirdek oluşturarak ince bir bor tabakası elde edilir (Koçaslan, 2016).

Borlama, genellikle sert ve aşınmaya dayanıklı yüzeyler elde etmek için tercih edilse de Ti, Cr, Co, Mo, Ta gibi demir dışı metal ve alaşımlarına da tercih edilmektedir. Borlama yöntemiyle elde edilen katmanın aşırı sertliği, yüksek aşınma ve aşırı sıcaklıktaki oksidasyon direnci, bu yüzey işlemeyi diğerlerine göre ön plana çıkarmıştır. Ayrıca borla kaplanan parçalar aşırı sıcaklıklara rağmen bor katmanının sert oluşunu muhafaza etmektedir. Borlamanın sanayide geniş bir uyulama alanına sahip olması, demir esaslı malzemelerin korozyon dayanımını arttırdığı içindir. Bu sayede malzemenin yüzeyi 850 °C' ye kadar oksidasyona dayanır. Borlama yapılan demir esaslı malzemelerin oksit özelliği ve korozyona maruz ortamda çalışması malzemelerin yorulmaya karşı direncini arttırdığı gözlemlenebilmektedir (Sinoplu, 2012).

3.1.5. Kromlama

Kromlama, yüksek sıcaklıkta metallerin yüzeylerini korozyona karşı korumak ya da sertliğini arttırmak maksadıyla yüzeyin Cr ile kaplanması işlemidir. Bu işlem ile daha ziyade düşük alaşım çeliğin oksidasyon direnci yükseltilmektedir. Kromlamanın, takım çeliklerinde 800 °C gibi yüksek bir sıcaklığa direnç gösterdiği bilinmektedir. Bu sayede korozyona neden olan durumlara karşı güç kazandırılabilir. Kromlamada, malzeme (900 ila 1050 °C) $CrCl_2$, $CrCl_3$, krom ve ferro-kromdan hidrojenin buharının geçmesiyle meydana gelir. Yüksek karbon çeliklerinin tabakası $(FeCr)_7C_3$ krom karbür fazından meydana gelir. Tabakanın, altlığın karbonu ile birleşmesi karbür tabakasının oluşması için yeterlidir. Yüzeyi kromlanmış demirin tabaka sertliği maksimum 300 HV olurken, yüksek karbon çeliklerin tabakasında sertlik 1600 HV'lere çıkmaktadır (Yıldırım, 2016).

3.1.6. Kimyasal buhar çökeltme yöntemi

Kimyasal buhar çökeltme (Chemical Vapour Deposition, CVD) yöntemi, kapalı bir kap içinde sıcaklığı arttırılmış olan malzeme yüzeyinin buhar halindeki taşıyıcı gaz ile kimyasal reaksiyonu sonucunda meydana gelen katı bir malzemeye kaplanması esasına dayanır (Evcin, 2016).

Bu yöntemin amacı, buhar fazından ve basıncı istenilen değerlere ayarlanmış bir ortamda kimyasal bir usulle katı kaplama malzemesi oluşturmaktır. Bu sayede kimyasal

buhar biriktirme yöntemiyle seramik kaplanmış ürünler elde edilmektedir. Teknik, piyasada geniş kitlelere dayanan ve gittikçe artış gösteren bir ivmededir. Fiziksel ve kimyasal buhar çökeltme yöntemlerinin ikisi de gelişmiş teknolojik buhar ürünleri üretme teknikleri kategorisine girer ve sanayide kullanımı günden güne artar. Nikel ve titanyum kaplamalar, kimyasal buhar biriktirme yönteminden önce kullanılmaktaydı. Titanyum kaplama Van-Arkel tekniği olup, nikel yöntemi sanayide mond tekniği olarak bilinmektedir. Bunun yanı sıra W kaplamalı malzemeler de aynı yöntemle üretilmiştir (Evcin, 2016).

Malzemelerin üstünün tamamen kaplaması ve kaplanmamış yer bırakılmaması açısından CVD yöntemi büyük avantajlar sağlamaktadır. Bunun yanında kaplanan malzemelerin yüzeyleri üzerindeki muhtelif değişkenler denetlenebilmektedir. Bu yöntemle yüksek ergime sıcaklığına sahip birçok numunenin kaplaması yapılmaktadır. Örnek verilecek olursa, 3370 °C erime sıcaklığındaki W malzemesine ait numune CVD yöntemiyle kaplanabilmektedir (Evcin, 2016).

Çeşitli sanayi kollarında kullanımına olanak sağlayan CVD yönteminde ürünlerin;

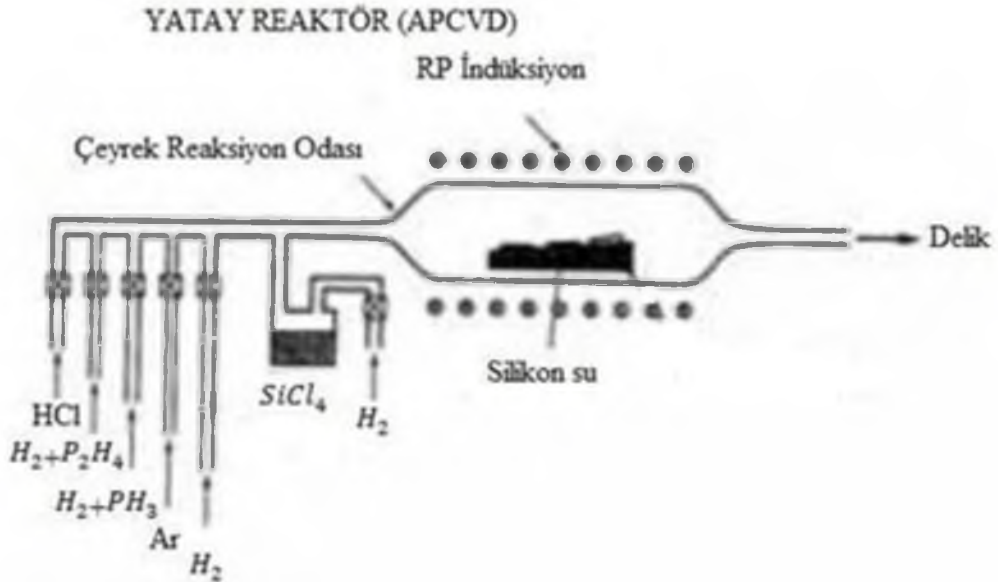
- ✓ Aşınma,
- ✓ Korozyon,
- ✓ Erozyon,
- ✓ Termal şok direnci,
- ✓ Nötron absorpsiyonu,
- ✓ Elektriksel özellikleri kontrol edilebilmektedir.

CVD yöntemiyle, genel olarak 900 ve 1100 °C sıcaklıklarda, 2–4 saat süre zarfında, ana malzeme yüzeyinde 10–30 µ kaplama yapılabildiğinden dolayı bu yöntem kısmen maliyetlidir. Ayrıca aşırı sıcaklıkta tepkime zincirlerine ve vakumlama işlemine gereksinim duyulabilir. Malzeme aşırı sıcaklıklarda bütünlüğünü korur ve aşırı enerjiden dolayı oldukça mukavemetli kaplama sağlanır ve bundan dolayı bu yöntemle elde edilen kaplamalı malzemeler askeri, uzay ve havacılık gibi pek çok alanda kullanımına neden olmaktadır (Evcin, 2016).

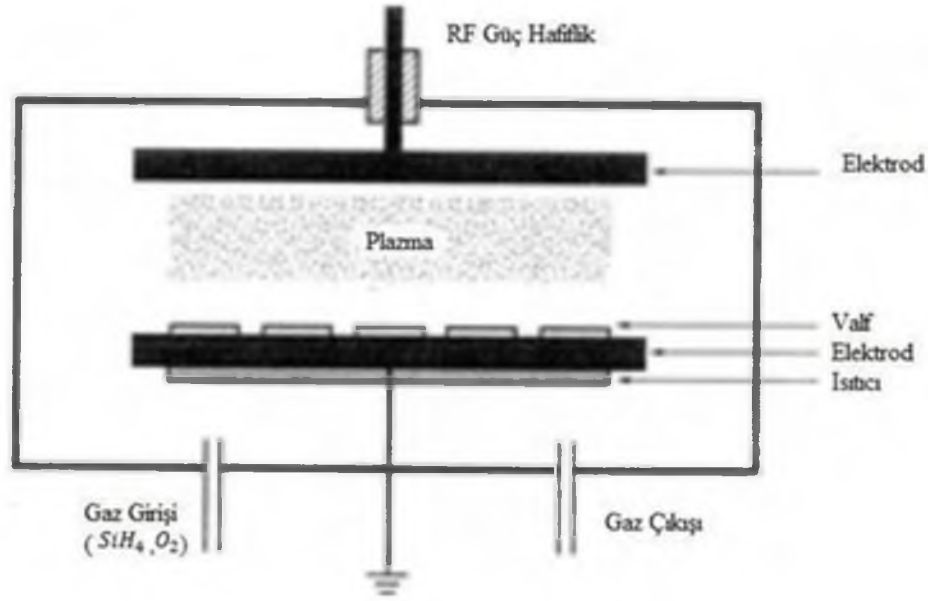
CVD yönteminde kullanılan teçhizatlar aşağıdaki gibi belirlenebilir.

- ✓ Gaz dağıtım sistemi; reaktör odasına başlangıç maddelerinin sevkini sağlar.
- ✓ Reaktör odası; çökeltmenin meydana geldiği odadır.
- ✓ Kaplanacak maddenin yükleneceği mekanizma; maddeyi yakınlaştırıp uzaklaştıracak bir mekanizmadır.
- ✓ Enerji kaynağı; başlangıç maddelerinin reaksiyonu için gereken ısı ve enerjiyi sağlar.
- ✓ Vakum sistemi; reaksiyon-çökeltme için gerekenlerden farklı diğer gazların ortamdan giderilmesi sağlar.
- ✓ Egzoz sistemi; reaksiyon odasından uçucu bileşenlerin giderilmesi sağlar.
- ✓ Egzoz işlem sistemleri; egzoz gazlarını güvenli bileşiklere dönüştürerek çevreye zarar vermesini engellemek.
- ✓ Proses kontrol ekipmanları; basınç, sıcaklık ve zaman gibi parametrelerin kontrol altında tutulmasını ve izlenmesini sağlar (Evcin, 2016).

Atmosferik basınçlı, düşük basınçlı, plazma katkılı, metal-organik, lazer ve fotokimyasal CVD prosesleri mevcuttur. Bunlardan atmosferik basınçlı ve plazma katkılı CVD yöntemleri sırasıyla Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te verilmiştir.



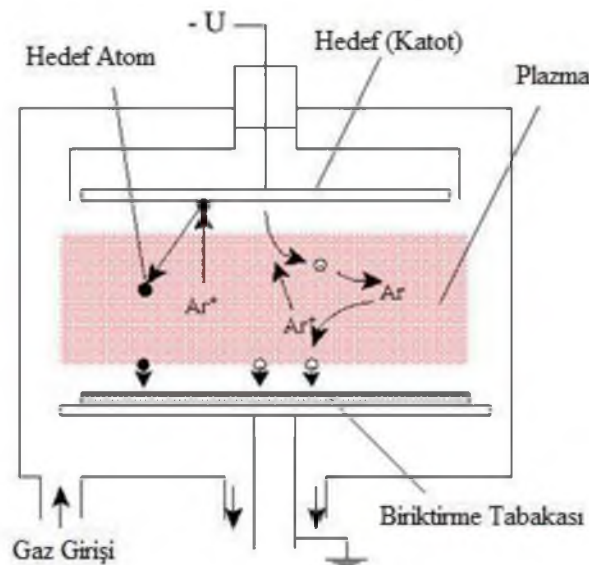
Şekil 3.3. Atmosferik basınçlı CVD yöntemi (Yıldırım, 2016)



Şekil 3.4. Plazmayla CVD yöntemi (Yıldırım, 2016)

3.1.7. Fiziksel buhar çökeltme yöntemi

Endüstride kullanılagelen fiziksel buhar çökeltme (Physical Vapor Deposition, PVD) yönteminde; kaplanan numune yüzeyinde ince film tabakası olarak biriktirilen kaplayıcı malzeme vakumlu ortamda rezistans, indüksiyon akımı, elektron bombardımanı, katodik ark yöntemi gibi işlemlerle buharlaştırılır. Bir başka deyişle, yüksek enerji ile plazma haline getirilen hammadde, numunenin yüzeyine kaplanır (Evcin, 2016). Şekil 3.5'te PVD yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.5. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniği (Yıldırım, 2016)

1857 yılında, bir metal teli vakum altında buharlaştıran Faraday, kaplamalı bir malzeme elde etmiştir ve bu kaplama PVD yöntemin ilk uygulaması olarak kabul edilmiştir. 1888’de ise Kundt PVD yöntemi ile üretilmiş ince filmlerin optik özelliklerini incelemişlerdir. Vakum teknolojisinin büyümesiyle 19. yüzyılda PVD yöntemi üzerine yapılan çalışmalar daha ayrıntılı ve kapsamlı bir hale gelmiştir. Bunun başında makine sektöründe en büyük ve önemli bir problem olan aşınma gelmektedir (Evcin, 2016).

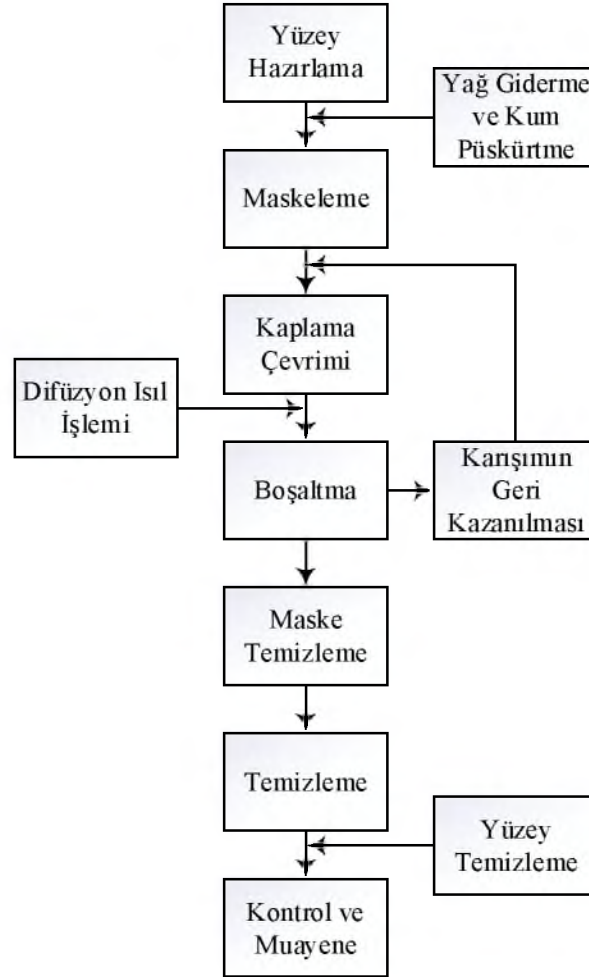
PVD işleminde yüksek basınç ihtiyacı vardır. Bu yüzden malzeme basınç etkisine karşı dayanıklı olmalıdır. Ancak PVD yöntemi ile elde edilen kaplamalar CVD gibi yöntemlerle elde edilen kaplamalara göre dayanıksızdır. Çünkü PVD yönteminde kaplama malzemesi çarptığı yere yapışırken CVD yönteminde, çökeltme işlemi tek düze bir yapıya sahip olup kaplama malzemesi ana malzemeye difüze olur (Evcin, 2016).

3.1.8. Termoreaktif difüzyon yöntemi

Metal ve alaşımları ile çalışılan makine sanayisinde, korozyon, aşınma ve kimyasal tepkimeler sonucu malzemeler olumsuz etkilenerek işlem yapılamayacak hale gelmektedirler. Bu durum, ülke ekonomileri başta olmak üzere fabrika ekonomilerine de zarar vermektedir. Ülke ve fabrikaların ekonomilerine zarar vermesi sebebiyle bilimsel ve endüstriyel camia bu alandaki çalışmalara önem vermiştir. Bunun neticesi olarak 1970’lerde Japonyada difüzyonel yöntemlerden biri olan ve Toyota difüzyon tekniği olarak da isimlendirilen termoreaktif difüzyon (TRD) tekniği geliştirilmiştir (Çeğil, 2002).

TRD yöntemi termokimyasal bir işlem olup katı, sıvı veya gaz ortamlarında karbür yapıcı elementlerin çeliğe yayılmasını içerir. Üç ana bileşenden oluşan TRD yönteminde, kaplanmış numunelerin iç kısmına gömülen tozlar önem arz etmektedir (Sarıkaya, 2007). Kaplama element kaynağı, karışım tozlarının birbirleriyle sinterlenmemesi amacıyla bir aktivatör aracılığıyla yapılır. Al_2O_3 veya silisyum oksit (SiO_2) genellikle inert malzeme iken, NH_4Cl ise aktivatör olarak kullanılır (Kon, 2006). Genel olarak difüzyon ile kaplanan numuneler, kutu içinde 900 ila 1000 °C’de fırında 2–5 saat süre boyunca işleme tabi tutulurlar. Kaplamanın cinsine ve kalınlığına göre süre ve sıcaklıklar değişebilir. Numune kutu tozlarında soğutulabildiği gibi fırının dış kısmında da soğutulabilmektedir. Ayrıca altlığın mukavemetinin yükseltilmesi maksadıyla ısı işleme maruz bırakılan ve TRD yöntemiyle fırında soğutularak oluşturulan kaplamalar,

800 ila 850 °C de tuz banyosunda da tutulabilirler. Bu işlemde, yeterli karbon içeriğine sahip çelik parçaların yüzeyinde 5-12 µm'lik bir refrakter karbür tabakası oluşturulabilir. Daha iyi boyutsal kararlılık ve minimum bozulma sağlanabilir. TRD kutu sementasyon yönteminin akış şeması Şekil 3.6'de verilmiştir (Tarafer, 1994; Deniz, 2004; Ertürk, 2010).



Şekil 3.6. TRD kutu sementasyon yönteminin akış şeması (Deniz 2004)

Ferro alaşımların elde edilmesi kolay ve ucuz olduğundan TRD işleminde genel verici olarak kullanılırlar. Bu alaşımların mümkün mertebe yüksek tenöre sahip olanları seçilir. Bunun yanında saflığı yüksek metal tozları pahalı olmasına karşın kullanılabilir (Deniz, 2004; Ertürk, 2010).

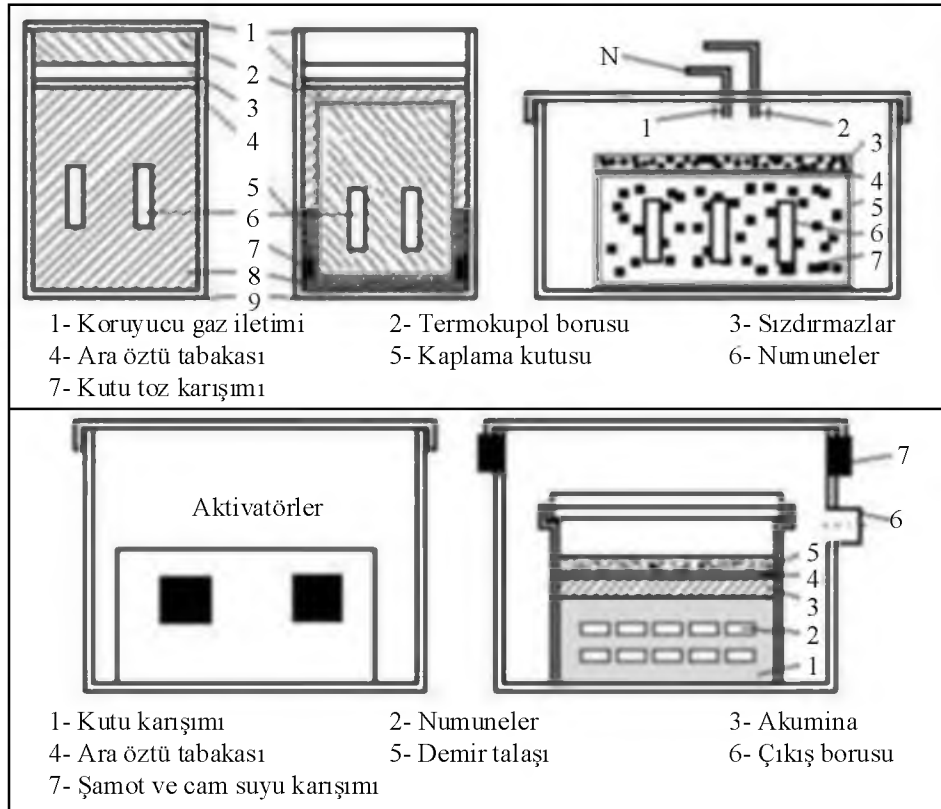
Aktivatör karışım, bileşenlerinin vazgeçilmez unsurlarından biridir. Aktivatörün görevi izotermal ısıtma sırasında ferro alaşım elementleriyle tepkime oluşturmak ve metalik halojenürleri meydana getirmektir. Bu sayede aktif gaz ortamına sahip olunur. Aktivatör olarak çok çeşitli halojenür tuzlarıyla çalışılır. Çalışılan alt tabaka malzemesi

cinsinin ve faal durumdaki gaz ortamının meydana getirecek ferro alaşım elementi, kısmi basınç aktivatör çeşidinde büyük role sahiptir (Deniz, 2004; Ertürk, 2010).

Çalışmalarda seçilen altlıkların karbon içeriğı baz alınarak; düşük karbonun metal tabaka, yüksek karbonun ise seçilen ferro alaşım çeşidi baz alınarak, seramikten meydana gelen katmanlar oluşturulur. Karbon ve azot yönünden zengin olmasına rağmen, ortamdan gelen alaşım elementleri baz alınarak meydana gelen Fe_2Al_5 gibi bileşikler de mevcuttur (Deniz, 2004; Ertürk, 2010).

TRD yönteminde, parçanın karışıma gömölme şekli ve pozisyonunun yanında, toz bileşikleri, alt katmanın kimyasal bileşikleri, difüzyonun sıcaklığı, difüzyon süresi vb. çalışma değerleri de önem arz etmektedir. Yöntem, genel olarak kutu içerisinde yapıldığından dolayı kutu sızdırmazlığının çok iyi olması, oksijen girişinin olmamasını sağlar ve bu istenilen bir durumdur. Oksijenin kutu karışımının iç kısmında bulunması ya da dış kısımdan iç tarafa girmesi, demir ihtiva eden parçalarda olumsuz etki yaparak oksitlenmelere mahal verir. Bunun sonucunda parçanın yer yer oksitlenen kısımlarında kaplama tabakası oluşmaz ya da arzu edilen adhezyonu göstermeksizin oluşabilir. Sızdırmazlığının oluşması için muhtelif kutu tasarımları mevcuttur. Sızdırmazlık, bazı kutu tasarımlarında akışkanlık sağlayan ventil aracılığıyla yapılırken, diğer çalışmalarda $NaSiO_4$ ile harmanlanan şamotun seçilmesiyle yapılır. Karışımlar ve bileşenlerin üst kısmı cam malzeme ile kapatılır. Alt kısımda varolan demir talaşı ya da odun kömürü çalışmanın ilk kısmında oksijeni bağlar. Farklı bir çalışma da çalışma kutusunun koruyuculuğı sağlayan gaz atmosferiyle kapsamaktır. Çalışma, birbirine geçirilen birden fazla kutu aracılığıyla basitçe yapılabilir (Sinoplu, 2012).

Yaygın bir şekilde Harterei Enstitüsü'nde uygulanan kutular Şekil 3.7'deki gibidir. Asıl sementasyon kutusu farklı bir kutuya geçirilmiştir.



Şekil 3.7. TRD yöntemlerinde kutu tasarımları (Yılmaz, 2008)

Çalışma yapılan kutu içerisinde sabit bir basınç sağlayan tahliye borusu tek yönlü ventil gibidir. Aktivatörün işlemin başlangıcında buharlaşmasıyla kutu içindeki oksijen bir akışkan ventil vasıtasıyla dışarı verilir. Kutu sızdırmazlığını mümkün kılmak için şamot tozu ya da cam suyu kullanır. Çalışmanın ilk etabında oksijen aktivatör vesilesiyle tahliye edilir. Bu esnada kutu içinde küçükte olsa basınçlar meydana gelir. Sızdırmaya karşı dirençli malzeme, oksijen kutunun dış kısmına çıkarıldıktan itibaren katılaşmaya başlar. Bu sayede oksijen iç kısma giremez (Sinoplu, 2012).

TRD yönteminin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- ✓ Olağanüstü yüksek yüzey sertliği (1200-4000 DPH) ve yorulma ömrü,
- ✓ Mükemmel aşınma ve termal şok direnci,
- ✓ Geliştirilmiş korozyon ve oksidasyon direnci,
- ✓ Yağ ile söndürüldükten sonra bile çatlak, parçalanma, kabuk bulunmaması (Tarafer, 1994),
- ✓ İşlemin basit bir tuz banyosunda gerçekleştirilebilmesi (Chattopadhyay, 2014).

TRD yönteminin olumsuz tarafına gelinecek olursa, çelik yüzeyin alt tabakadaki karbür tabakasında çalışma esnasında karbürizasyon oluşma olasılığıdır. Bu durum

neticesinde sertlik ve üst kısmın yükleme kabiliyeti düşmektedir (Matijević ve Stupnišek, 2009).

3.2. Hardox 400 Çeliği

Mühendislik uygulamalarında kullanılan malzeme yelpazesi oldukça fazladır ve bunlar kendi aralarında sınıflandırmaktadır. Ancak metal sektöründe, malzemelere yeni alaşımlar eklenerek mühendislik uygulamalarında kullanılan ürün yelpazesi daha da genişlemektedir. Bunun bir örneği, karbon (C), silisyum (Si), mangan (Mn), fosfor (P), kükürt (S), krom (Cr), nikel (Ni), molibden (Mo) ve bor (B) elementlerini içeren Hardox çeliğidir. 1970 yılında piyasaya sürülen Hardox çelikleri, demir cevherinden imal edilmiş olup sertlikleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Hardox çeliklerinin sertlik değerleri oldukça yüksektir. Hardox çeliğinin sertliği, aşınma direncinin iyi bir ölçüsüdür. (Yılmaz ve ark., 2005; Toprak, 2019).

Hardox çelikleri, brinell sertlik derecelerine göre Hardox 400, 450, 500, 600 ve HiTuf olarak sınıflandırılmaktadır. Ancak bu çeliklerin sınıflandırma numarası arttıkça, sertliği, tokluğu, aşınma direnci, eğme ve çekme dayanımları daha da artar. Fiziksel, tribolojik ve mekanik özelliklerdeki bu artış, modern roletli su verme işleminde uygulanan yüksek verimli suda su verme prosesi ile sağlanmaktadır (Bilen, 2016)

Hardox 400 çeliği olağanüstü kalitede kaynak edilebildiğinden, geleneksel ergitme kaynak ile Hardox ve farklı tüm kaynağa uyumlu konstrüksiyon levhalarıyla kaynaklanabilirler. Ayrıca Hardox 400 çeliğinin bükülme kabiliyeti, çarpma mukavemeti ve plastik esnekliği oldukça yüksektir. Yaklaşık 400 HBW nominal sertliğe sahip olan Hardox 400 çeliğinin en önemli özelliği ise plakalarının tam sertleştirilmiş olmasıdır. Bu yüzden Hardox 400 çelikleri kazıcı, yükleyici ve pres parçalarında kullanılmaktadır. Hardox 400 çeliğinin kimyasal bileşimi Çizelge 3.2’de, bazı mekanik özellikleri Çizelge 3.3’te ve Hardox 400 çeliğinden imal edilmiş bir kepçe kovanı ise Şekil 3.8’de verilmiştir (Buglack ve Smajdor, 2003; Bilen, 2016; İnternet adresi 2, 2020).

Çizelge 3.2. Hardox 400 çeliğinin ağırlıkça % kimyasal bileşimi (Buglack ve Smajdor, 2003)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	Fe
0,13	0,49	1,42	0,009	0,001	0,04	0,05	0,012	0,002	Kalan

Çizelge 3.3. Hardox 400 çeliğinin mekanik özellikleri (İnternet adresi 2, 2020)

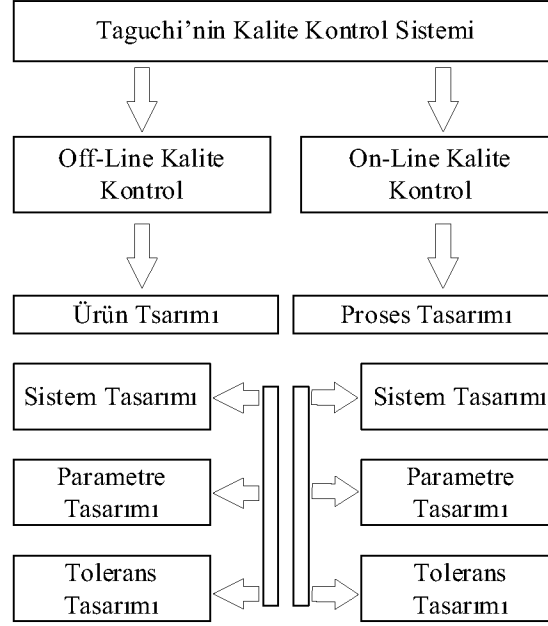
Kalınlık (mm)	Sertlik (HBW) (min.-mak.)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
3-130	370-430	1000	1250	10

**Şekil 3.8.** Hardox 400 çeliğinden imal edilmiş kepçe kovası (İnternet adresi 2, 2020)

3.3. Taguchi Yöntemi

Taguchi yöntemi, deneysel bir tasarım metodudur. Ürün ve proseste, değişkenler oluşturulur ve kontrolü sağlanamayan etkilere karşı, düzeylerinin en uygun kombinasyonunu seçer. Böylece, ürün ve prosesteki değişkenleri en aza indirmeyi ve aynı zamanda kalitenin tasarım ve proseste meydana gelmesini amaçlar. Bu yöntem; kalite geliştirmede, çok daha az deneme ile daha iyi sonuç alma imkânı verdiği gibi ürünlerin kalitesinin iyileşmesinde de etkili olmaktadır. Taguchi yönteminde, faktör seviyeleri tespit edilirken; gözlem, sıralama, sütun farkları, varyans analizi ve faktör etkilerinin grafiksel gösterimi yöntemlerinden biri kullanılmaktadır. (Gur, 2013; Kaya 2017).

Taguchi yönteminde, kalite amacıyla uygulanan işler çevrim içi ve çevrim dışı olarak ikiye ayrılır. Deney düzeneği, yapının kalite bölümünde, çevrim dışı kalite kontrol içerisinde, ürünün ve tasarımın bölümlerinde uygulanmakta olup Şekil 3.9'da sunulmuştur.



Şekil 3.9. Taguchi'nin kalite sistemi (Özay, 2009)

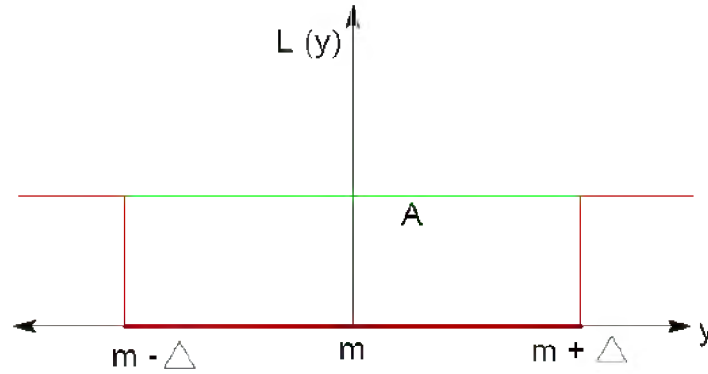
On-Line kontrol, üretimi sağlanan ürünlerin muayene usulleri ile kaliteyi muhafaza etme çalışmasıdır. Off-Line kontrol ise ürünlerin ve üretimin prosesini geliştirme amacıyla, sektör araştırma çalışmasını ihata eder. Uygulanan bu işlemler ürünlere doğrudan müdahalede bulunmak yerine, üretim öncesi amaçlanmış dizayn işlemleridir. Taguchi yönteminin sistem, parametre ve tolerans tasarımlarını içeren kalite usulleri Şekil 3.10'da sunulmuştur (Özay, 2009).

Taguchi, uzun yıllar yaptığı deneyler sonucunda, çok az deneme ile olumlu neticeler veren ortogonal dizileri geliştirmiştir. Ortogonal dizi, hangi denemelerde faktörlerin hangi düzeylerinin uygulanacağını saptar. İlk kez matematikçi Jacques Hadamard ortogonal dizileri bulmuştur. Ortogonal dizilerin önemi, faktör seviyesini, tek tek değiştirmektense, aynı zamanda değişiklik yapmayı önermesidir. Normal 2^k değişkenlerinde bir deney tasarımı uygulanacak ise tam faktöriyel oluşumunun gereği olarak 2^k deneyinin gerçekleştirilmesi amaçlanır. İşlem parametrelerinden biriyle oynanıp diğer değerleri sabit tutularak deneyler uygulanır. Uygulanan çalışmaların neticesinde Taguchi benzer deneme planlarını geliştirmiştir. Ayrıca bu planlardan alınacak sonuçlarla, 2^k denemelerinin sonuçlarının benzer olacağını söylemiştir. Örnek olarak yedi adet faktör tespit edilmiş olsun. Bu düzenek, $2^7 = 128$ tane uygulamanın gerçekleştirilmesi demektir. İşte Taguchi yöntemi burada devreye girmekte ve bu çalışma

Çizelge 3.4'te yapılan çalışma göz önüne alındığında; A, B, C, D, E, F ve G faktörleri (deney parametrelerini) temsil eder. 1 ve 2 ise onların seviyelerini (deney parametre değerlerini) gösterir. Diğer bir deyişle deney parametrelerindeki değerler, düşük seviyeler için 1, yüksek seviyeler için 2 olarak kodlanır. 2^k tasarımında, faktör ve seviyelerinin kombinasyonuna göre deneyler yapılır. İl deneyde, tüm faktörlerin seviyeleri 1 olarak seçilir. İkinci deneyde, ilk 6 faktörün (A'dan F'e kadar) seviyeleri sabit tutulur, ancak 7. faktörün (G) seviyesinde farklılık yapılır. Tüm faktörlerin sırasıyla denenmesi sonucunda 128 adet deney yapılması sağlanır. Ancak Taguchi yönteminde, ilk deneyden ikincisine geçildiğinde 7 faktörün 4 tanesi değiştirilir. Ardından farklı denemelerde de 4 tanesi 2. seviye, 3 tanesi 1. seviye olup, aşamaların her birinde değişiklik yapılır. Toplamda 8 adet deney yapılması sağlanır. Sonuç olarak Taguchi yöntemi maliyeti azaltırken, aynı anda zamandan da kazanç sağlar (Özay, 2009).

3.3.1. Taguchi'nin kaliteye yaklaşımı

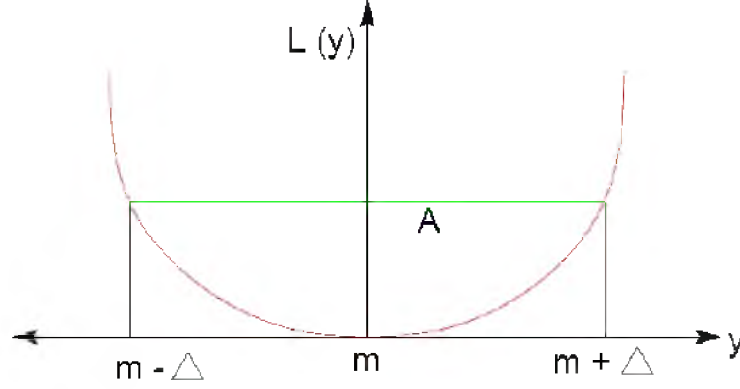
Geleneksel tanımda iyi kalite olarak kabul edilen "Goalpost" mantığı, bir ürünün, tanımlanan aralığında olup olmadığına bağlı olarak iyi veya iyi olmadığını anlatır. Bu yaklaşımda, tanımlanan sınırlar hedef değerden daha önemlidir. Ancak ürün, sadece spesifikasyon dahilinde olduğu için olabildiğince iyi veya olması gerektiği kadar iyi olduğu Şekil 3.11'de gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Kalite tanımına geleneksel yaklaşım (Mishra, 2014)

Taguchi yukarıdaki geleneksel kalite tanımını kabul etmemiştir. "Kaliteyi" hedef performanstan sapma olarak tanımlamış ve ürün kalitesine alışılmadık bir tanım vermiştir. Ona göre, "üretilen bir ürünün kalitesi, içsel işlevlerin neden olduğu herhangi bir kayıp dışında, o ürünün sevk edildiği andan itibaren topluma verdiği toplam kayıptır".

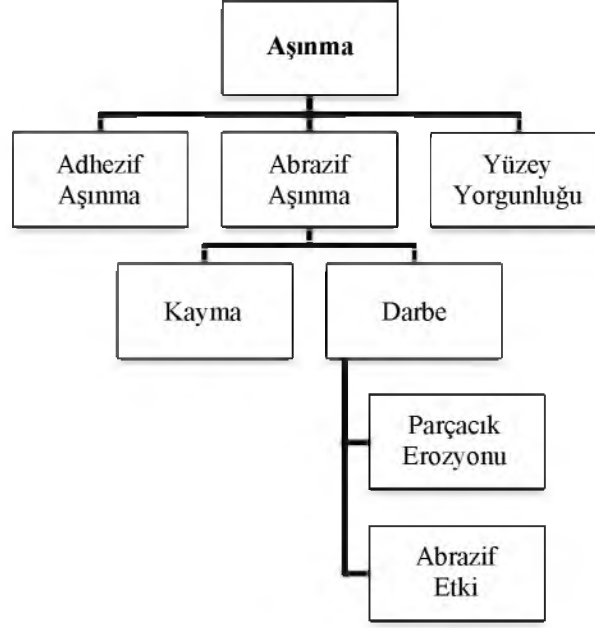
Kayıp ile Taguchi, işlevin değişkenliğinden kaynaklanan kayıp ve zararlı yan etkilerin neden olduğu kayba dikkat çekmiştir. Bir ürün hedef değerinden hareket ettiğinde, ürün şartname sınırları içinde olsa da olmasa da kayba neden olacaktır. Taguchi'nin bu yaklaşımı Şekil 3.12'de gösterilmektedir (Mishra, 2014).



Şekil 3.12. Taguchi'nin kalite tanımına yaklaşımı (Mishra, 2014)

3.4. Aşınma

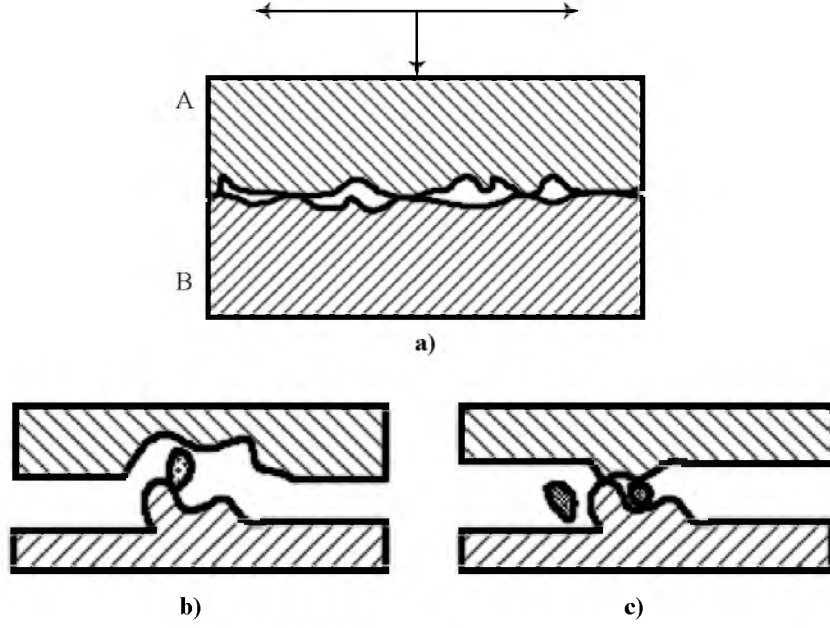
Aşınma, kabaca bir yüzeyden malzemenin uzaklaştırılması olarak tanımlanabilir. Aşınma sürecini açıklamak için önce aşınan parçacığın yüzeyle nasıl etkileşime girdiğini anlamamız gerekir. En ince ve en pürüzsüz yüzey bile mikroskobik ölçekte tepeler ve oluklarla pürüzlü bir yüzeye sahiptir. Aşındırıcı bir parçacık, yüzeyle temas ettiğinde, ilk olarak en yüksek tepelerle etkileşime girer. Bu küçük temas alanı, yüksek sıcaklıklar, yüksek deformasyon oranları ve yüksek kesme gerilmeleri gibi çok özel durumlar oluşturur. Aşınma ilerledikçe, bu tepeler aşınarak yeni tepeler oluşturur ve aşınan parçacık ile temas devam eder. Böylece temas eden malzeme yüzeylerinde aşınma meydana gelir. Aşınma eyleminden etkilenen bu aktif katmanda, dislokasyon yoğunluğu, tane boyutu ve sertlikte büyük farklılıklar gözlemlenebilir. Uygulamaya bağlı olarak, aktif aşınma modu; adhezif aşınma, abrazif aşınma ve bazı durumlarda yüzey yorgunluğu arasında farklılık gösterecektir. Ancak genellikle bu üçünün bir kombinasyonu aktiftir ve biri hakimdir. Malzemelerde oluşan aşınma tiplerinden bazıları Şekil 3.13'te verilmiştir (Jungedal, 2012).



Şekil 3.13. Aşınma türleri (Jungedal, 2012)

3.4.1. Adhezif aşınma

Adhezif aşınma, yapışma aşınması olarak da bilinir. Birbirinin üzerinde hareket eden elemanların temas yüzeylerinde meydana gelen kaynak bağlarının kırılması ile oluşur (Şekil 3.14). Teorikte, birbiri ile temasta olan benzer yapıda iki metalik yüzeyin arasında adhezyon kuvveti denilen bir çekim kuvveti mevcuttur. Bu kuvvetin oluşması için malzemelerin ihtiva ettikleri moleküllerini birbirlerine yaklaştırmak lazım gelir. Bu sayede temas halinde bulunan yüzeyler pürüzler sebebiyle etkileşmiş olurlar. Dış kuvvetlerin sebebiyle pürüz tepelerinde oluşan basınç ve gerilmeler, plastik deformasyona uğrarlar. Bununla beraber malzemelerin deforme olma olasılığı çok yüksekse, mikro adhezyon alanları temasın olduğu yüzeye tamamen yayılır. Dolayısıyla yüzeylerde absorbe edilen sıvı ve gaz molekülleri ile oksitlenen tabakaları parçalar. Bahsedilen bu parçalanmalar sonucunda parçaların molekülleri doğrudan temasa geçer. Bu da bölgesel kaynak bağının (soğuk kaynama) meydana gelmesine vesile olur. Ek olarak izafi hareketin de etkisiyle yüzeylerdeki sıcaklıkların artıp ergime noktasına kadar gelmesi, ortaya çıkan kaynak bağının veya malzemelerin yüzeylerinde parça kopmalarına sebebiyet verir. Bunun sonucunda da malzeme kayıpları (aşınma) oluşur (Özay, 2004).



Şekil 3.14. Kaynak bağları ve kopma şekli; a) Yüzeyde kaynak bağı, b) A'dan B'ye malzeme taşınması, c) Kopan parçaların serbestlik halleri (Özay, 2004)

Robinwicz ve Tabor aşınmalar ve yağlayıcılarla ilgili bazı çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalarında malzeme yüzeylerinde yağlayıcı olmaz ise yüzeye dik olarak gelen yükün artmasına göre, aşınmanın da doğru orantılı olarak arttığını görmüşlerdir. Yüzeye yağlayıcıların uygulanmasından sonra ise malzemelerdeki transferlerin azalması kadar, sürtünme katsayılarının da düştüğünü müşahade etmişlerdir. Skorski metallerin çoğunda yapışma sabitinin sürtünme katsayısıyla alakasını bulmuştur. Ayrıca malzeme transferlerindeki düşmelerin şüphesiz, yapışmaların boyut ve sayısındaki azalmaların bir sonucu olduklarını tespit etmiştir. Çalışmaların neticesinde adhezif aşınmanın bir kısım genel özellikleri çıkarılmıştır. Bunlar aşağıdaki gibidir.

- ✓ Aşınma miktarı, normal yük ve kayma mesafesiyle orantılıdır.
- ✓ Aşınma, aşınan yüzeylerin sertlikleri ile orantılıdır (Özay, 2004).

3.4.2. Abrazif aşınma

Abrazif aşınma, sert bir kenar veya partikül ile daha yumuşak bir yüzey arasındaki etkileşimi içerir ve bu da bir kesme veya sürme etkisine neden olur. Bu tip aşınma, adhezif aşınmasına kıyasla yüksek malzeme kaybına neden olur ve madencilik ve beton endüstrisindeki en baskın aşınma mekanizmasıdır. Yüzeyin abrazif aşınmaya nasıl tepki vereceği, etkilenen yüzeyin mekanik özellikleri ve aşındırıcı parçacıklar gibi bir dizi faktör tarafından kontrol edilir (Jungedal, 2012).

Abrazif aşınma ve deformasyon mekanizması beş gruba ayrılır. Bunlar; mikro sürme, mikro yorgunluk, kama oluşumu, mikro çatlama ve kesmedir.

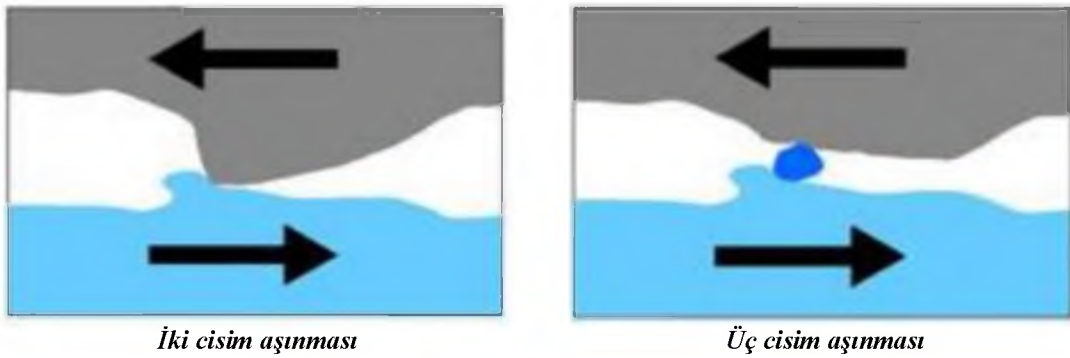
Metaller için en önemli mekanizmalar, mikro sürme, kama oluşumu ve kesmedir. Ancak mikro yorgunluk ve mikro çatlama da görülebilir. Tüm bu mekanizmaların genellikle tek bir hakimiyetle birlikte çalıştığını belirtmek önemlidir. Sürme, malzemenin yana itildiği ve aşındırıcı parçacık yüzey üzerinde hareket ederken çıkıntılar oluşturduğu saf plastik deformasyonun sonucudur. Aktif aşınma mekanizması, aşındırıcı partikülün hücum açısına bağlıdır. Kritik hücum açısı, sürmenin kesmeye dönüştüğü açı olarak tanımlanır. Bir malzemenin kritik açısı büyük ölçüde sertliğe ve mikroyapıya bağlıdır. Kesme aşınması, aşınmanın en şiddetli şeklidir. Tekrarlanan abrazif aşınma da dökülmeye neden olabilir; yüksek kısmi gerilimler, bir yüzey altı çatlağı oluşturur ve malzeme pullar halinde kırılır (Jungedal, 2012).

Abrazif aşınma, sert kenar/parçacığın yumuşak yüzeyle etkileşime girme şekline bağlı olarak iki gruba ayrılır. Bunlar; kayma aşınması ve darbe aşınmasıdır (Jungedal, 2012).

3.4.2.1. Kayma aşınması

Kayma aşınması hem adhezif hem de abrazif aşınmada meydana gelir ve her iki durumda da aşınmış yüzeyde değişikliğe veya malzeme kaybına neden olan başka bir malzeme üzerinde kayan bir malzemeyi içerir (Jungedal, 2012).

Kayma aşınması ayrıca aşındırıcının hareket etme ve etkileşim yeteneğine bağlı olarak Şekil 3.15’ te gösterildiği gibi iki aşınma çeşidine bölünebilir.



Şekil 3.15. İki cisim ve üç cisim aşınmanın gösterimi (Jungedal, 2012)

İki gövdeli aşınma için, aşındırıcı parçacıklar bir yüzeye sabitlenir ve yalnızca karşı yüzey üzerinde kayabilir. Üç gövdeli aşınmada, aşındırıcı partikül hareket etmekte serbesttir ve bir yuvarlanma ve kayma aşınması kombinasyonu sağlar. Temel bir kural, iki gövdeli aşınmanın, üç gövdeli aşınmadan 10 kat daha yüksek bir aşınma oranına neden olmasıdır (Jungedal, 2012).

İki cismin sürtünmesi sonucu kayma aşınması sırasında oluşan aşınma döküntüsü hacmi, Archard'ın aşınma yasası ve eşitlik 3.1 kullanılarak hesaplanabilir.

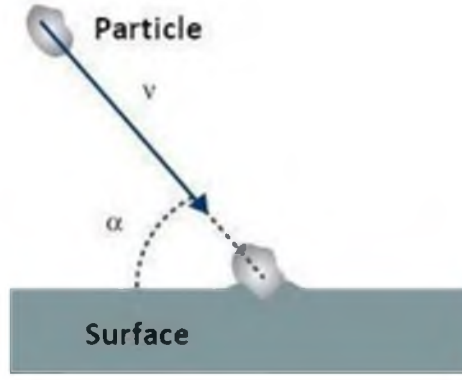
$$V = K \frac{F_N}{H} s \quad (3.1)$$

Burada; V : çıkarılan malzemenin hacmi, K : boyutsuz aşınma katsayısı, F_N : Normal yük, H : daha yumuşak temas yüzeyinin sertliği ve s : kayma mesafesidir. Archard, yerel dairesel pürüzler temas halinde olduğunda, kısmi temasın meydana geldiğini varsayarak bu modeli geliştirmiştir. Ayrıca normal yükün gerçek temas alanıyla orantılı olduğunu pürüz deformasyonunun plastik olarak gerçekleştiğini varsaymıştır.

Model, kayar sistemde basit hesaplamalar için çok kullanışlıdır, ancak birçok sınırlaması vardır ve haddelme sistemi veya sertlik dışındaki malzeme özelliklerindeki değişiklikler için geçerli değildir (Jungedal, 2012).

3.4.2.2. Darbe aşınması

Bir yüzeye belirli bir hız ve açıyla çarpan bir parçacığın neden olduğu aşınmaya darbe aşınması denir. Bu aşınma, partikül erozyonu ve aşındırıcı etki olarak ikiye ayrılır. Partikül erozyonu, 1 mm'den küçük çok küçük ve sert partiküllerin bir gaz veya bir sıvı ile birlikte yüksek hızda hareket eden tekrarlayan etkisinden kaynaklanır. Aşındırıcı etki, daha büyük boyuta ve daha düşük hızlara sahip parçacıkların çarpması olarak tanımlanır. Aşınma hızı, parçacığın hızı, parçacığın boyutu, çarpma açısı, aşındırıcının sertliği, kaya ve çelik malzemenin tokluğu ile kontrol edilir. Çarpma açısı α , Şekil 3.16'da görüldüğü üzere ek olarak aşınma oranını kontrol eder. Eroziyon aşınma altında sünek metaller için 30-40 derece civarında daha yüksek bir aşınma oranı sağlar. Aşınma oranı daha sonra daha yüksek açılarda azalır. Seramik gibi kırılgan malzemeler, bununla birlikte farklı davranarak ve çarpma açısının artmasıyla aşınma oranında çarpıcı bir artış gösterir (Jungedal, 2012).



Şekil 3.16. Parçacık erozyonu (Jungedal, 2012)

3.4.3. Koroziif aşınma

Koroziif ve abraziif aşınmanın birleşimi, bir sinerji etkisi yaratabilir. Buda, toplam aşınmanın her iki mekanizmanın etkisinden daha yüksek etki oluşturacağı anlamına gelmektedir.

Metal ve alaşımları, çevresel ve sürtünme koşullarına bağlı olarak kolaylıkla kimyasal tepkimeye girme eğilimi gösterirler. Bu gibi durumlarda, metal ve alaşımlarının yüzey yapılarında hızlı bir şekilde oksit filmi oluşur. Ancak bu film, 10-15 Å kalınlığa geldiğinde, oksit filminin büyüme hızı yavaşlayacaktır. Bilinmelidir ki, korozyon hızı kesinlikle malzeme türüne, pH'a ve kısmi basınca, oksijene ve sıcaklığa bağlıdır. Oksijenin sudaki çözünürlüğü de sıcaklığa bağlıdır. Atmosferik basınçta ve 20 santigrat derece sıcaklıkta çözünürlük 9,1 mg/l'dir. Karbon çeliği için, mevcut olan daha yüksek oksijen miktarı genellikle artan bir korozyon oranı anlamına gelir. Daha düşük pH'ta, 6-7'nin altında, çelik Fe^{2+} iyonları oluşturacak ve 5,5'in altındaki pH seviyelerinde korozyon hızı ve aşınma hızı artacaktır. 8-9 ve daha yüksek pH seviyelerinde, çelik pasif bir $Fe(OH)_3$ veya Fe_2O_3 filmi oluşturabildiğinden, korozyon ve aşınma hızı azalacaktır (Jungedal, 2012).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasının amacı, Hardox 400 çeliğinin katı ortam Termoreaktif Difüzyon (TRD) yöntemi kullanılarak Ferro Krom ve Ferro Bor ile Ferro Niyobyum ve Ferro Bor tozları ile kaplanmasını içermektedir. Bu doğrultuda, numuneler 950, 1000 ve 1050 °C sıcaklıklarda, 1, 2 ve 3 saatlik süre ile kaplama işlemine tabi tutulmuştur. Katı ortamda TRD işlemi sonrasında numunelerin optik mikroskop görüntüleri incelenmiştir. Optik mikroskop sonuçları iyi elde edilen kaplama numunelerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi (EDX) ve X-ışını kırınımı (XRD) ile yapıları analiz edilmiş ve mikrosertlik ölçüm cihazı ile sertlikleri ölçülmüştür. Kaplama parametrelerinin kaplama kalınlığına ve sertliğe etkileri araştırılmıştır. Ayrıca sertliğin ve kaplama parametrelerinin aşınmaya etkisini tespit etmek için numuneler, Taguchi deney tasarımına göre adhezif aşınma testlerine tabi tutulmuştur.

Deneylerde kullanılan malzeme ve yöntemler, alt başlıklar altında aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.

4.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Kaplama altlık malzemesi olarak yüksek sertlik, iyi aşınma direnci ve soğuk şekillendirilebilme özelliklerinden dolayı günümüzün önemli malzemeleri arasında yer alan Hardox 400 çeliği, ticari olarak temin edilmiştir. Akma dayanımı 1000 MPa ve çekme dayanımı 1250 MPa olan Hardox 400 çeliğinin tedarik edilen firma tarafından bildirilen kimyasal bileşimi Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Hardox 400 çeliğinin kimyasal bileşimi (ağırlıkça %)

<i>Cr</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>Ni</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>W</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Mo</i>	<i>Fe</i>
1,40	0,32	0,004	1,50	0,70	1,60	-	0,025	0,010	0,60	Kalan

Kaplama işlemi için 45-90 mikron boyutlarında alümina (Al_2O_3), amonyum klorür (NH_4Cl), Ferro Bor, Ferro Krom ve Ferro Niyobyum tozları kullanılmıştır. Bu tozlar, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3’te verilen Ferro Krom ve Ferro Bor ile Ferro Niyobyum ve Ferro Bor tozlarını içeren iki farklı kombinasyonda gruplandırılmıştır.

Çizelge 4.2. Ferro Krom ve Ferro Bor içeren kaplama tozları ve oranları (ağırlıkça %)

<i>Al₂O₃</i>	<i>NH₄Cl</i>	<i>Ferro Krom</i>	<i>Ferro Bor</i>
45	10	40	5

Çizelge 4.3. Ferro Niyobyum ve Ferro Bor içeren kaplama tozları ve oranları (ağırlıkça %)

Al_2O_3	NH_4Cl	<i>Ferro Niyobyum</i>	<i>Ferro Bor</i>
45	10	40	5

4.2. Numune Hazırlama

Altlık malzemesi olarak kullanılan Hardox 400 çeliği, metalografik numune kesme cihazı ile (10x10x10) mm³ boyutlarında kesilmiştir. Kesilen numuneler alkolle temizlenmiştir. Temizlenen yüzeyler, 180-240-400-600-800-1000 ve 1200 mesh'lik zımparalar ile zımparalanmıştır.

Kaplama işlemi için Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te gruplandırılmış toz karışımlar, aynı çizelgelerde verilen oranları sağlamak için hassas bir terazide tartılmış ve homojen bir karışım elde etmek için karıştırılmıştır. Böylece, Ferro Krom ve Ferro Bor tozlarını ve Ferro Niyobyum ve Ferro Bor tozlarını içeren homojen iki farklı toz kombinasyonu elde edilmiştir. Bu iki farklı homojen kaplama toz kombinasyonları, hassas terazide her bir kaplama numunesi ve parametresi için aynı gramajlarda tartılmıştır.

4.3. TRD Kaplama Aparatları ve İşlemi

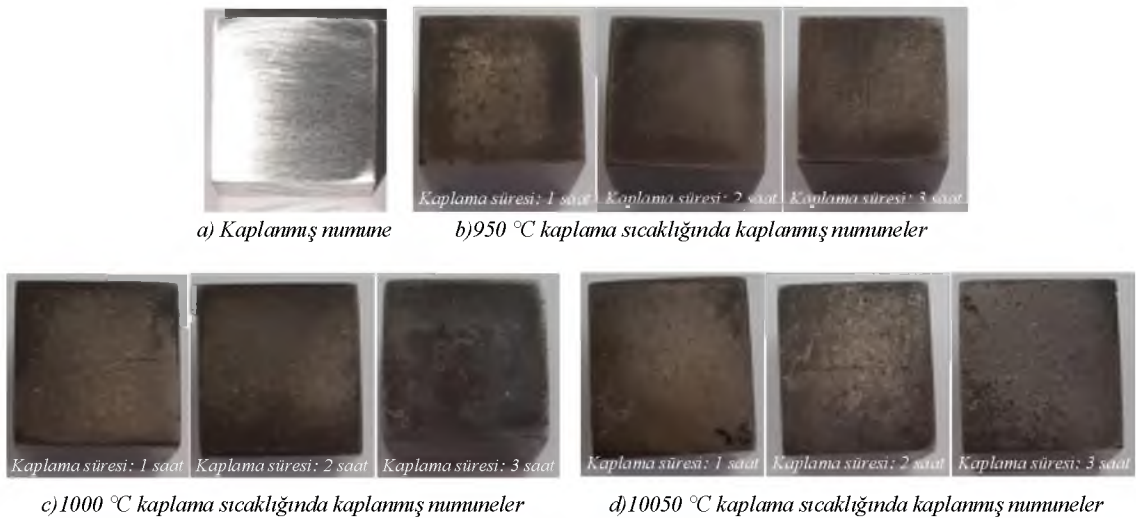
TRD uygulaması için paslanmaz çelikten üretilen pota ve yüksek sıcaklık fırını kullanılmıştır. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de bahsedilen çalışmaların görselleri sunulmuştur.

**Şekil 4.1.** Paslanmaz çelik pota



Şekil 4.2. Yüksek sıcaklık fırını

Her yanı zımparalanmış ve alkolle temizlenmiş olan numuneler, paslanmaz çelik pota içerisindeki numunenin altına ve üstüne kaplama tozları gelecek şekilde gömülmüştür. Ardından hazırlanan potalar 950, 1000 ve 1050 °C’ de 1, 2 ve 3 saatlik süreler ile kaplama işlemine tabi tutulmuştur. Fırın içerisindeki her bir pota, fırından çıkarıldıktan sonra su ile hızla soğutulmuş ve böylece pota içindeki numunenin de soğutulması sağlanmıştır. Kaplama öncesi ve sonrası Hardox 400 numunelerinin görüntüleri Şekil 4.3’teki gibidir.



Şekil 4.3. Numunelerin kaplama öncesi ve sonrası hali

4.4. Metalografik Muayene

Deney numunelerinin mikroyapılarını ve fazlarını tanımlamak amacıyla yapılacak olan metalografik muayeneler için katı ortam TRD yöntemi kullanılarak kaplanmış numuneler, kaba ve ince zımparalama işlemlerinden geçirilmiş ve ana malzemeye ulaşıncaya kadar zımparalanmıştır. Zımparalanan numuneler 3 ve 1 mikron elmas solüsyonlarla parlatılmış ve %5'lik nital çözeltiyle dağlanmıştır. Bu sayede kaplama tabakasının yüzeyi optik mikroskop ve SEM analizleri için hazırlanmıştır.

Optik mikroskop görüntüleri için Şekil 4.4'te gösterilen Nikon MA 100 ters metal optik mikroskobu kullanılmıştır. Optik mikroskop incelemeleri Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Kapadokya Teknopark'ta yapılmıştır. Optik mikroskobun görüntü analizi sistemi Clemex'tir.



Şekil 4.4. Nikon MA 100 Mikroskop

SEM analizleri ise ZEISS ULTRA PLUS GEMINI FESEM marka SEM cihazında gerçekleştirilmiş olup, Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Ayrıca EDX analiziyle kaplama tabakasında oluşma ihtimali olan fazın ve karbür oluşumlarının noktasal olarak analizleri yapılarak, pikleri grafik halinde alınmıştır. SEM ve EDX mikroskobik analiz incelemeleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsünde yapılmıştır.



Şekil 4.5. SEM cihazı

4.5. X-Işını Analizi

Değişik sıcaklık ve sürelerde katı ortam TRD yöntemi kullanılarak yapılan Hardox 400 çeliğinin kaplanmış yüzeyi, temizlendikten sonra meydana gelen karbür faz oluşumlarının belirlenmesi için XRD ile analizi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsünde bulunan ve görüntüsü Şekil 4.6’da verilen Rigaku Ultima IV XRD cihazı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 4.6. XRD cihazı

4.6. Mikrosertlik Ölçümü

Numuneler, kaplandıktan sonra kaplama yüzeyinin deformasyon davranışlarını ölçmek için mikrosertlik değerleri ölçülmüştür. Bu ölçümler, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Kapadokya Teknopark'ta bulunan ve Şekil 4.7'te gösterilen Future Tech FM-700 marka mikrosertlik cihazının kullanımı ile yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde, Vickers sertlik değeri kaplama yüzeyine 25 g/f yükün 10 saniye süre ile tatbik edilmesi ile belirlenmiştir. Kaplama tabakasının beş farklı yüzeyinden belirlenen mikrosertlik değerlerinin ortalaması alınarak nihai mikrosertlik değeri tespit edilmiştir.



Şekil 4.7. Mikrosertlik cihazı

4.7. Aşınma Testi

Farklı sıcaklık (950, 1000 ve 1050 °C) ve sürelerde (1, 2 ve 3 saat) kaplanan numunelerin uygulanan yüke (5, 10 ve 15 N) bağlı aşınma testlerini minimum seviyede yaparak, işlem sonucuna ulaşmak için Taguchi yönteminden faydalanılmıştır. Taguchi yönteminde, L9 ortogonal dizi tasarımı kullanılmıştır. Bu tasarıma göre toplam üç faktör (deney parametresi) ve her bir faktöre ait üç seviye için 9 adet aşınma testi yapılmalıdır. Ancak yapılacak bu aşınma deneylerini kaplanmamış Hardox 400 çeliğinki ile kıyaslayabilmek için kaplanmamış çeliğin de üç farklı uygulama yükünde aşınma deneyine tabi tutulması gerekmektedir. Bu doğrultuda toplam 12 adet aşınma testi, Çizelge 4.4'te verilen faktör ve seviyeleri için yapılmıştır.

Çizelge 4.4. Aşınma deneyi için belirlenen parametreler

<i>Deney Numarası</i>	<i>Kaplama Sıcaklığı (°C)</i>	<i>Kaplama Süresi (saat)</i>	<i>Uygulanan Yük (N)</i>
1	950	1	5
2		2	10
3		3	15
4	1000	1	10
5		2	15
6		3	5
7	1050	1	15
8		2	5
9		3	10
10	Kaplanmamış Hardox 400 Çeliği		5
11			10
12			15

Aşınma testleri, kuru ortamda gerçekleştirilmiştir. Numune yüzeylerine 6 mm çapa sahip AISI 420 Inox misketler (Şekil 4.8) tatbik edilerek, bu misketlerin yüzeyde ileri ve geri hareketi sağlanmıştır (Şekil 4.9). Böylece yüzeylerin adhezif aşınması sağlanmıştır.

**Şekil 4.8.** AISI 420 Inox misket

Adhezif aşınma testlerinde, frekans 5 Hz, Strok 5 mm ve yük çevrim sayısı 1000 olacak şekilde ayarlanmıştır. Adhezif aşınma testleri, Şekil 4.10'da gösterilen UTS Tribometer T10 Test Cihazı ile Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsünde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.9. Aşınma mekanizmasının şematik gösterimi

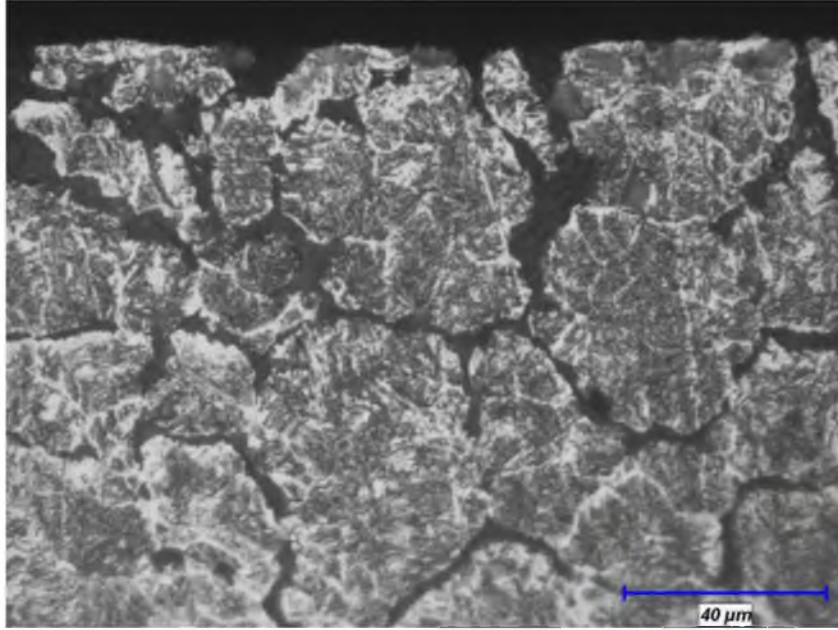


Şekil 4.10. Aşınma Test Cihazı

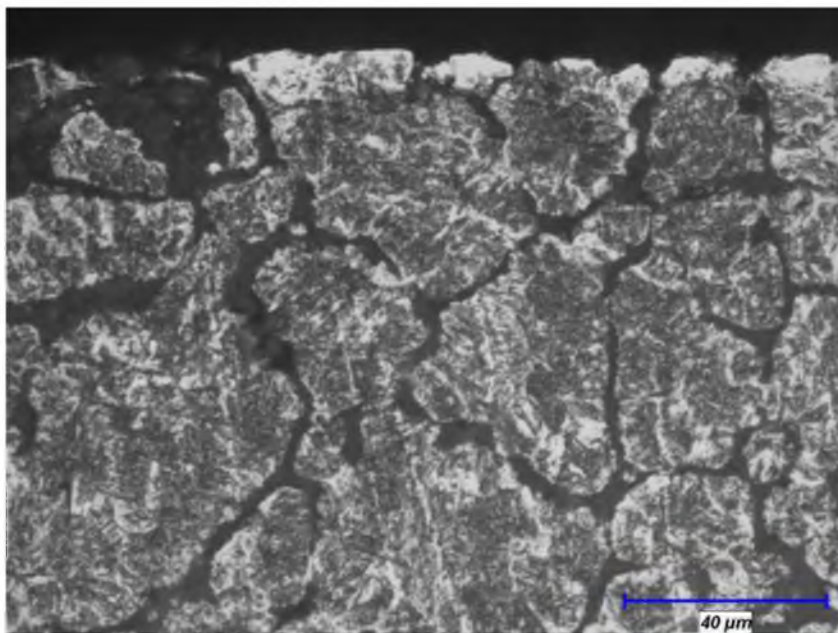
Deney sonucunda, aşınma hacimleri ve aşınma izi yüzey profilleri grafikleriyle beraber elde edilerek adhezif aşınma miktarları tespit edilmiştir. Adhezif aşınmanın tespitinde, aşınma testlerine başlamadan önce numunelerin yüzeylerindeki pürüzlülük miktarı da göz önünde bulundurulmuştur. Kaplanmış numuneler için tespit edilen değerler Taguchi deney tasarımı analiz edilmiştir. Analizlerde, sinyal gürültü oranı (S/N) *“en küçük en iyidir”* olacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca kaplanmış ve kaplanmamış numuneler, hacimsel aşınma miktarı bakımından karşılaştırılmıştır.

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

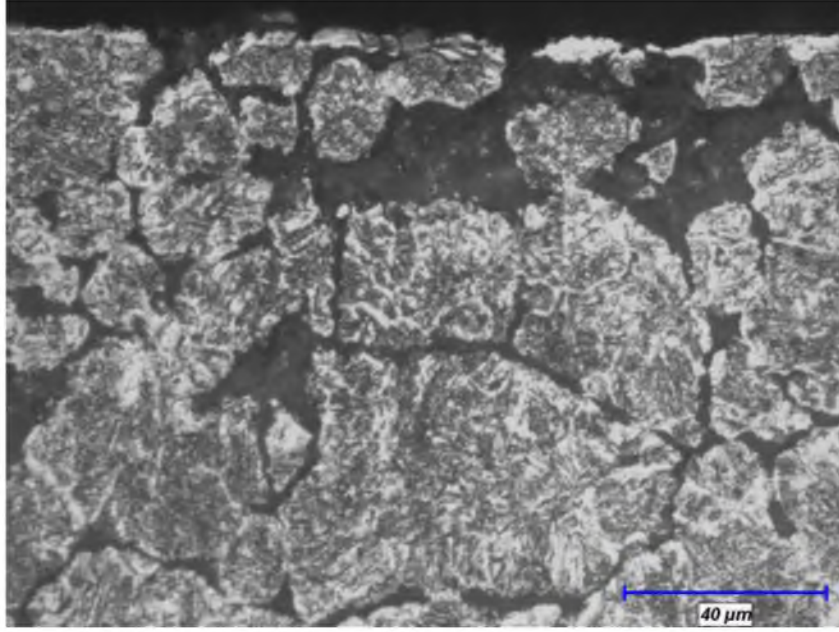
Bu tez çalışmasında; başlangıçta Hardox 400 çeliğinin yüzeyi, Ferro Krom ve Ferro Bor tozları kullanılarak 950, 1000 ve 1050 °C sıcaklıklarda ve 1, 2 ve 3 saatlik süre zarfları için TRD yöntemiyle kaplanmaya çalışılmıştır. Kaplama sonrası elde edilen bazı optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.1–Şekil 5.4’te verilmiştir.



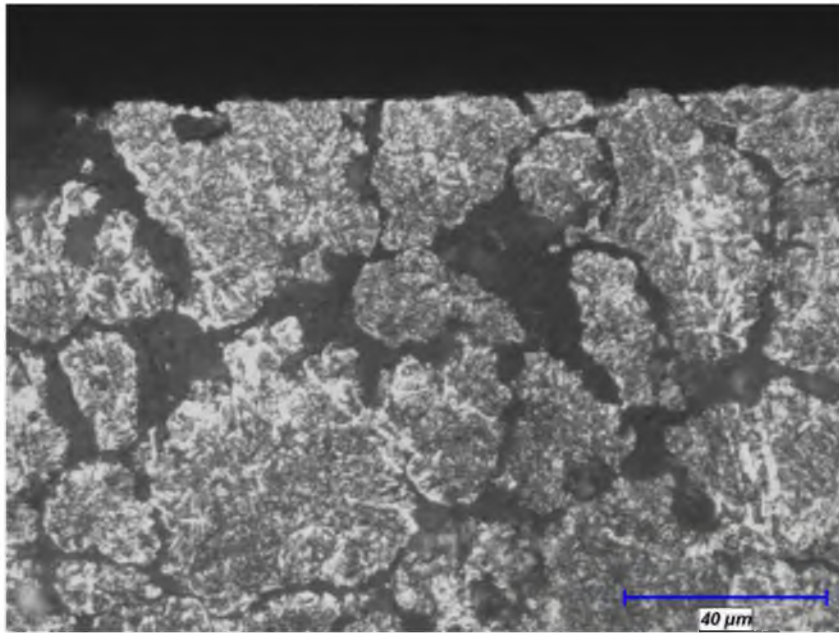
Şekil 5.1. 950 °C ve 1 saat için Ferro Cr ve Ferro B ile kaplanmaya çalışılan Hardox 400 çeliği



Şekil 5.2. 1000 °C ve 1 saat için Ferro Cr ve Ferro B ile kaplanmaya çalışılan Hardox 400 çeliği



Şekil 5.3. 1050 °C ve 1 saat için Ferro Cr ve Ferro B ile kaplanmaya çalışılan Hardox 400 çeliği

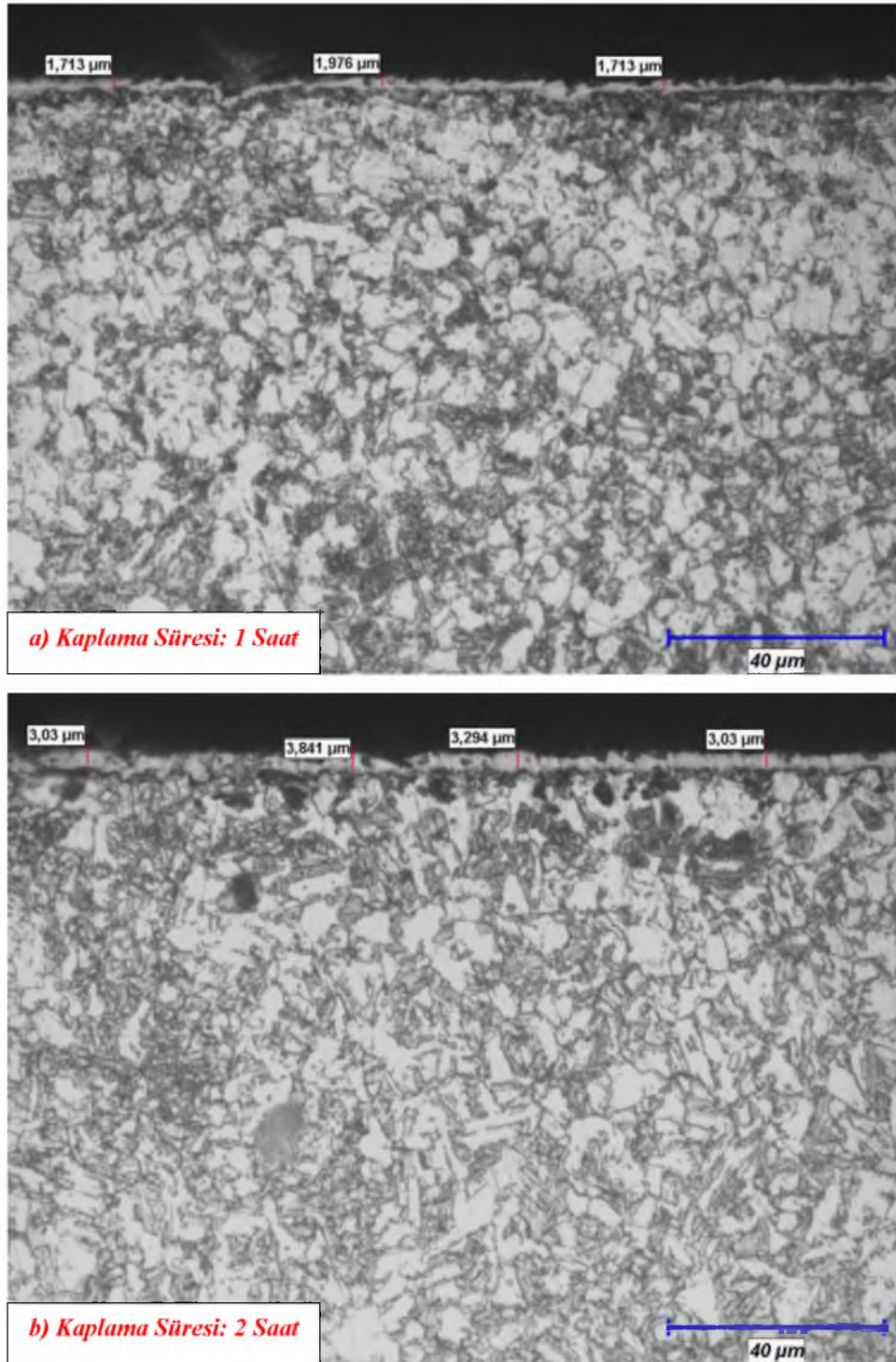


Şekil 5.4. 1050 °C ve 3 saat için Ferro Cr ve Ferro B ile kaplanmaya çalışılan Hardox 400 çeliği

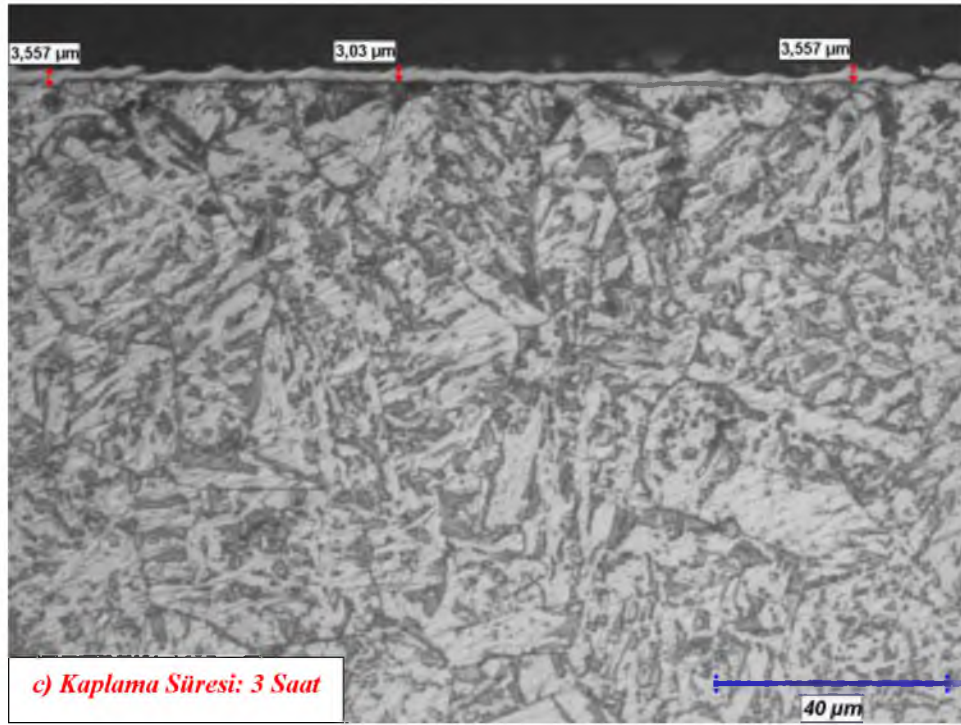
Şekil 5.1–Şekil 5.4’te görüldüğü gibi farklı kaplama sıcaklıkları ve süreleri için Hardox 400 çeliğinin yüzeyinde herhangi bir kaplama tabakası elde edilememiştir. Bu doğrultuda söz konusu tozlar yerine Ferro Niyobyum ve Ferro Bor tozları kullanılarak aynı işlem parametreleri için kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Hardox 400 çeliğinin yüzeyi, TRD yöntemi kullanılarak Niyobyum Karbür-Bor (NbC-B) kaplanabilmiştir. NbC-B kaplanan yüzeyler için ayrıntılı analizler, alt başlıklar altında sunulmuştur.

5.1. Metalografik Muayene Sonuçları

TRD yöntemi kullanılarak ağırlıkça %45 Al_2O_3 , %10 NH_4Cl , %40 Ferro Nb ve %5 Ferro B toz karışımları ile kaplanan Hardox 400 çeliğinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri incelenmiştir. 950 °C'lik sıcaklıkta 1, 2 ve 3 saatlik süre zarfları için kaplanan Hardox 4000 çeliğinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.5'te, SEM görüntüleri ise Şekil 5.6'da verilmiştir.



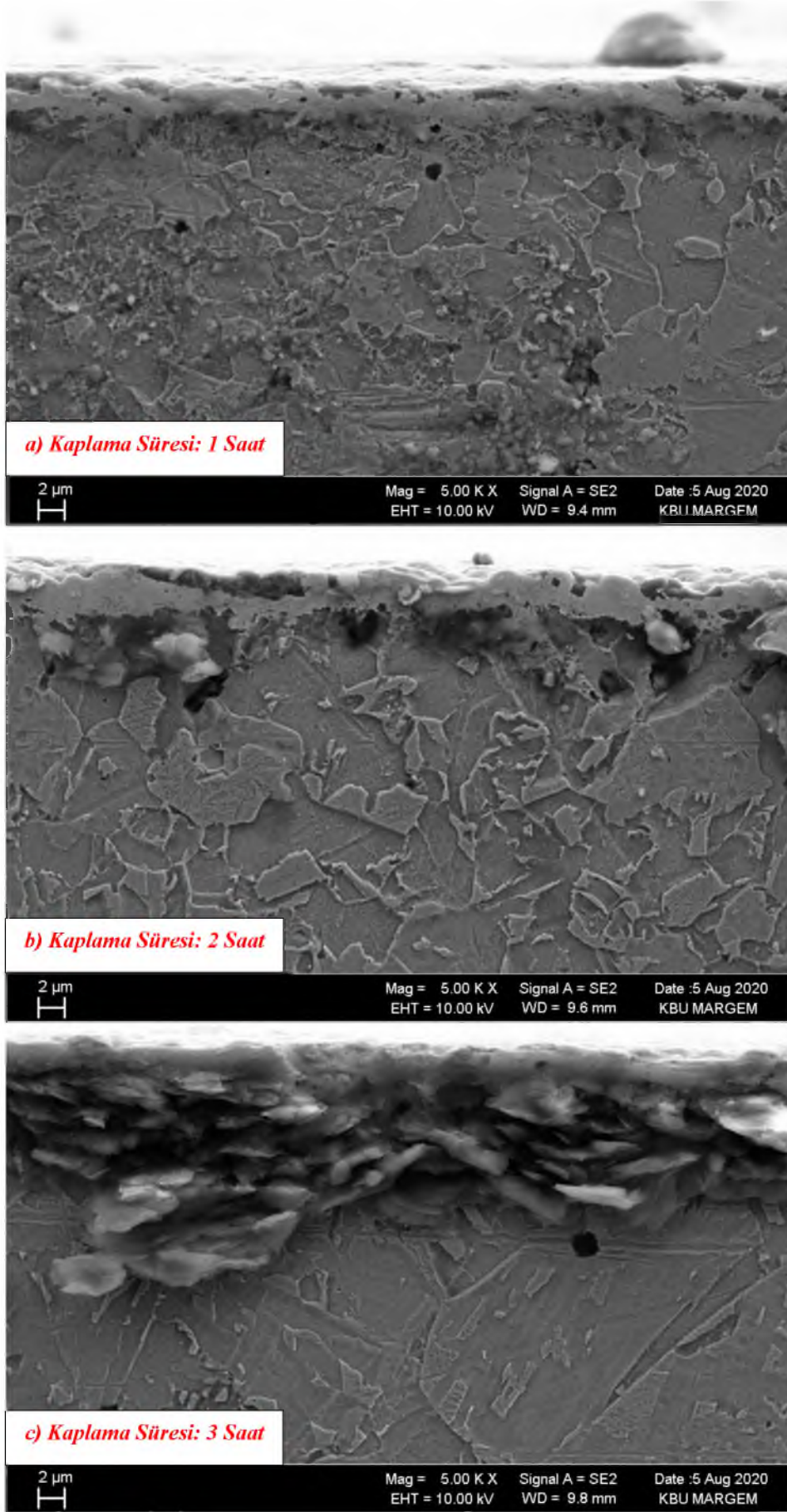
Şekil 5.5. 950 °C sıcaklıkta kaplanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri



Şekil 5.5. 950 °C sıcaklıkta kaplanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri (devamı)

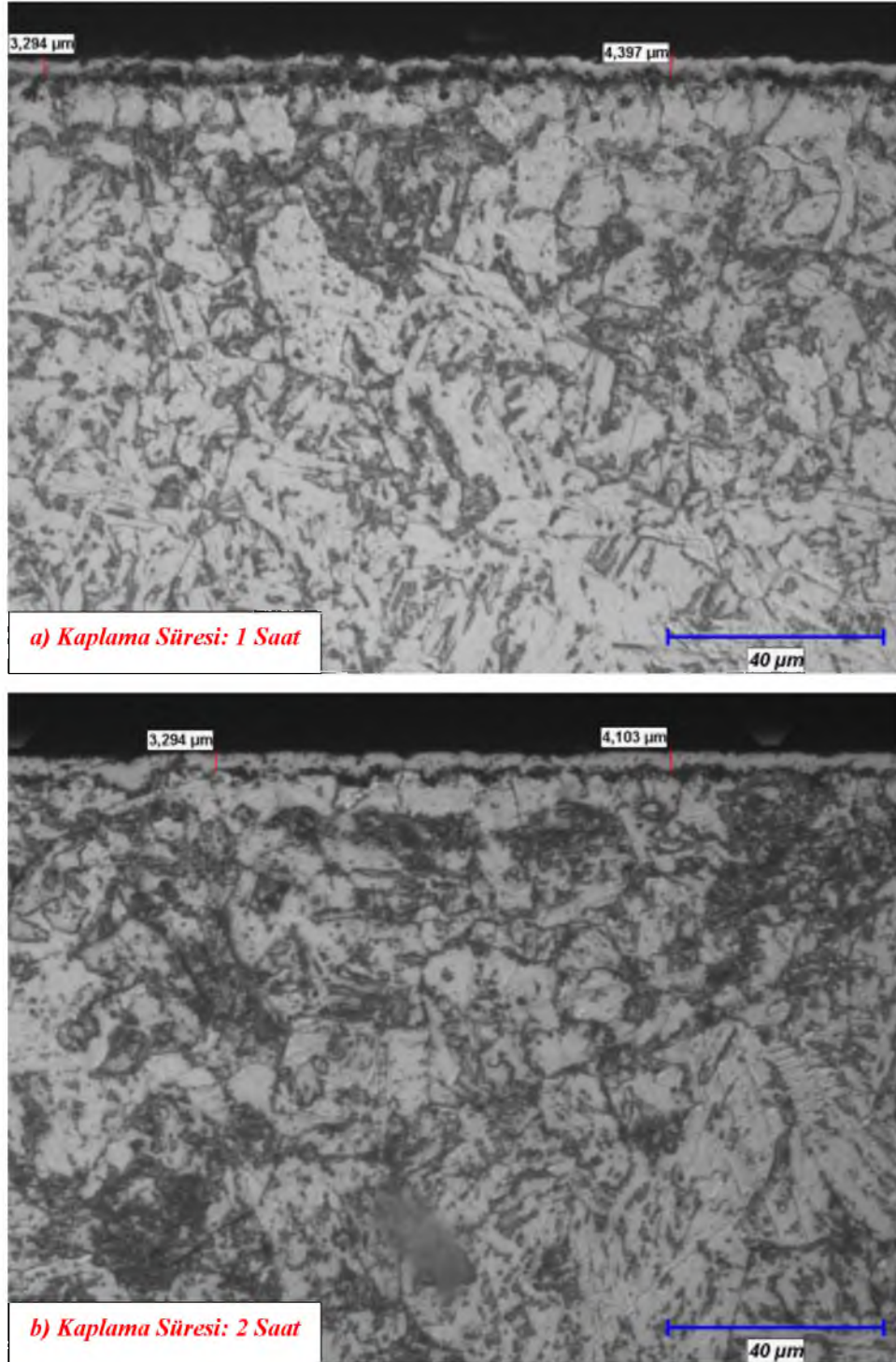
Şekil 5.5'te, 950 °C'lik kaplama sıcaklığı ile kaplanmış yüzeylerin farklı noktalarından kaplama kalınlıkları ölçülmüştür. 1 saatlik kaplama süresi için ölçülen kaplama kalınlıkları 1,713 μm , 1,976 μm ve 1,713 μm 'dir. Ortalama kaplama kalınlığı yaklaşık olarak 1,80 μm olarak hesaplanmıştır. 2 saatlik kaplama süresi için ölçülen kaplama kalınlıkları 3,03 μm , 3,844 μm , 3,294 μm ve 3,03 μm 'dir. Ortalama kaplama kalınlığı yaklaşık olarak 3,30 μm olarak hesaplanmıştır. 3 saatlik kaplama süresi için ise ölçülen kaplama kalınlıkları 3,557 μm , 3,03 μm ve 3,557 μm 'dir. Ortalama kaplama kalınlığı yaklaşık olarak 3,38 μm olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan ortalama kaplama kalınlıklarından da görüldüğü gibi kaplama süresi arttıkça kaplama kalınlığı artmıştır. Ancak kaplama süresinin 1 saatten 2 saate çıkartılmasıyla artan kaplama kalınlığı, kaplama süresinin 2 saatten 3 saate çıkartılmasındakinden çok daha fazla olmuştur.

Şekil 5.6'da 950 °C'de TRD yöntemi ile kaplanan numunelerin SEM görüntülerinden kaplama malzemesinin numune yüzeyi boyunca homojen bir şekilde dağıldığı ve altlık malzemesi ile kaplama tabakasındaki difüzyon bölgesi görülmektedir. Kaplamanın üst bölgelerinde, farklı konsantrasyonlardaki oluşumların Nb ve B elementlerinin farklı difüzyon katsayılarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

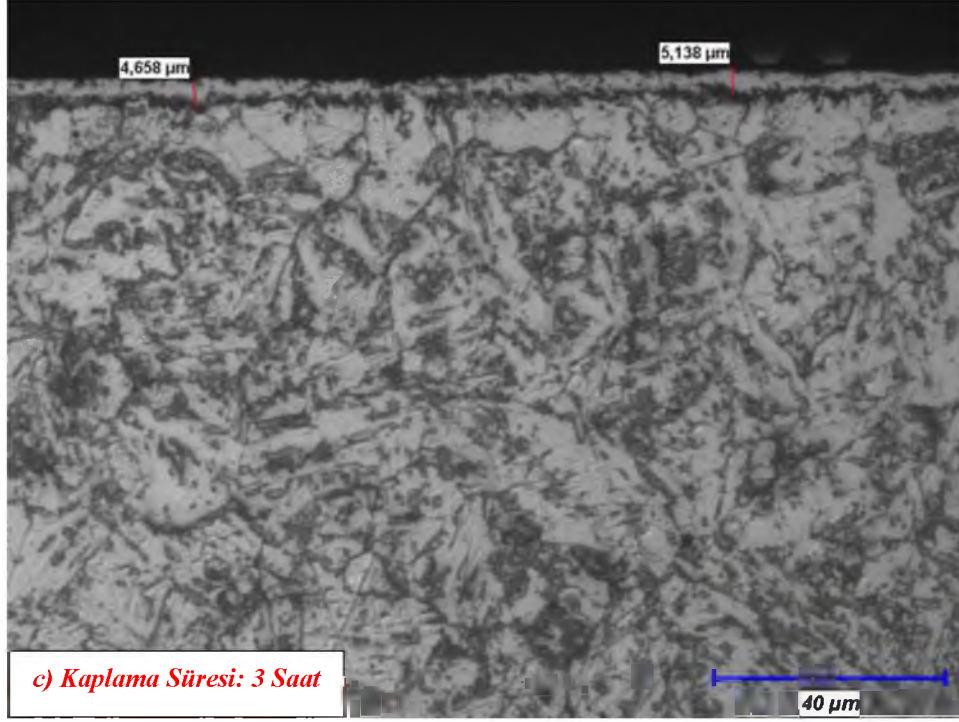


Şekil 5.6. 950 °C’lik sıcaklıkta kaplanan numunelerin SEM görüntüleri

1000 °C’lık sıcaklıkta 1, 2 ve 3 saatlik süre zarfları için kaplanan Hardox 400 çeliğinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 5.7 ve 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.7. 1000 °C sıcaklıkta kaplanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri

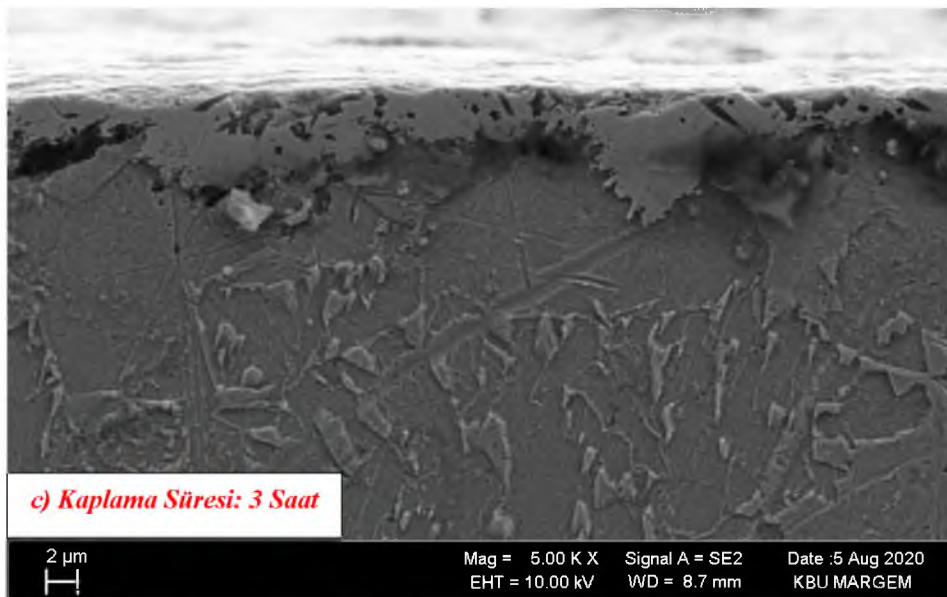
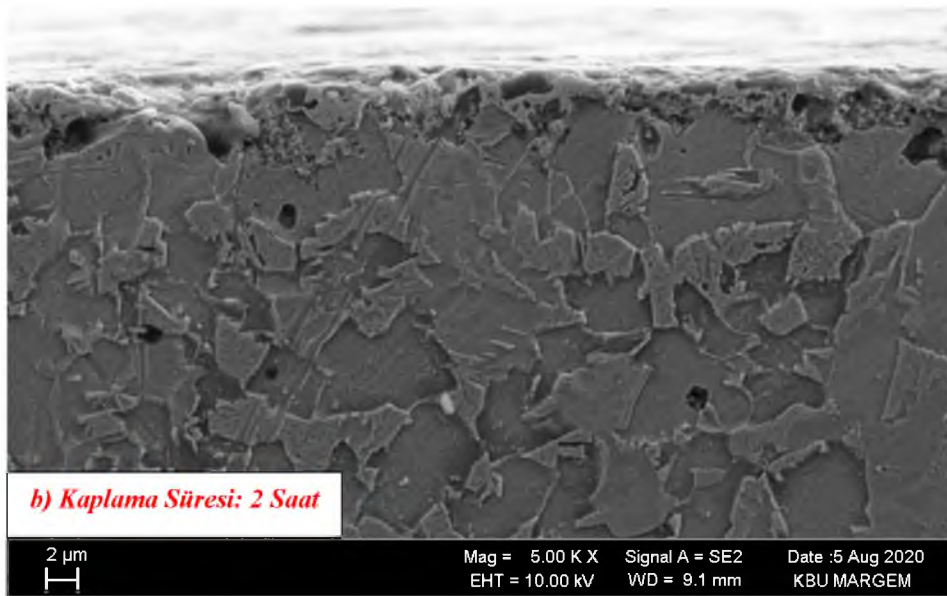
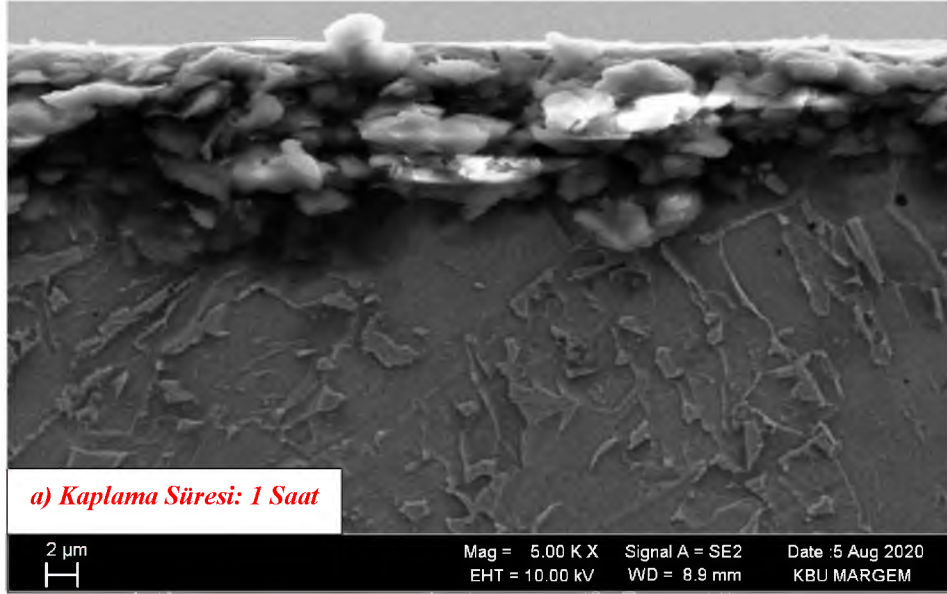


Şekil 5.7. 1000 °C sıcaklıkta kaplanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri (devamı)

Şekil 5.7’de, 1000 °C’lik kaplama sıcaklığı ile kaplanmış yüzeylerin farklı iki noktasından ölçülen kaplama kalınlıkları görülmektedir. Kaplama kalınlıklarının ortalaması alındığında, 1, 2 ve 3 saatlik kaplama süreleri için ölçülen yaklaşık değerler sırasıyla 3,85 µm, 3,70 µm ve 4,90 µm’dir. Her ne kadar 2 saatlik kaplama süresi için ölçülen değer 1 saatlik kaplama süresi için ölçülen değerden düşük olsa da bu değer çok düşüktür. Ancak 1 ve 2 saatlik kaplama süreleri için elde edilen kaplama kalınlığı, 3 saatlik kaplama süresinden düşük elde edilmiştir. Genel olarak kaplama süresinin artmasıyla kaplama kalınlığının arttığı söylenebilir.

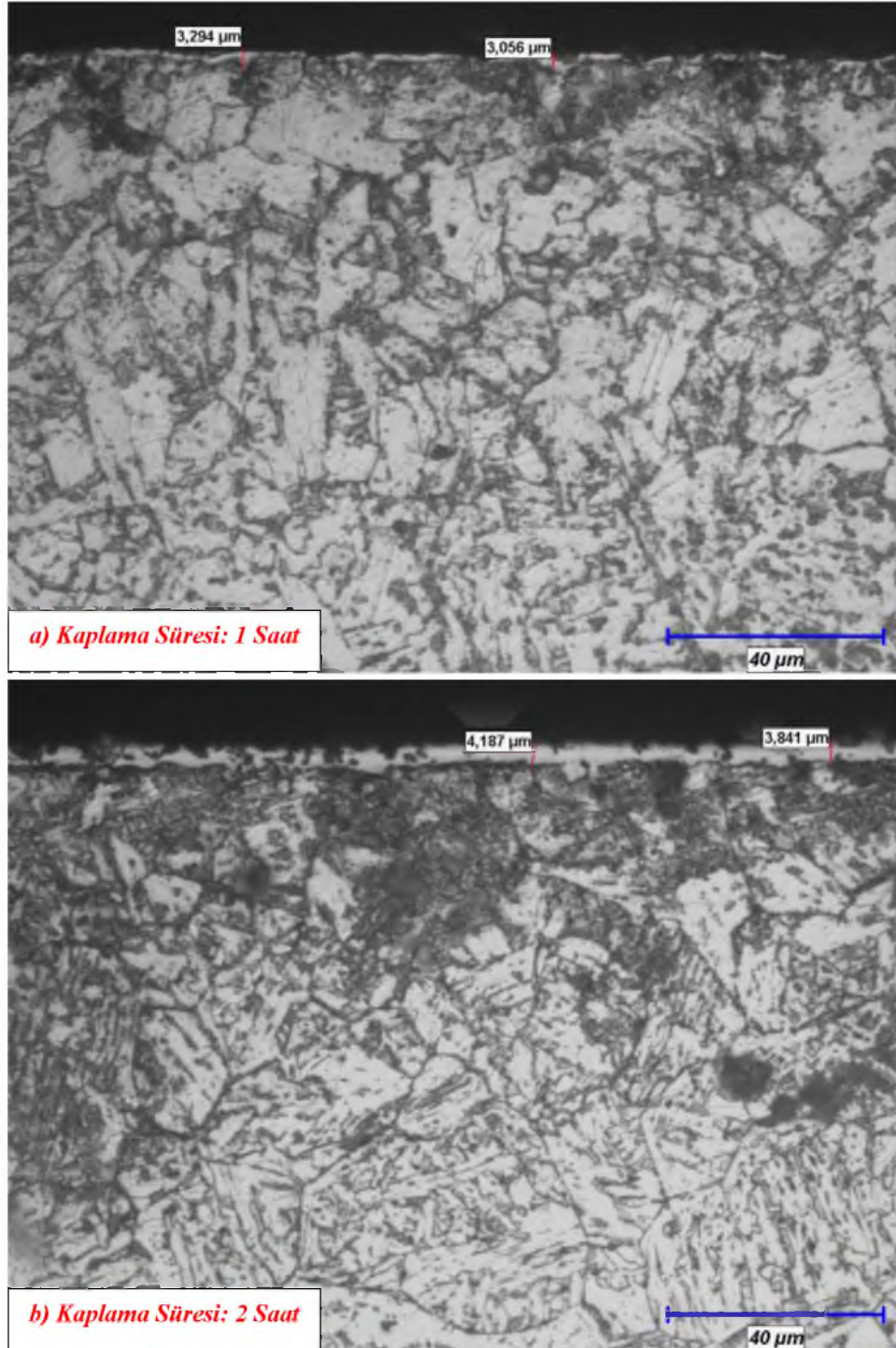
Şekil 5.8’deki 1000 °C’lik kaplama sıcaklığı ile kaplanmış yüzeylerin SEM görüntüleri, Şekil 5.6’daki 950 °C’lik kaplama sıcaklıkları ile kaplanmış yüzeylerinki gibi altlık malzemesi ile kaplama tabakası arasında difüzyon oluştuğunu göstermektedir. Kaplamanın üst bölgelerinde ise Nb ve B elementlerinin difüzyonu ile oluşan kaplamanın numune yüzeyi boyunca homojen bir şekilde dağıldığını görülmektedir.

1050 °C’lik sıcaklıkta 1, 2 ve 3 saatlik süre zarfları için kaplanan Hardox 400 çeliğinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 5.9 ve 5.10’da verilmiştir.

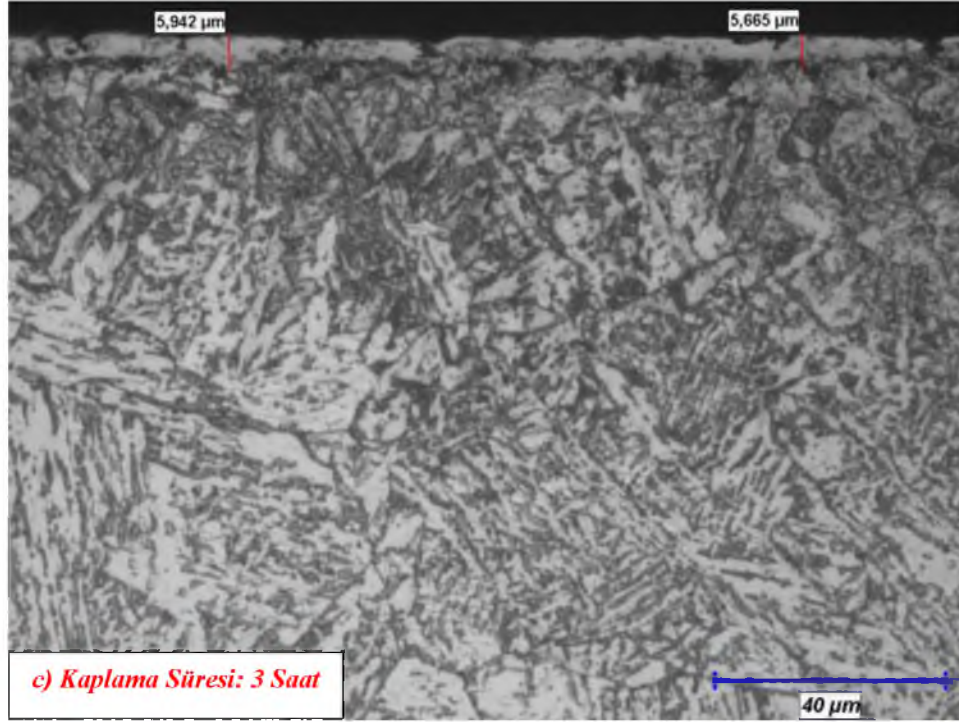


Şekil 5.8. 1000 °C'lik sıcaklıkta kaplanan numunelerin SEM görüntüleri

Şekil 5.9'da verilen 1050 °C'lik kaplama sıcaklığı ile kaplanmış yüzeylerin optik mikroskop görüntülerinde, 1 saatlik kaplama süresi için ölçülen kaplama kalınlıkları 3,294 μm ve 3,056 μm , 2 saatlik kaplama süresi için ölçülen kaplama kalınlıkları 4,187 μm ve 3,841 μm , 3 saatlik kaplama süresi için ölçülen kaplama kalınlıkları ise 5,942 μm ve 5,665 μm 'dir. Kplama kalınlıklarının ortalaması alındığında, 1, 2 ve 3 saatlik kaplama süreleri için ölçülen yaklaşık değerler sırasıyla 3,18 μm , 4,01 μm ve 5,87 μm 'dir. Kplama süresinin artmasıyla kplama kalınlıkları artmıştır.

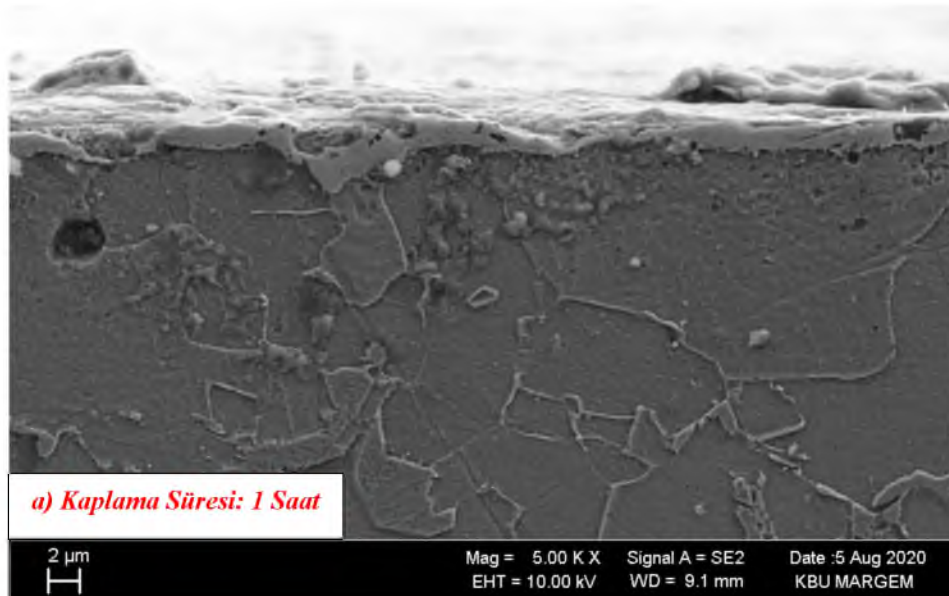


Şekil 5.9. 1050 °C sıcaklıkta kplanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri

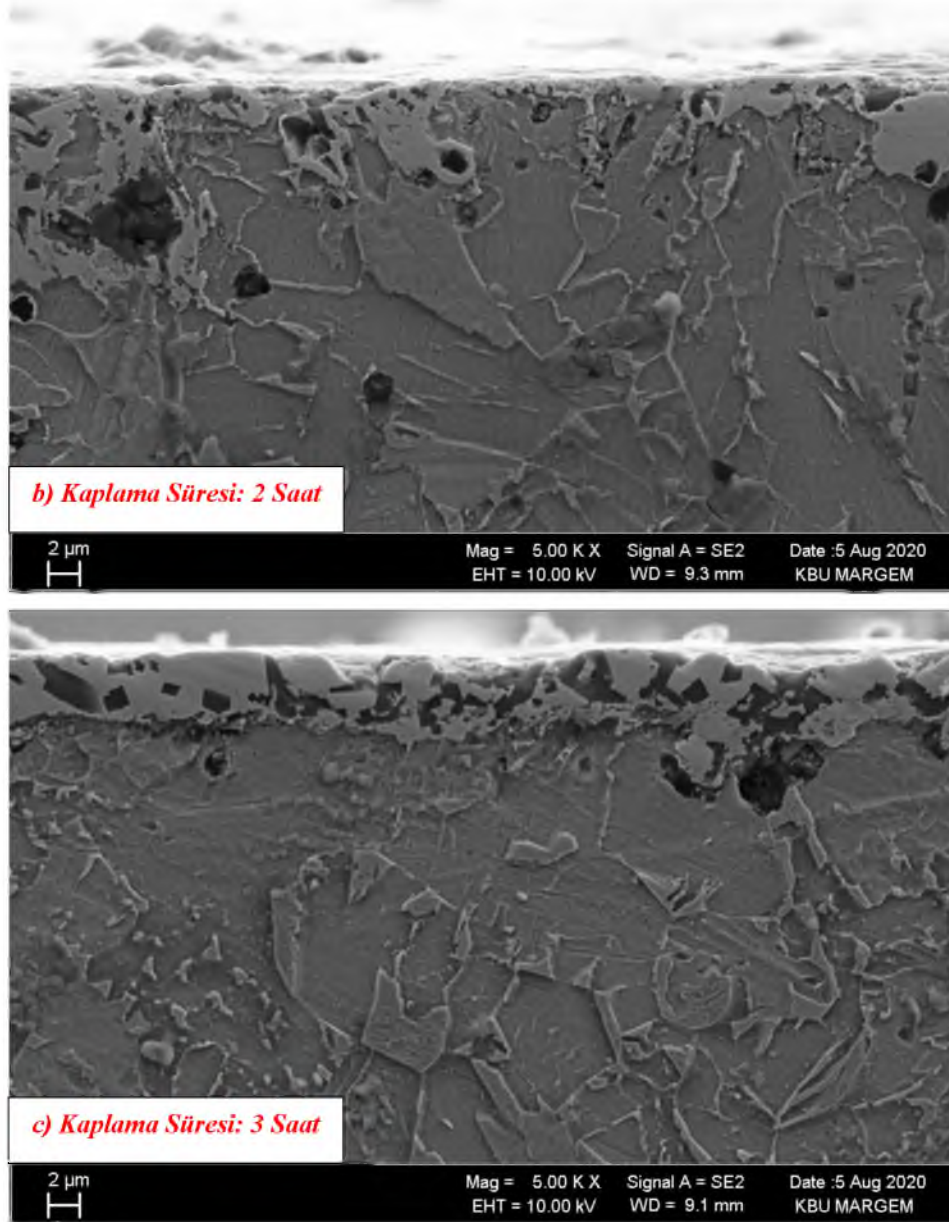


Şekil 5.9. 1050 °C sıcaklıkta kaplanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri (devamı)

Şekil 5.10'daki SEM görüntüleri, Şekil 5.6 ve Şekil 5.8'dekine benzer elde edilmiştir. Tüm SEM görüntülerinden Hardox 400 çeliği yüzeyinin Ferro Nb ve Ferro B ile kaplanabildiği ve kaplamanın numune yüzeyi boyunca homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir.



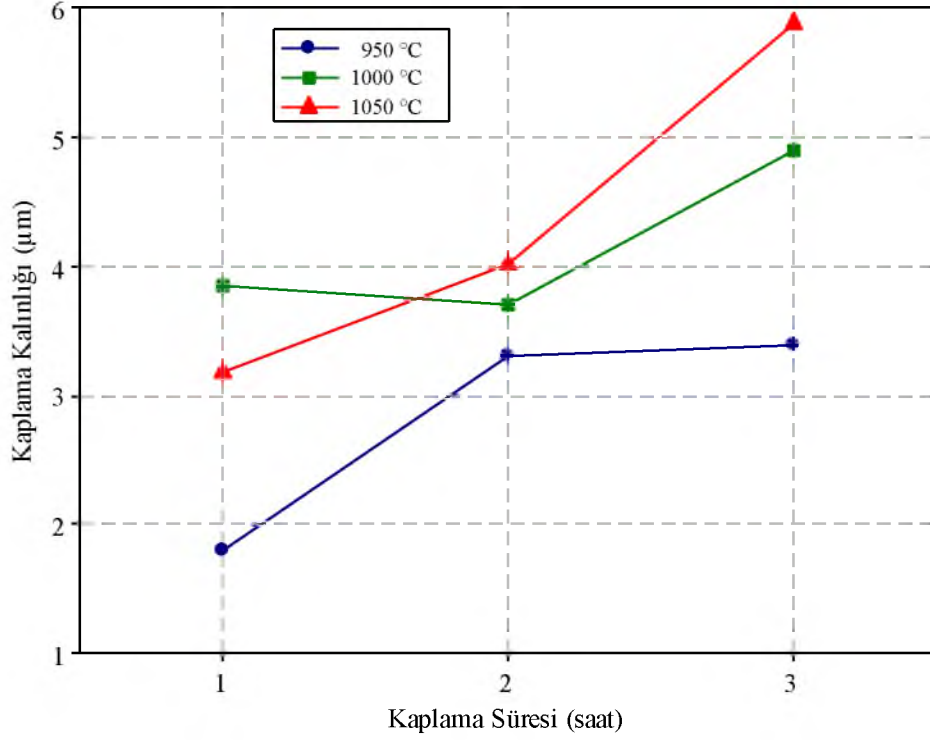
Şekil 5.10. 1050 °C'lik sıcaklıkta kaplanan numunelerin SEM görüntüleri



Şekil 5.10. 1050 °C’lik sıcaklıkta kaplanan numunelerin SEM görüntüleri (devamı)

Kaplama sıcaklığı ve süresinin kaplama kalınlığı değişimine etkisini bir arada görmek için hesaplanan ortalama kaplama kalınlıkları grafiğe dökülmüştür (Şekil 5.11). Şekil 5.11’de de görüldüğü gibi 950 °C’lik kaplama sıcaklıklarında düşük değerlerde, 1000 °C’lik kaplama sıcaklıklarında orta değerlerde, 1050 °C’lik kaplama sıcaklıklarında ise 1 saatlik kaplama süresi hariç diğer kaplama sürelerinde yüksek değerlerde kaplama kalınlıkları elde edilmiştir. Genel olarak kaplama kalınlıklarının artan kaplama sıcaklığı ve süresiyle arttığı görülmüştür. Minimum kaplama kalınlığı, 950 °C kaplama sıcaklığı ile 1 saat süreyle kaplanan numunelerde, maksimum kaplama kalınlığı ise 1050 °C kaplama sıcaklığı ile 3 saat süreyle kaplanan numunelerde oluşmuştur. Kurt ve arkadaşları (2020) tarafından AISI D6 çeliği yüzeyinde TRD yöntemi ile oluşturulan

titanyum bor karbür (TiBC) kaplama kalınlığının artan kaplama süresi ve sıcaklığı ile arttığını belirtmişlerdir. Kaplama kalınlığı üzerinde kaplama sıcaklığının kaplama süresinden daha etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Benzer sonuçlar, farklı kaplama fazları için Pouraliakbar ve arkadaşları (2015), Kurt ve arkadaşları (2018), Günen ve arkadaşları (2020) tarafından yapılan çalışmalarda da vurgulanmıştır.

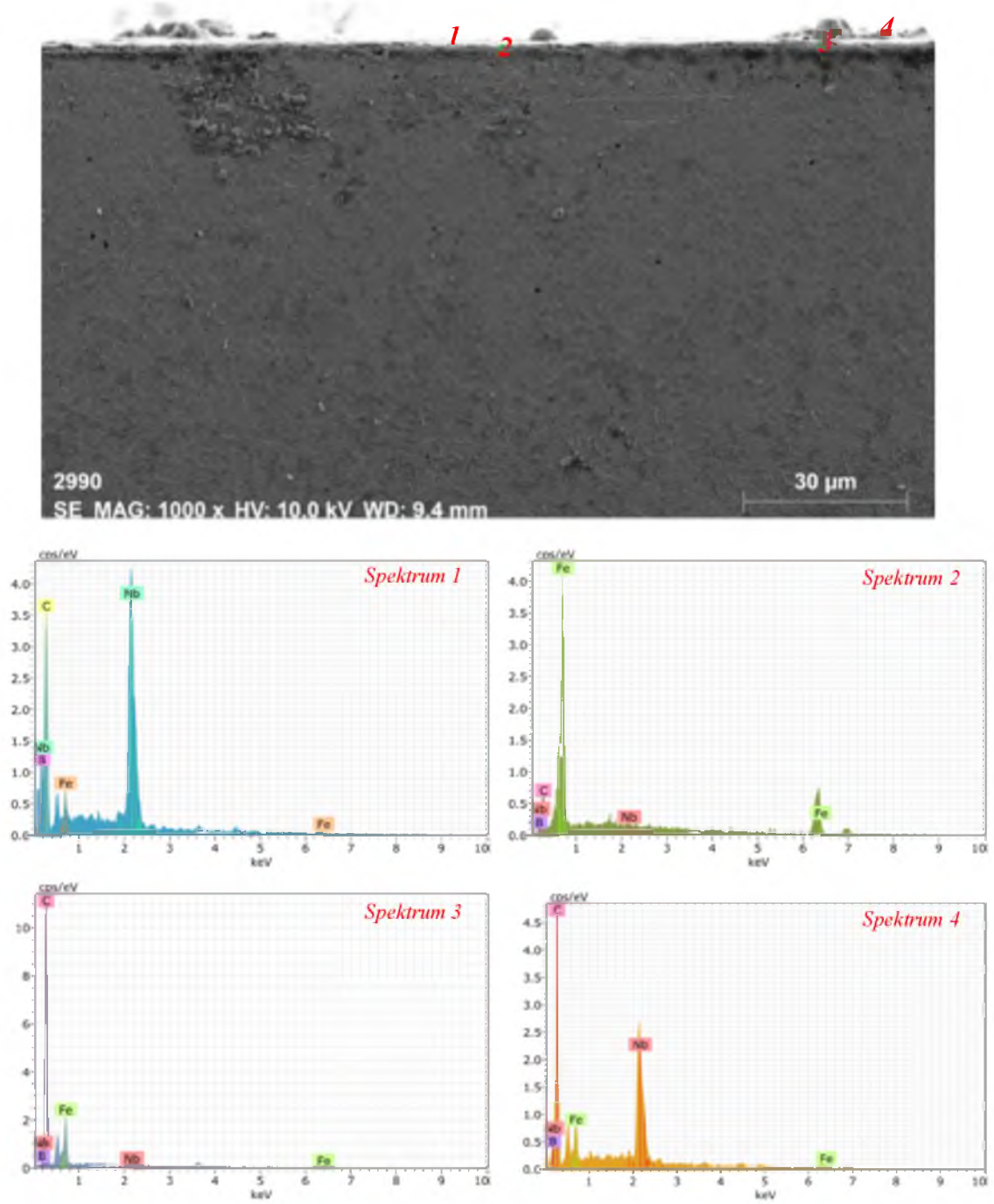


Şekil 5.11. Kaplama kalınlığının kaplama sıcaklığı ve süresi ile değişimi

5.2. EDX ve XRD Sonuçları

Kaplama tozlarının ve parametrelerinin kaplama yüzeyinde oluşturduğu elementleri analiz etmek için kaplanmış Hardox 400 çeliği SEM görüntülerinin farklı noktalarından EDX analizleri gerçekleştirilmiştir. 950 °C’de, 1, 2 ve 3 saat boyunca kaplanan numunelerin farklı noktalarından elde edilen EDX analiz grafikleri sırasıyla Şekil 5.12–Şekil 5.14’te ve onların spektrum değerleri için elde edilen kimyasal elementlerin kütleli yüzdesi ise sırasıyla Çizelge 5.1–Çizelge 5.3’te verilmiştir.

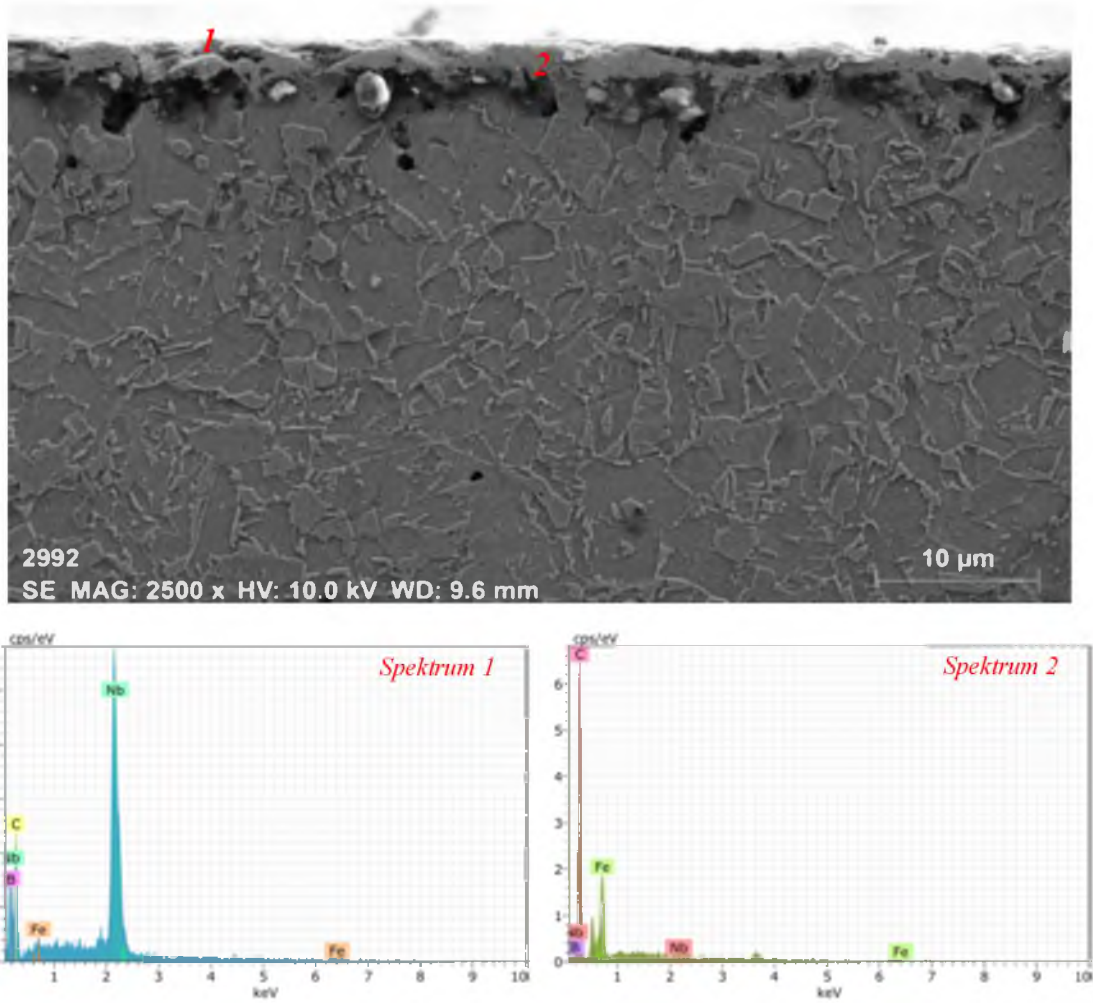
950 °C’de, 1 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliği için Şekil 5.12’de, spektrum 1 ve 4 ile gösterilen kaplama yüzeyi ile spektrum 2 ve 3 ile gösterilen kaplama ve altlık malzemesi arasındaki difüzyon bölgelerinde oluşan kütleli kimyasal bileşim değerleri Çizelge 5.1’de incelendiği zaman, kaplama bölgelerinde Nb, B ve C elementlerinin, difüzyon bölgelerinde ise Fe ve C elementlerinin yoğun olduğu görülmektedir.



Şekil 5.12. 950 °C’de 1 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin EDX analizi

Çizelge 5.1. 950 °C’de 1 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin kütlelesel kimyasal bileşim yüzdesi

Spektrum	B	C	Fe	Nb
1	9,34	38,68	11,17	40,82
2	7,60	10,24	82,04	0,12
3	8,83	89,33	1,59	0,25
4	7,34	51,25	14,10	27,32

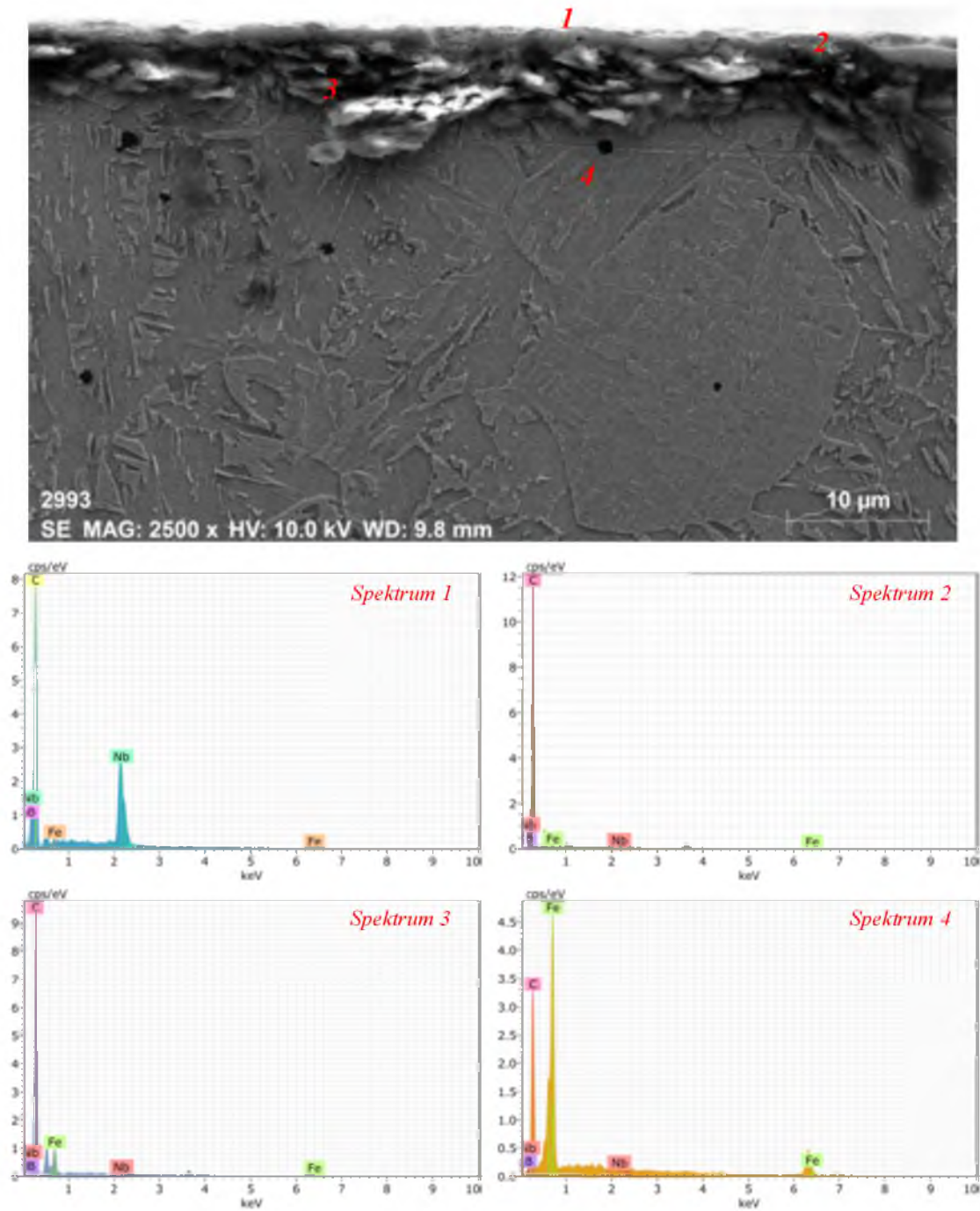


Şekil 5.13. 950 °C’de 2 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin EDX analizi

Çizelge 5.2. 950 °C’de 2 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin kütleli kimyasal bileşim yüzdesi

Spektrum	B	C	Fe	Nb
1	0,73	28,65	5,20	65,42
2	7,47	72,82	19,71	0

950 °C’de, 2 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliği için Çizelge 5.2’de verilen kütleli kimyasal bileşim değerleri incelendiği zaman, Şekil 5.13’te, spektrum 1 ile gösterilen kaplama üst bölgelerinde Nb ve C elementlerinin, spektrum 2 ile gösterilen difüzyon bölgelerinde ise B, C ve Fe elementlerinin yoğun olduğu görülmektedir.



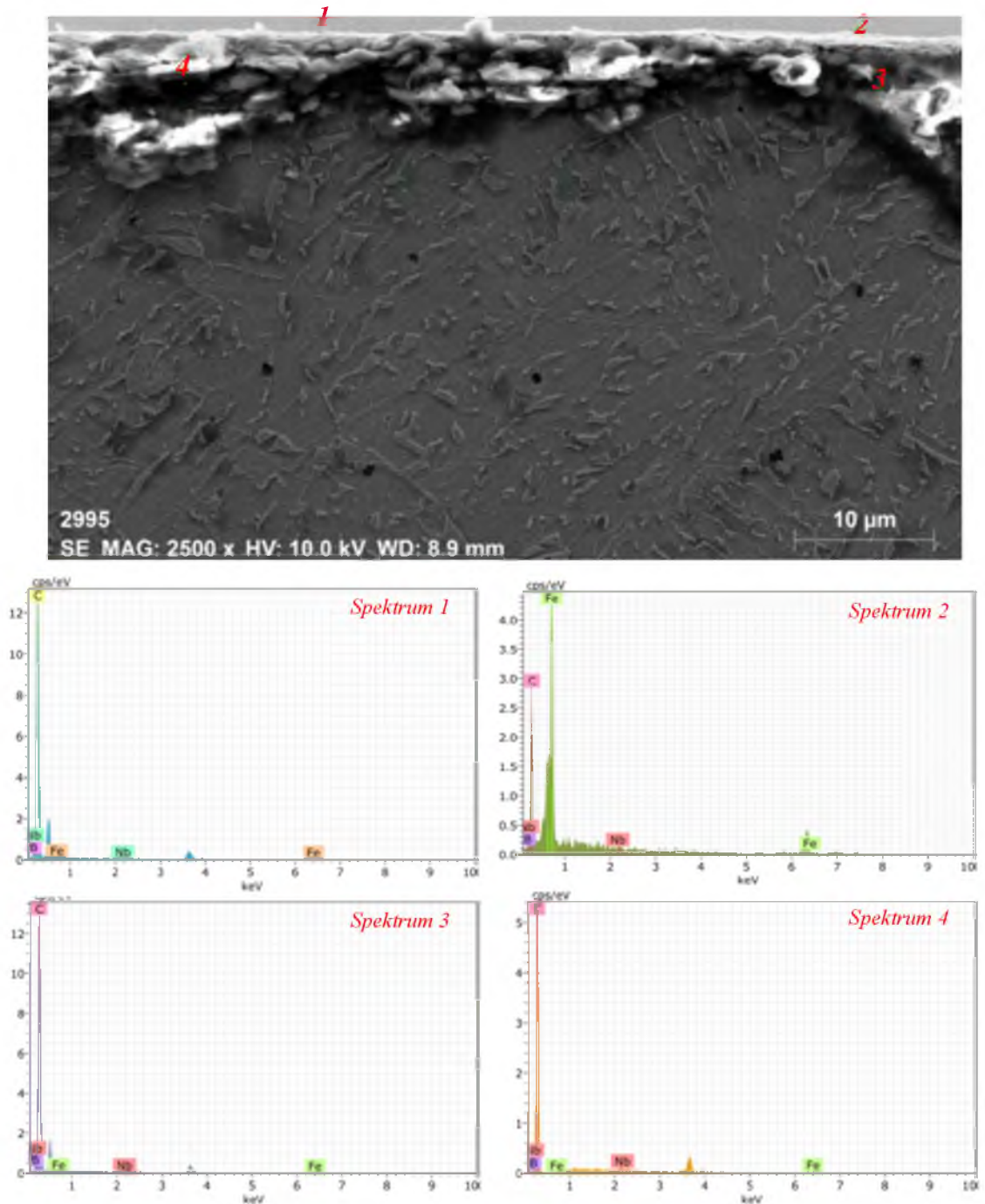
Şekil 5.14. 950 °C’de 3 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin EDX analizi

Çizelge 5.3. 950 °C’de 3 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin kütlelesel kimyasal bileşim yüzdesi

Spektrum	B	C	Fe	Nb
1	9,20	63,20	0,40	27,20
2	8,27	90,93	0,07	0,74
3	6,83	79,54	13,42	0,21
4	9,57	43,37	47,06	0

950 °C’de, 3 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliği için kütlelesel kimyasal bileşim değeri incelendiği zaman, diğer kaplama sürelerinden elde edilen değere benzer sonuçlar elde edilmiştir.

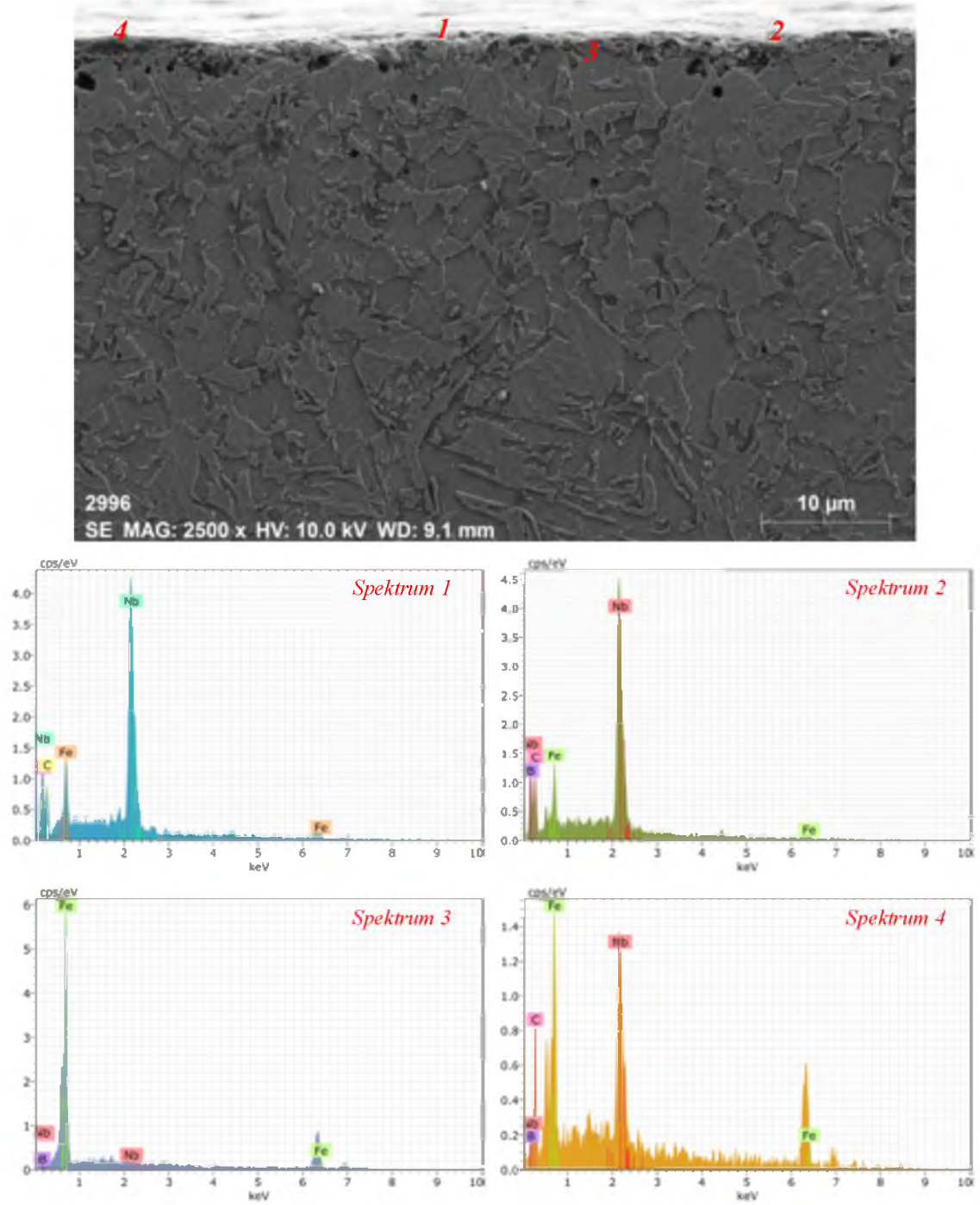
1000 °C’de, 1, 2 ve 3 saat boyunca kaplanan numunelerin farklı noktalarından elde edilen EDX analiz grafikleri sırasıyla Şekil 5.15–Şekil 5.17’de ve onların spektrum değeri için elde edilen kimyasal elementlerin kütlelesel yüzdesi ise sırasıyla Çizelge 5.4–Çizelge 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.15. 1000 °C’de 1 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin EDX analizi

Çizelge 5.4. 1000 °C’de 1 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin kütlelesel kimyasal bileşim yüzdesi

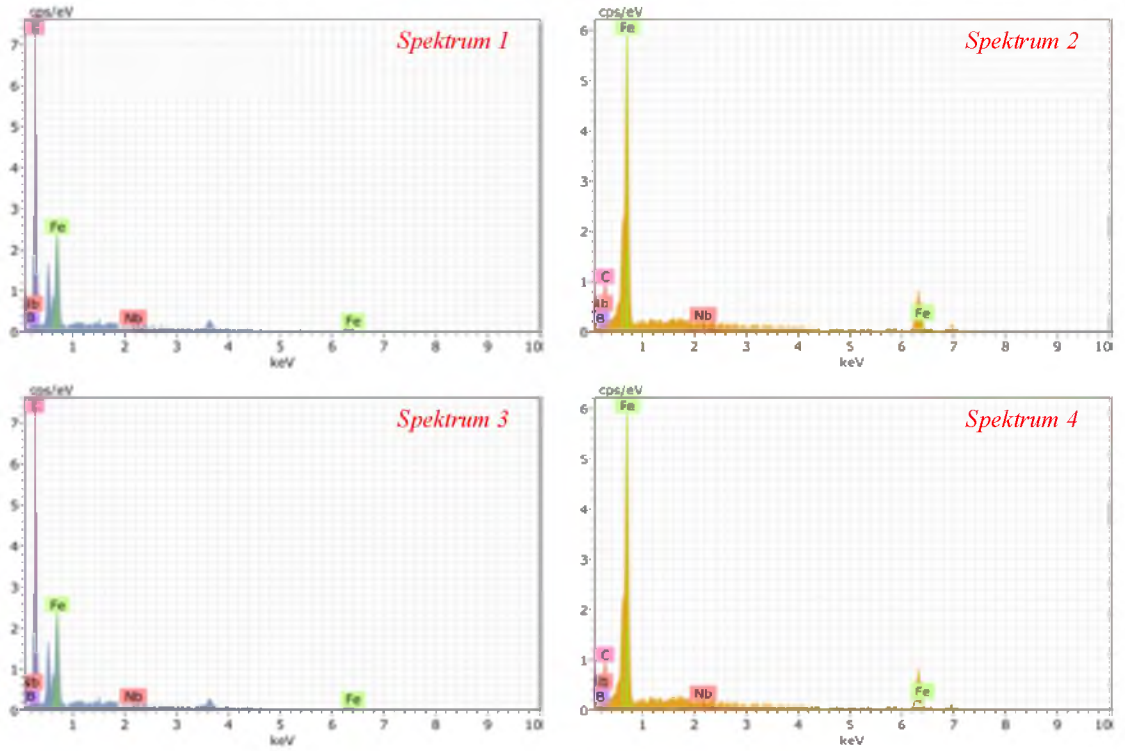
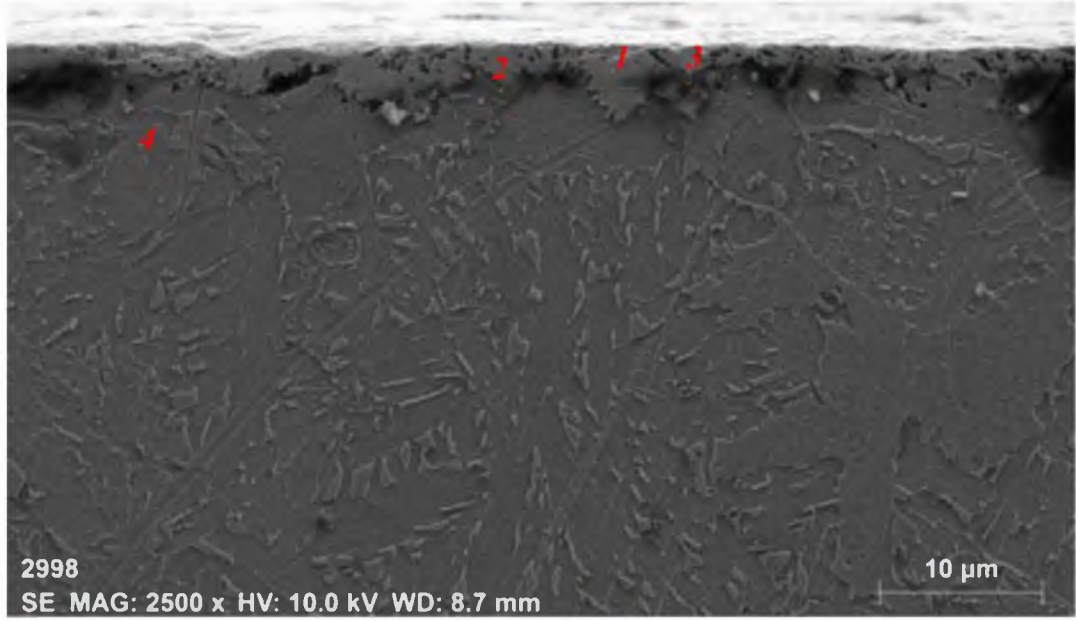
Spektrum	B	C	Fe	Nb
1	10,24	89,51	0,25	0
2	9,39	45,53	44,61	0,47
3	9,59	89,50	0	0,91
4	5,30	90,52	2,44	1,75



Şekil 5.16. 1000 °C’de 2 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin EDX analizi

Çizelge 5.5. 1000 °C’de 2 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin kütleisel kimyasal bileşim yüzdesi

Spektrum	B	C	Fe	Nb
1	3,46	16,31	16,27	63,95
2	9,24	18,20	17,28	55,28
3	4,74	4,16	91,11	0
4	2,54	13,71	62,74	21,01

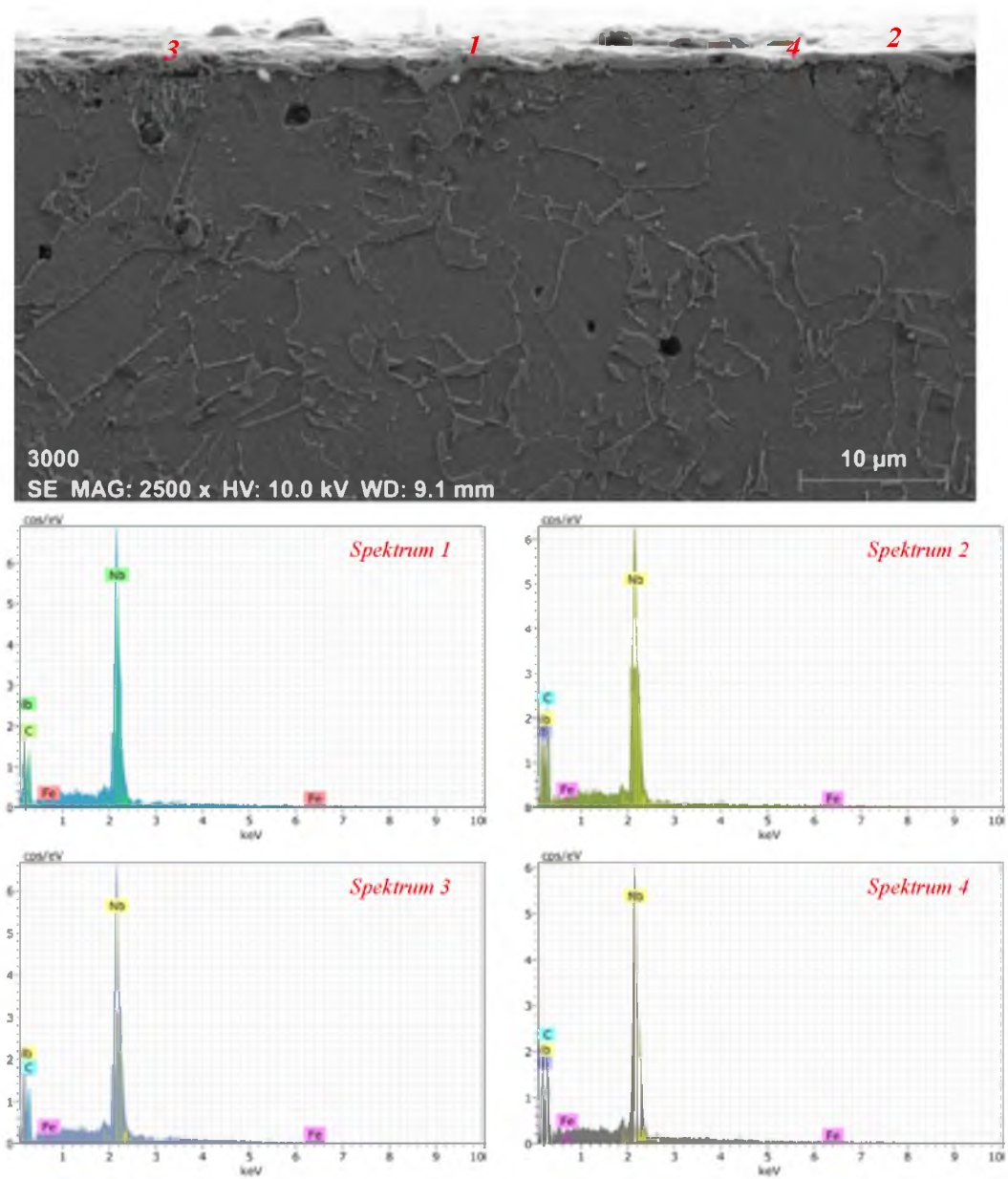


Şekil 5.17. 1000 °C’de 3 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin EDX analizi

Çizelge 5.6. 1000 °C’de 3 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin kütlelesel kimyasal bileşim yüzdesi

Spektrum	B	C	Fe	Nb
1	4,91	19,04	10,47	65,58
2	11,32	56,83	31,42	0,43
3	7,65	72,83	19,03	0,49
4	7,66	14,06	78,28	0,00

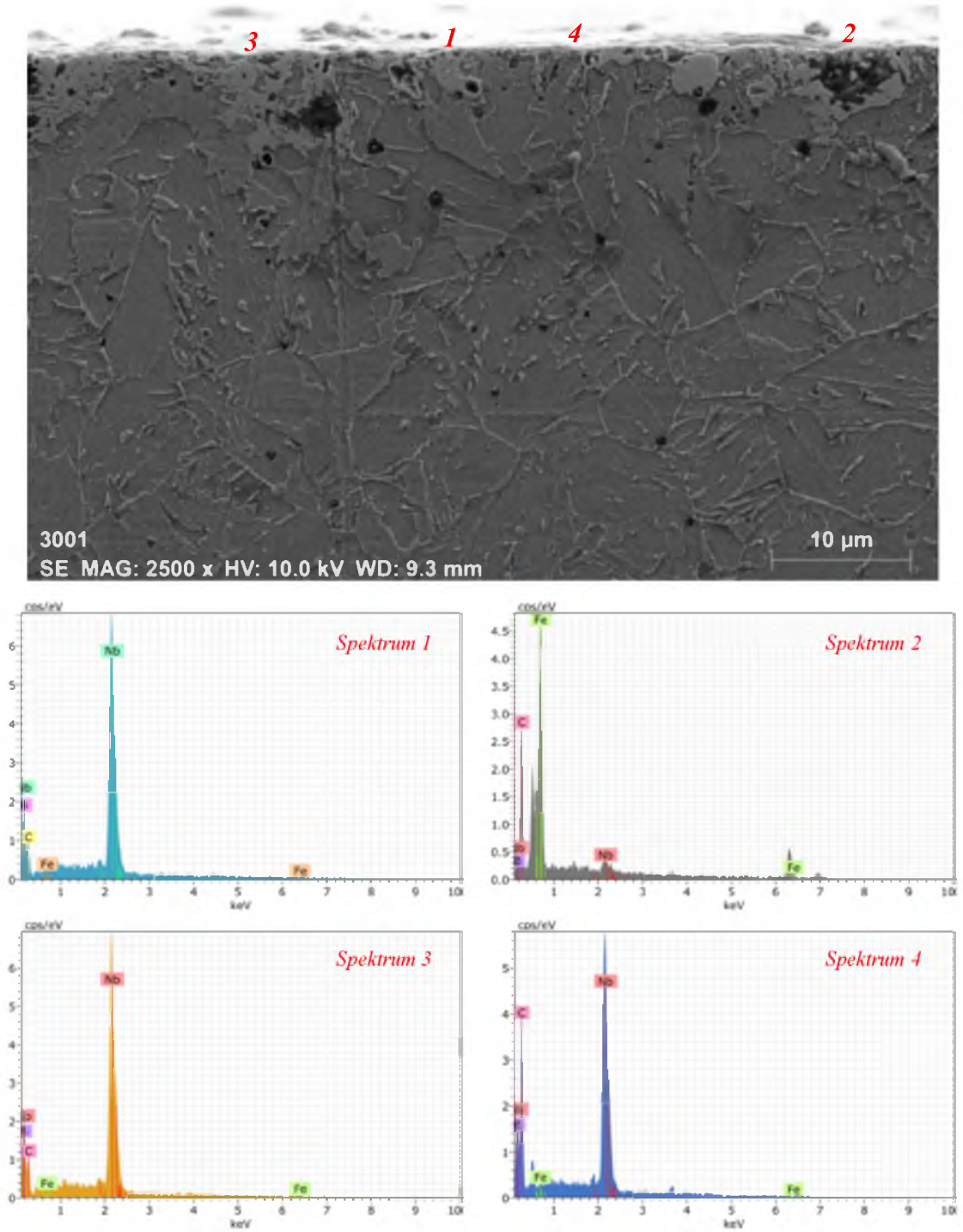
1050 °C’de, 1, 2 ve 3 saat boyunca kaplanan numunelerin farklı noktalarından elde edilen EDX analiz grafikleri sırasıyla Şekil 5.18–Şekil 5.20’de ve onların spektrum değerleri için elde edilen kimyasal elementlerin kütlelesel yüzdesi ise sırasıyla Çizelge 5.7–Çizelge 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.18. 1050 °C’de 1 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin EDX analizi

Çizelge 5.7. 1050 °C’de 1 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin kütlelesel kimyasal bileşim yüzdesi

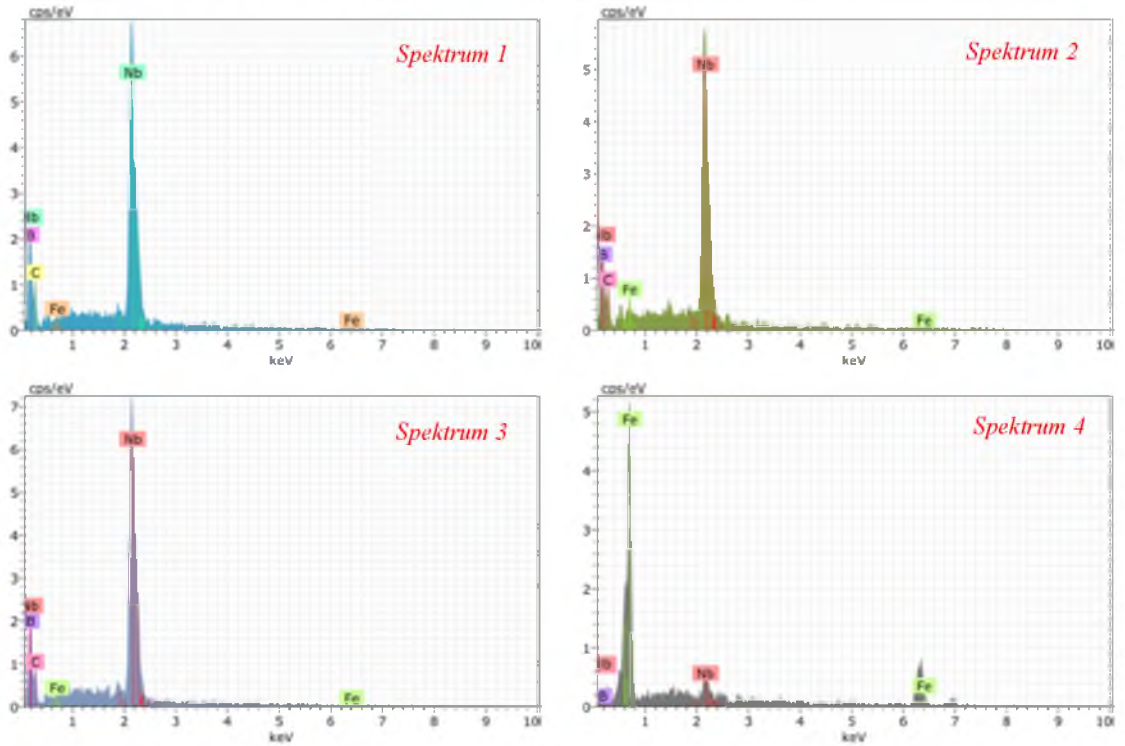
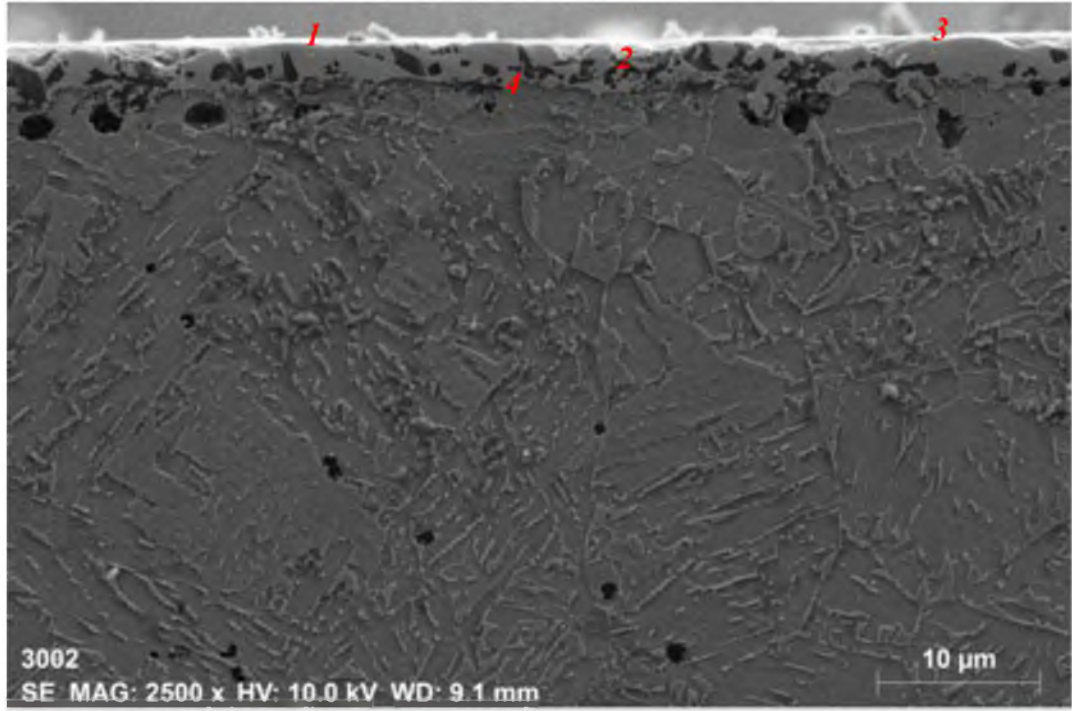
Spektrum	B	C	Fe	Nb
1	8,73	18,47	0,42	72,37
2	7,61	28,68	1,07	62,64
3	3,44	19,31	2,48	74,76
4	6,84	27,20	1,10	64,86



Şekil 5.19. 1050 °C’de 2 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin EDX analizi

Çizelge 5.8. 1050 °C’de 2 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin kütlelesel kimyasal bileşim yüzdesi

Spektrum	B	C	Fe	Nb
1	5,84	14,79	0	79,37
2	13	37,88	46,56	2,55
3	8,21	15,72	3,59	72,48
4	7,07	39,35	0	53,57

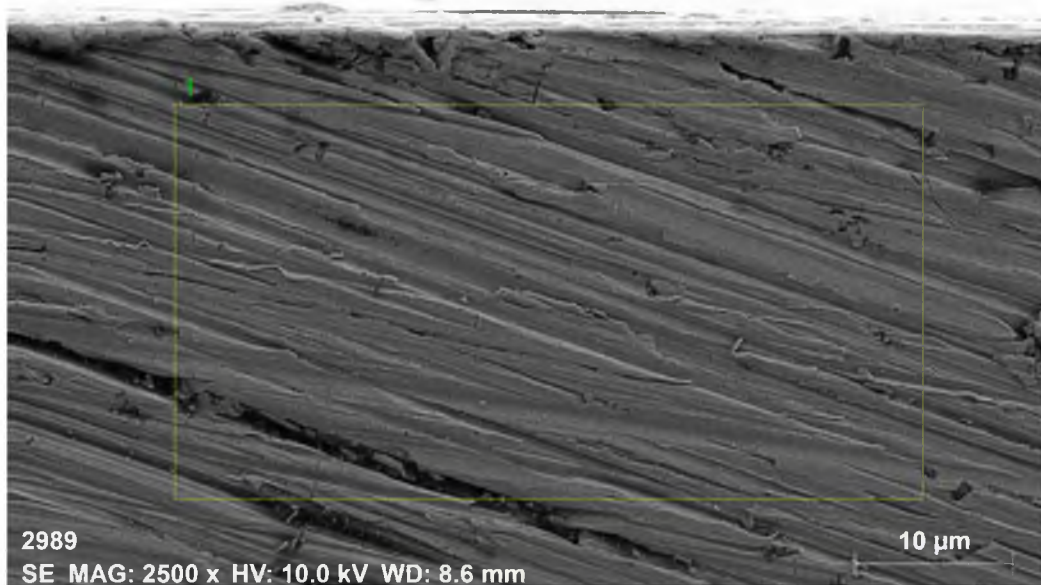


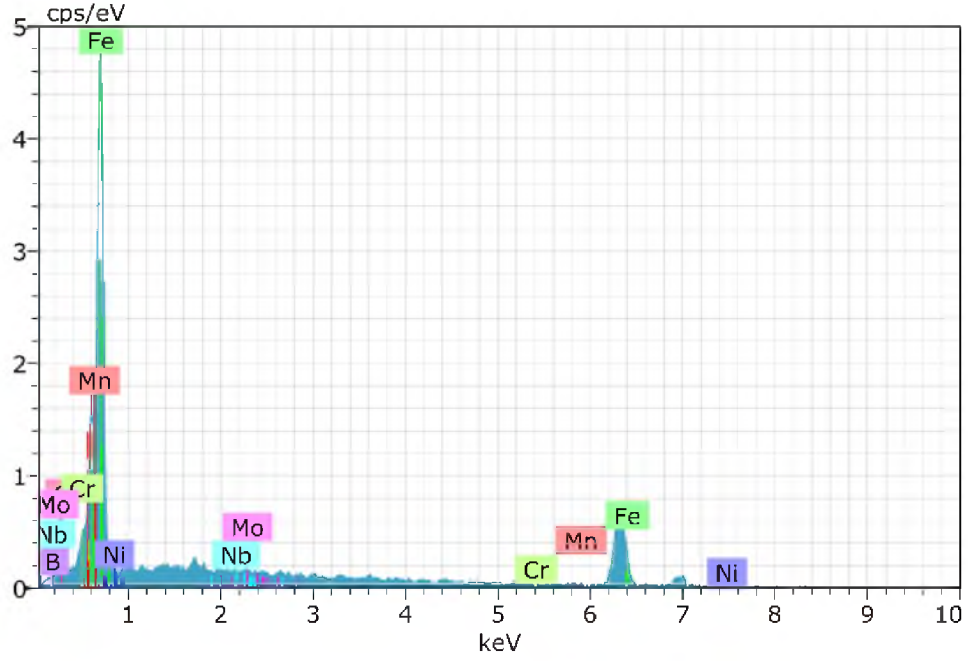
Şekil 5.20. 1050 °C’de 3 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin EDX analizi

Çizelge 5.9. 1050 °C’de 3 saat süreyle kaplanan Hardox 400 çeliğinin kütleli kimyasal bileşim yüzdesi

Spektrum	B	C	Fe	Nb
1	6,16	15,60	1,23	77,01
2	0,33	14,47	0	85,21
3	6,37	13,38	0,13	80,12
4	0	3,99	89,18	6,83

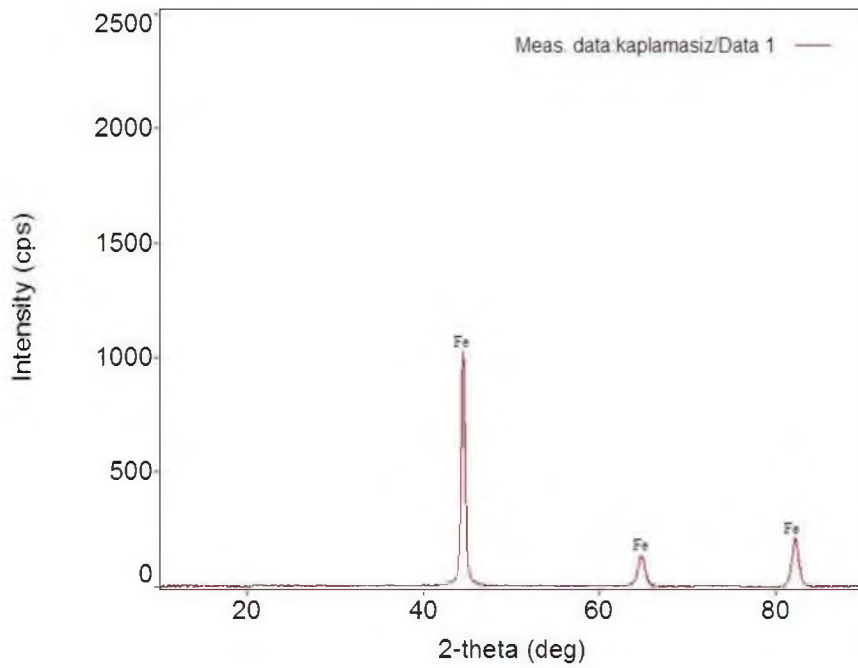
Özellikle 1050 °C’de, 1, 2 ve 3 saat süreyle kaplanan yüzeylerdeki Nb, B ve C elementlerinin diğer kaplama sıcaklıklarından daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Tüm kaplama sıcaklıkları ve süreleri göz önünde bulundurulduğu zaman kaplama yüzeylerinde B, C, Fe ve Nb elementlerinden başka element gözlemlenmemiştir. Ancak bazı spektrum değerleri için bu elementlerden bazıları sıfır olarak ölçülmüştür. Bu durum spektrum ölçüm esnasında, söz konusu elementlerin noktasal ortamda bulunmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca EDX analizlerinde, matrise doğru gidildikçe B, C ve Nb oranının azaldığı ve Fe oranının arttığı da görülmüştür. Buna ilaveten Nb değerinin yüksek olduğu yerlerde, Fe değerinin düşük olduğuna da şahit olunmuştur. Kaplama yüzeyine ve kaplama difüzyon bölgesine, Şekil 5.21’de SEM görüntüsünden spektrum alanı belirlenerek Şekil 5.22’de EDX analizi verilen Hardox 400 çeliğinde bulunan kimyasal bileşenlerden Cr, Mn, Mo ve Ni elementlerinin difüzyon yolu ile geçmediği de görülmüştür. Kurt ve arkadaşları (2020), yaptığımız çalışmaya paralel olarak kaplama yüzeyinde oluşturulan TiBC fazının kimyasal element analizinde, yapıda faz elementleri ile birlikte Fe elementlerinin mevcut olduğunu gözlemlemişlerdir.

**Şekil 5.21.** Kaplanmamış Hardox 400 çeliğinin SEM görüntüsü ve spektrum alanı



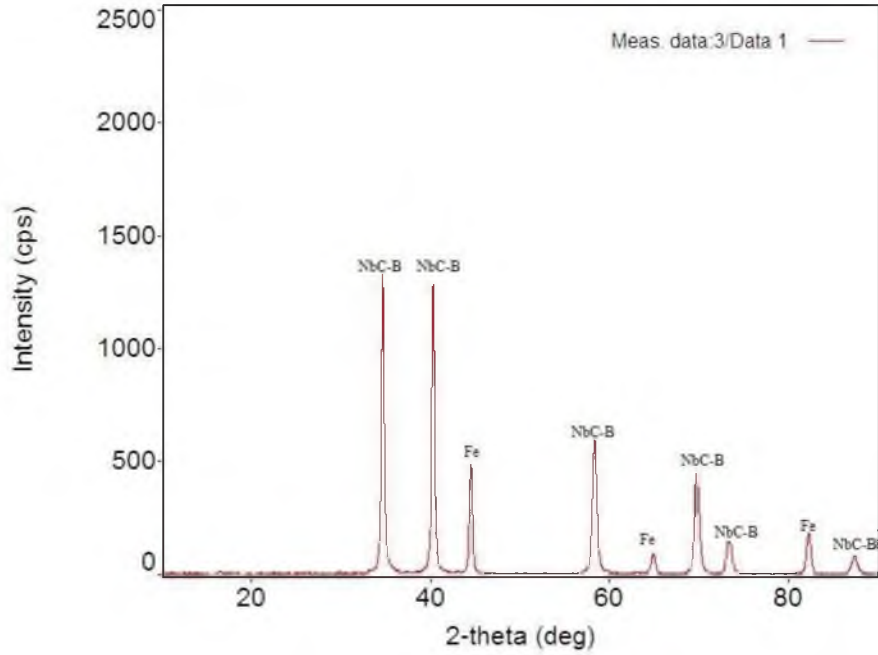
Şekil 5.22. Kaplanmamış Hardox 400 çeliğinin EDX analizi

EDX analizleri ile kaplanmış yüzeylerdeki elementlerin oluşturduğu fazları tespit etmek için kaplanmış numuneler XRD analizine tabi tutulmuştur. Kaplanmamış Hardox 400 çeliği ile 950 °C, 1000 °C ve 1050 °C’de 3 saat süreyle kaplanmış Hardox 400 çeliklerinin XRD sonuçları sırasıyla Şekil 5.23–Şekil 5.26’da verilmiştir.

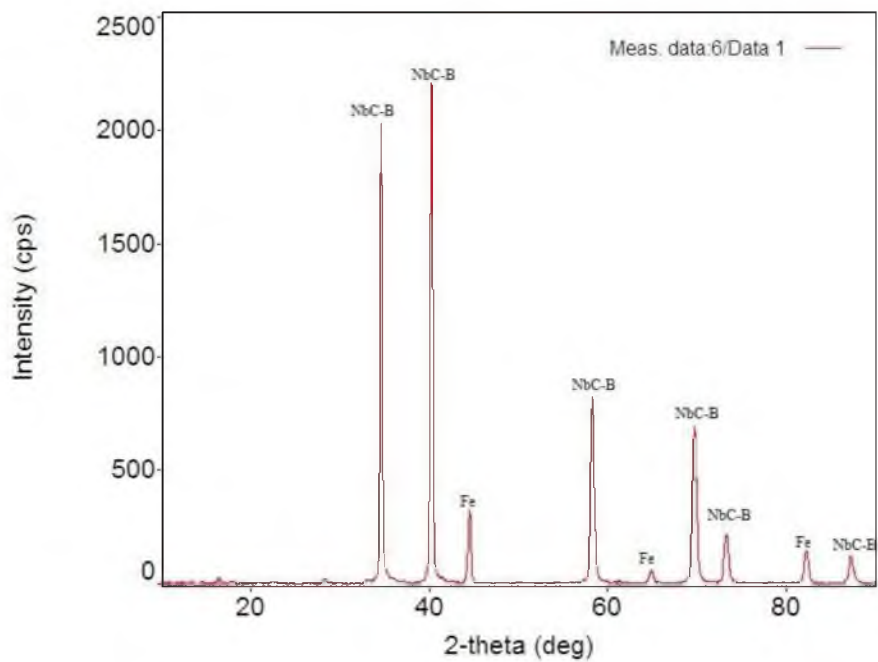


Şekil 5.23. Kaplanmamış Hardox 400 çeliğinin XRD analizi

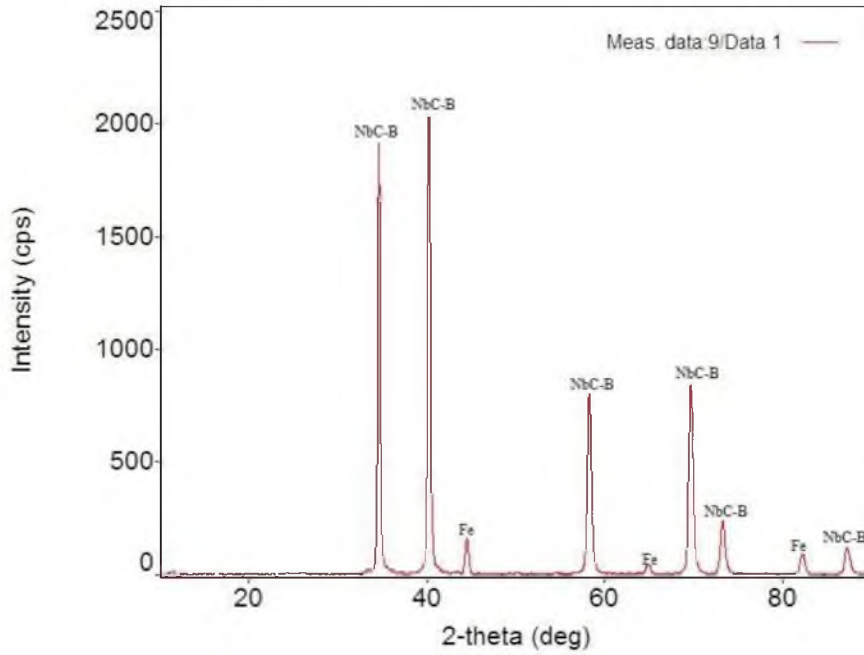
Şekil 5.23'deki kaplanmamış Hardox 400 çeliğinin XRD analizi incelendiğinde, yapının yüksek oranda Fe içeren fazlardan oluştuğu görülmektedir. Şekil 5.24–Şekil 5.26'daki kaplanmış Hardox 400 çeliğinin XRD analizi incelendiğinde ise kaplama tabakası yüzeylerinde Niyobyum Karbür–Bor (NbC-B) ve Fe içeren fazlarının elde edildiği görülmüştür. Ancak kaplama sıcaklık parametresine bağlı olarak bu fazlar değişmiştir. Artan kaplama sıcaklığı ile Fe içeren fazda azalma, NbC-B fazında ise artma gözlemlenmiştir.



Şekil 5.24. 950 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile kaplanmış Hardox 400 çeliğinin XRD analizi



Şekil 5.25. 1000 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile kaplanmış Hardox 400 çeliğinin XRD analizi



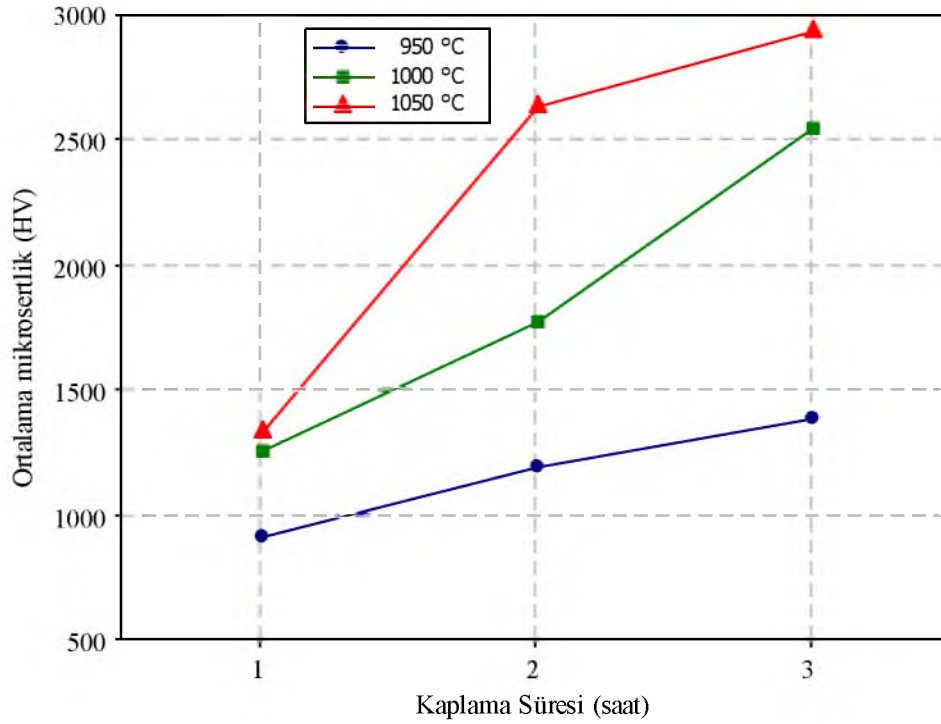
Şekil 5.26. 1050 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile kaplanmış Hardox 400 çeliğinin XRD analizi

5.3. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

Farklı sıcaklık ve sürelerde kaplanan numunelerde, sertlik değişiminin tespiti için kaplama tabakası yüzeyinin beş farklı noktasından Vickers cinsinden sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Elde edilen mikrosertlik ölçümlerinin ortalaması alınarak, ortalama mikrosertlik değeri hesaplanmıştır. Ölçülen ve hesaplanan mikrosertlik değerleri Çizelge 5.10’da verilmiştir. Ortalama mikrosertlik değerinin kaplama sıcaklığı ve süresine bağlı değişimi ise Şekil 5.27’de verilmiştir.

Çizelge 5.10. Kaplama tabakaları için elde edilen mikrosertlik değerleri

Kaplama Sıcaklığı (°C)	Kaplama Süresi (saat)	Mikrosertlik (HV)					
		1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	4. Ölçüm	5. Ölçüm	Ort.
950	1	944	901	1135	846	747	914,6
	2	754	1595	1407	998	1221	1195,0
	3	1168	1256	1354	1765	1359	1380,4
1000	1	1231	1225	1202	1298	1313	1253,8
	2	1747	1607	1991	1698	1821	1772,8
	3	2112	3103	2666	2249	2609	2547,8
1050	1	1219	1211	1873	1000	1364	1333,4
	2	3144	3451	1758	2041	2785	2635,8
	3	3567	2609	2335	3219	2941	2934,2



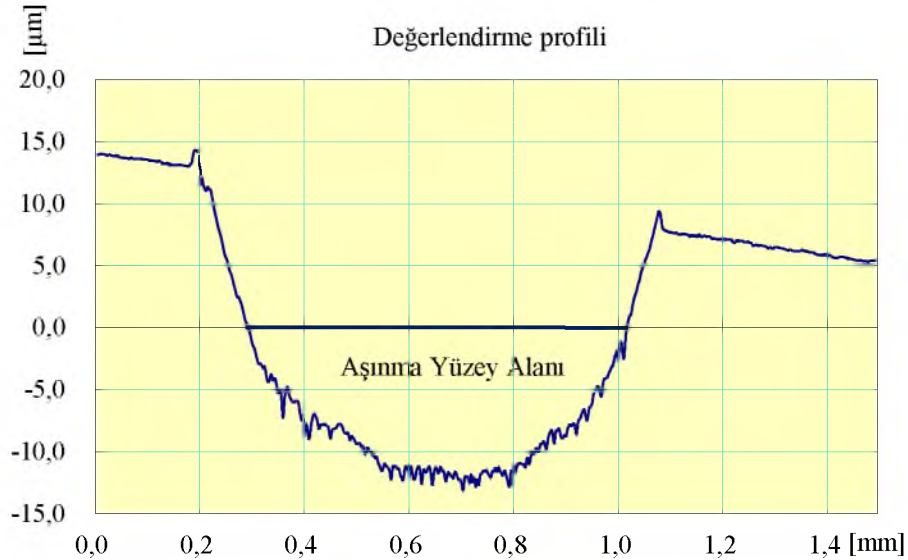
Şekil 5.27. Ortalama mikrosertliğin kaplama sıcaklığı ve süresi ile değişimi

Şekil 5.27’de görüldüğü üzere kaplama sıcaklığı ve süresi arttıkça, numunelerin sertliği de artmıştır. Minimum sertlik, 950 °C kaplama sıcaklığı ile 1 saat süreyle kaplanan numunelerde 914,6 HV olarak hesaplanırken, maksimum sertlik ise 1050 °C kaplama sıcaklığı ile 3 saat süreyle kaplanan numunelerde 2934,2 HV olarak hesaplanmıştır. Kaplamasız Hardox 400 çeliğinin 420 HV olan sertlik değeri göz önünde bulundurulduğunda, bu değer kaplama parametrelerinden elde edilen minimum sertliğin yaklaşık %45,9’u, maksimum sertliğin ise yaklaşık 14,3’ü kadardır. Bu da kaplama parametrelerine bağlı olarak Hardox 400 çeliği yüzüne kaplanan NbC-B’nin sertlik üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. Yapılan literatür çalışmalarında da artan kaplama sıcaklığı ve süresiyle mikrosertlik değerinin arttığı ve kaplama yüzeyinden altlık malzemesine gidildikçe sertlik değerinin kademeli olarak azaldığı belirtilmiştir (Kurt ve arkadaşları, 2018; Günen ve arkadaşları, 2020; Kurt ve arkadaşları, 2020; Mariani ve arkadaşları, 2020; Zong ve arkadaşları, 2020).

5.4. Aşınma Testi Sonuçları

Aşınma testlerine başlamadan önce numunelerin yüzeylerindeki pürüzlülük ölçülmüştür. Bu ölçümlerden sonra farklı kaplama sıcaklıkları ve sürelerinde, TRD

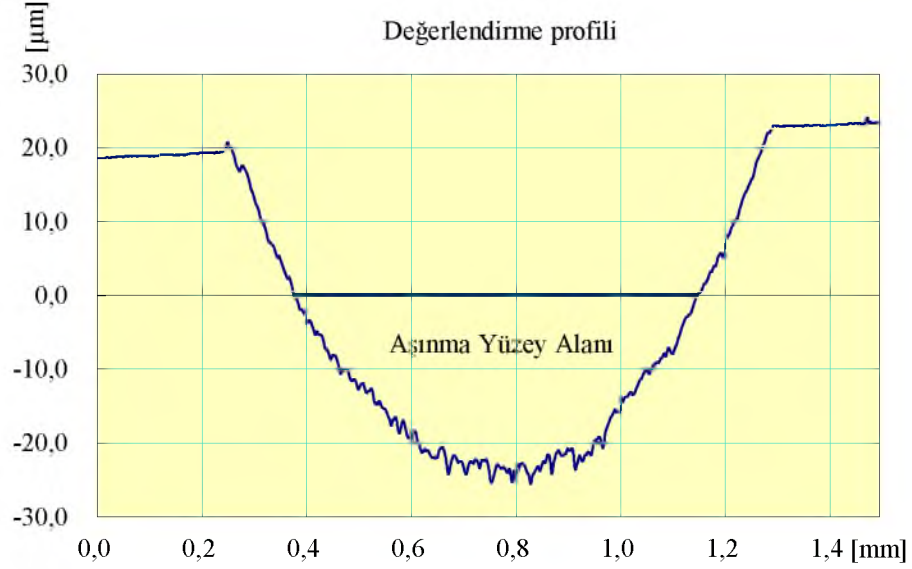
yöntemiyle yüzeyleri NbC-B kaplanan Hardox 400 çeliklerinin aşınmaya karşı dirençlerini belirlemek için Taguchi yönteminin L9 ortogonal dizi tasarımına göre adhezif aşınma testleri yapılmıştır. Deney sonuçlarında, aşınma izi yüzey profilleri grafikleriyle beraber elde edilmiştir. Yüzey profillerinin üç farklı noktasından yüzey alanı ölçülmüştür. Aşınma deneylerine başlamadan önceki yüzey pürüzlülük profili ile aşınma sonrası oluşan aşınma izi profili eliminize edilerek net aşınma yüzey alanı hesaplanmıştır. Hesaplanan yüzey alanı strok mesafesiyle çarpılarak her bir nokta için aşınma hacmi hesaplanmıştır. Üç noktadan hesaplanan aşınma hacimlerinin ortalaması alınarak ortalama aşınma hacmi belirlenmiştir. Taguchi L9 ortogonal dizi tasarımına göre aşınma testleri yapılan kaplanmış numunelerin aşınma izi profilleri Şekil 5.28–Şekil 5.36’te, aşınma hacmi ve değerleri ise Çizelge 5.11–Çizelge 5.19’da verilmiştir.



Şekil 5.28. 950 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 5 N’luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili

Çizelge 5.11. 950 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 5 N’luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri

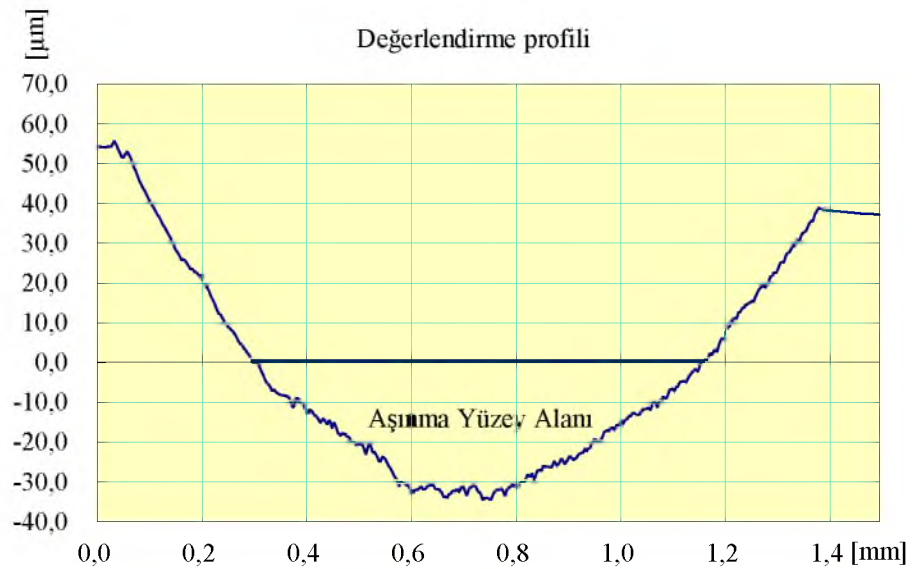
1. NUMUNE		YÜZEY ALANI (mm ²)		
		1.Ölçüm (mm ²)	2.Ölçüm (mm ²)	3.Ölçüm (mm ²)
Yük Miktarı	5 N			
Strok Mesafesi	5 mm	0,013	0,014	0,013
Aşınma Hacmi		0,065	0,070	0,065
ORTALAMA AŞINMA HACMİ (mm³)				
		0,06666667 mm³		



Şekil 5.29. 950 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 10 N'luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili

Çizelge 5.12. 950 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 10 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri

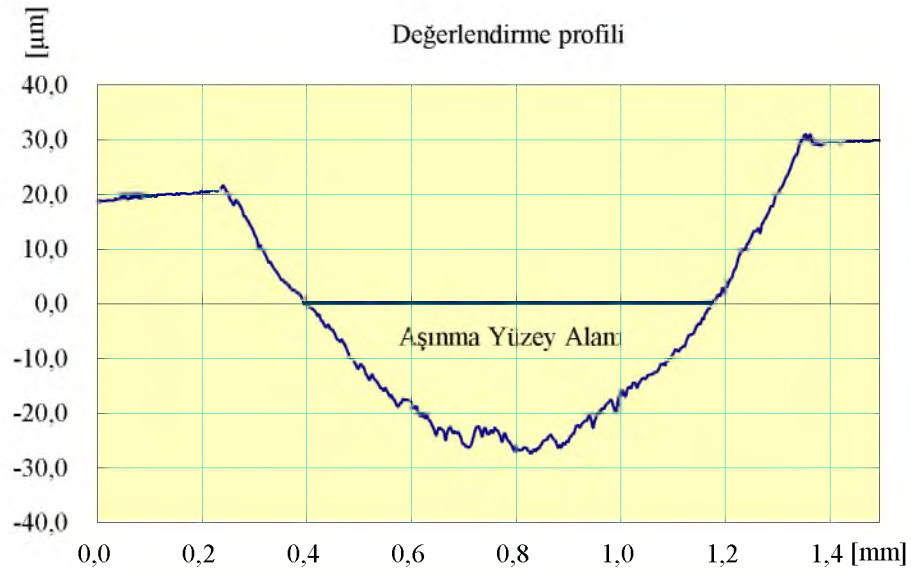
2. NUMUNE		YÜZEY ALANI (mm ²)		
		1.Ölçüm (mm ²)	2.Ölçüm (mm ²)	3.Ölçüm (mm ²)
Yük Miktarı	10 N			
Strok Mesafesi	5 mm	0,029	0,030	0,028
Aşınma Hacmi		0,145	0,150	0,140
ORTALAMA AŞINMA HACMİ (mm ³)				
0,145 mm ³				



Şekil 5.30. 950 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 15 N'luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili

Çizelge 5.13. 950 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 15 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri

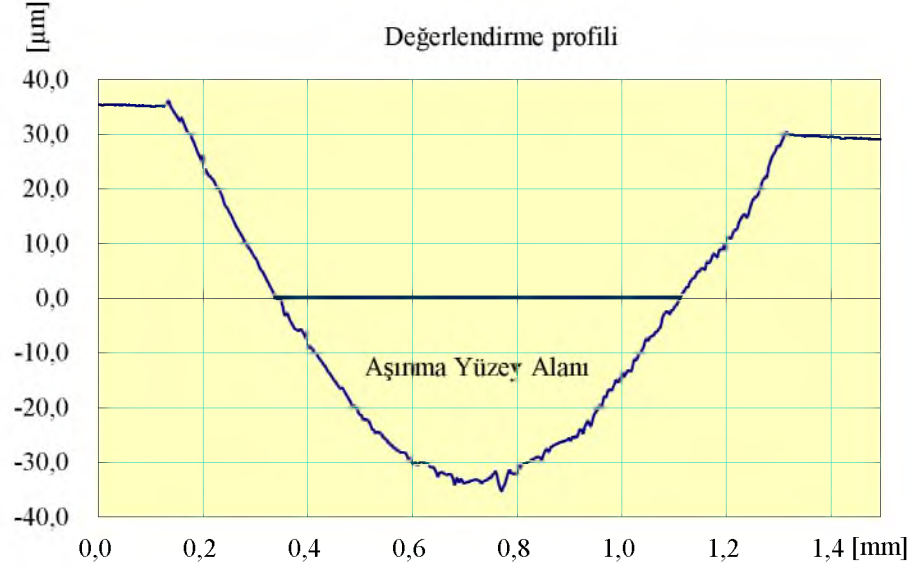
3. NUMUNE		YÜZEY ALANI (mm ²)		
		1.Ölçüm (mm ²)	2.Ölçüm (mm ²)	3.Ölçüm (mm ²)
Yük Miktarı	15 N			
Strok Mesafesi	5 mm	0,065	0,067	0,065
Aşınma Hacmi		0,325	0,335	0,325
ORTALAMA AŞINMA HACMİ (mm ³)				
0,328333333 mm ³				



Şekil 5.31. 1000 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 10 N'luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili

Çizelge 5.14. 1000 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 10 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri

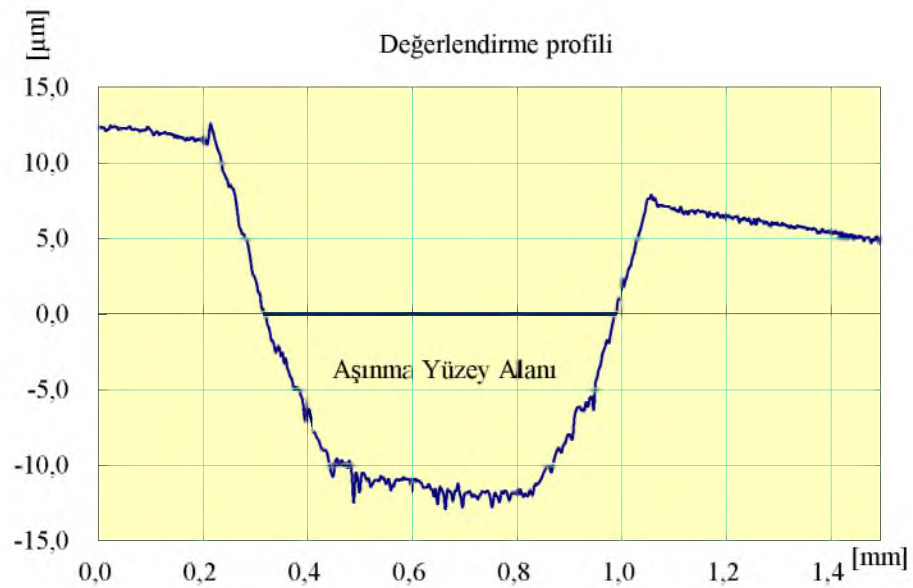
4. NUMUNE		YÜZEY ALANI (mm ²)		
		1.Ölçüm (mm ²)	2.Ölçüm (mm ²)	3.Ölçüm (mm ²)
Yük Miktarı	10 N			
Strok Mesafesi	5 mm	0,035	0,037	0,036
Aşınma Hacmi		0,175	0,185	0,180
ORTALAMA AŞINMA HACMİ (mm ³)				
0,18 mm ³				



Şekil 5.32. 1000 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 15 N'luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili

Çizelge 5.15. 1000 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 15 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri

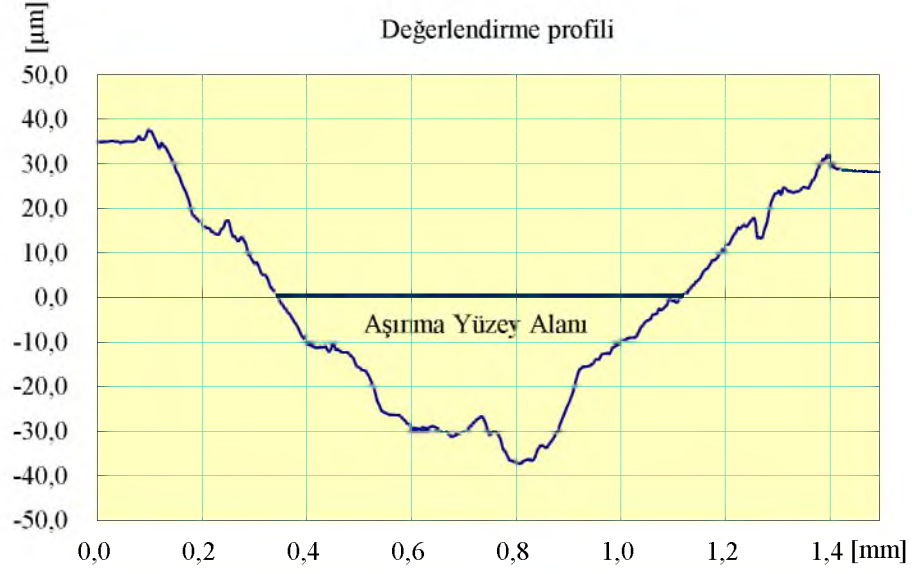
5. NUMUNE		YÜZEY ALANI (mm ²)		
		1.Ölçüm (mm ²)	2.Ölçüm (mm ²)	3.Ölçüm (mm ²)
Yük Miktarı	15 N			
Strok Mesafesi	5 mm	0,045	0,047	0,046
Aşınma Hacmi		0,225	0,235	0,230
ORTALAMA AŞINMA HACMİ (mm ³)				
0,23 mm ³				



Şekil 5.33. 1000 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 5 N'luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili

Çizelge 5.16. 1000 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 5 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri

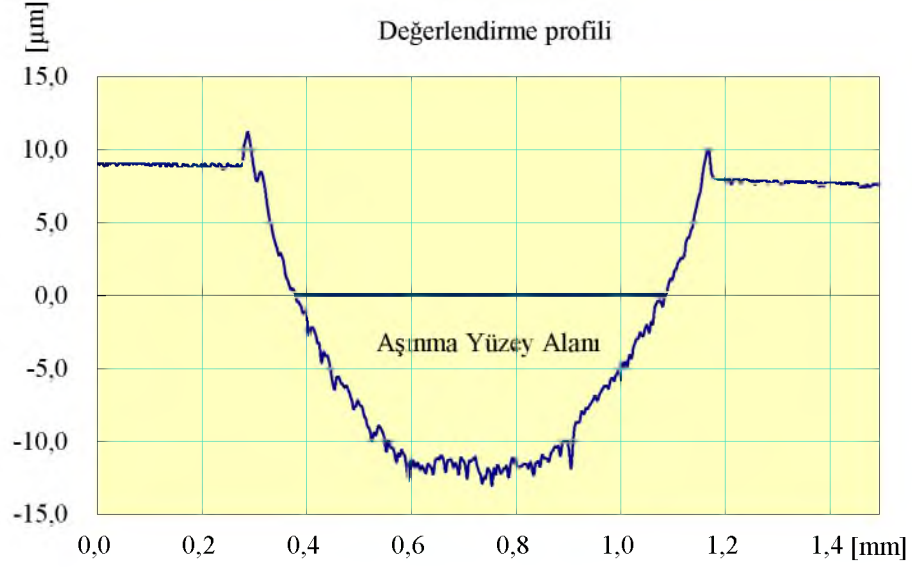
6. NUMUNE		YÜZEY ALANI (mm ²)		
		1.Ölçüm (mm ²)	2.Ölçüm (mm ²)	3.Ölçüm (mm ²)
Yük Miktarı	5 N			
Strok Mesafesi	5 mm	0,013	0,013	0,012
Aşınma Hacmi		0,065	0,065	0,060
ORTALAMA AŞINMA HACMİ (mm ³)				
0,06333333 mm ³				



Şekil 5.34. 1050 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 15 N'luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili

Çizelge 5.17. 1050 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 15 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri

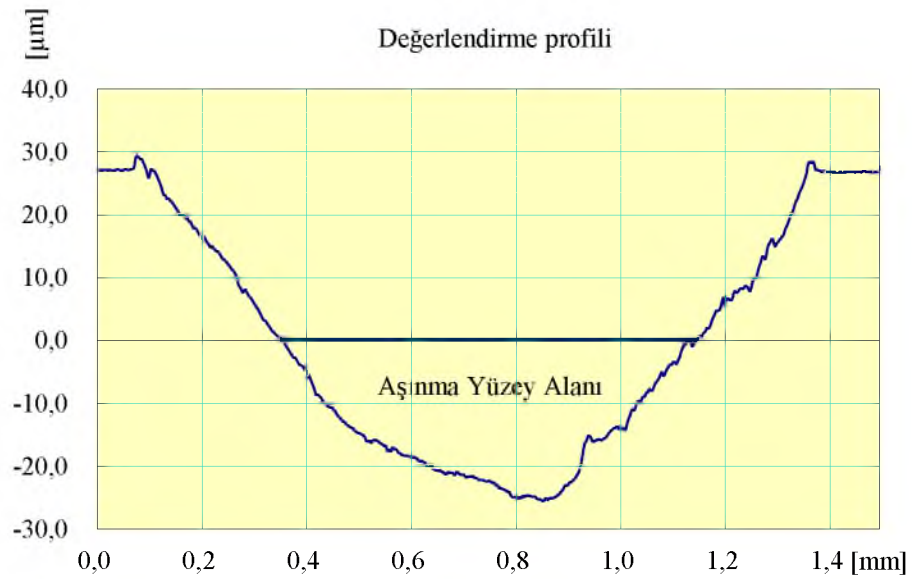
7. NUMUNE		YÜZEY ALANI (mm ²)		
		1.Ölçüm (mm ²)	2.Ölçüm (mm ²)	3.Ölçüm (mm ²)
Yük Miktarı	15 N			
Strok Mesafesi	5 mm	0,049	0,042	0,036
Aşınma Hacmi		0,245	0,210	0,180
ORTALAMA AŞINMA HACMİ (mm ³)				
0,211666667 mm ³				



Şekil 5.35. 1050 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 5 N'luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili

Çizelge 5.18. 1050 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 5 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri

8. NUMUNE		YÜZEY ALANI (mm ²)		
		1.Ölçüm (mm ²)	2.Ölçüm (mm ²)	3.Ölçüm (mm ²)
Yük Miktarı	5 N			
Strok Mesafesi	5 mm	0,013	0,012	0,013
Aşınma Hacmi		0,065	0,060	0,065
ORTALAMA AŞINMA HACMİ (mm³)				
0,06333333 mm³				

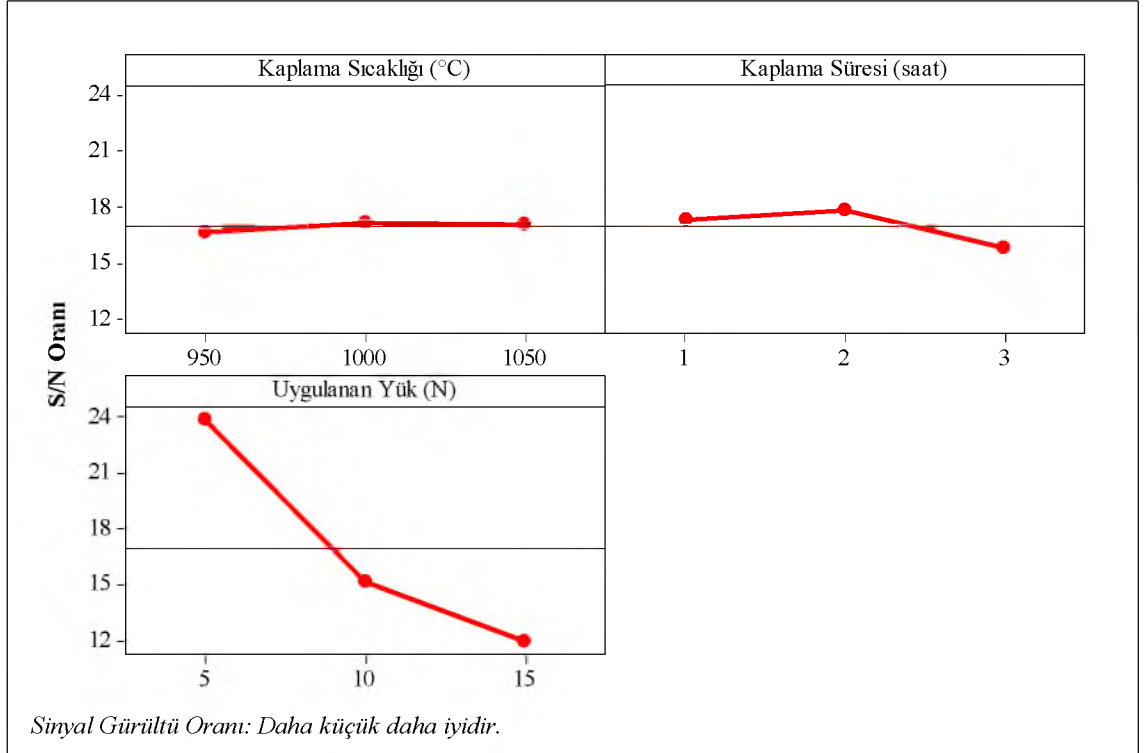


Şekil 5.36. 1050 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 10 N'luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili

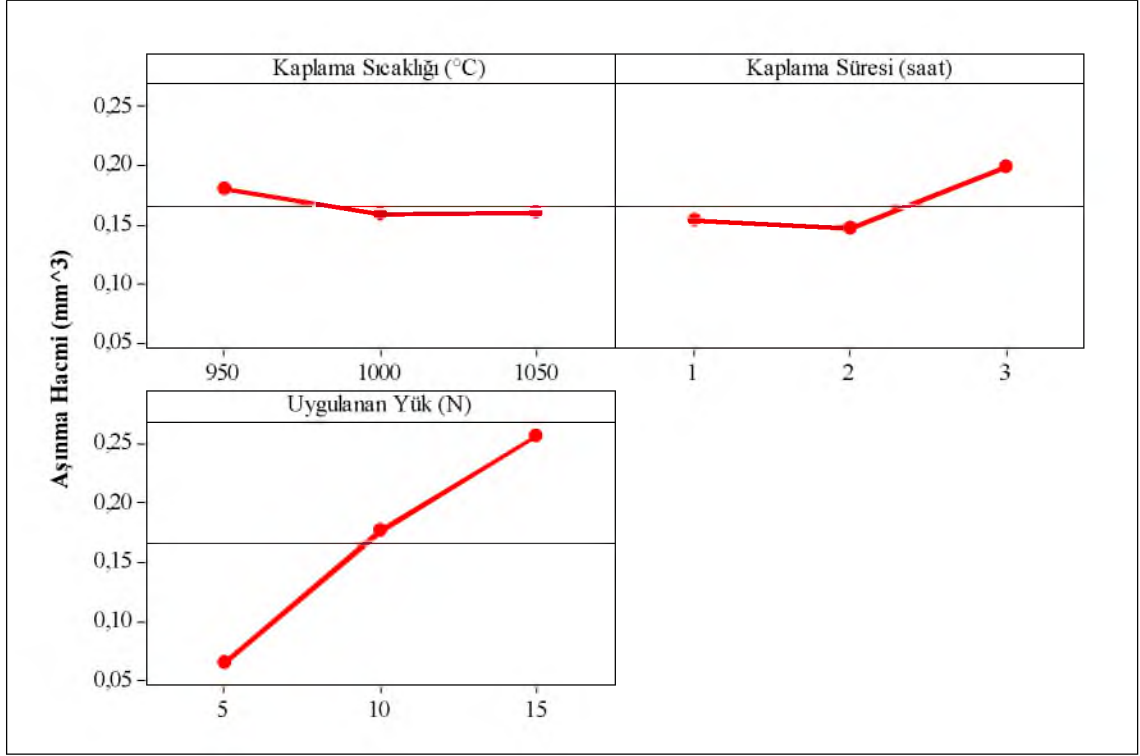
Çizelge 5.19. 1050 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile NbC-B kaplanmış Hardox 400 çeliğinin 10 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri

9. NUMUNE		YÜZEY ALANI (mm ²)		
		1.Ölçüm (mm ²)	2.Ölçüm (mm ²)	3.Ölçüm (mm ²)
Yük Miktarı	10 N			
Strok Mesafesi	5 mm	0,039	0,043	0,041
Aşınma Hacmi		0,195	0,215	0,205
ORTALAMA AŞINMA HACMI (mm ³)				
0,205 mm ³				

Farklı sıcak ve sürelerde kaplanan numunelerin 5, 10 ve 15 N'luk yük altındaki aşınma analizini ayrıntılı olarak yapabilmek için adhezif aşınma sonuçlarından elde edilen ortalama aşınma hacimleri Taguchi yöntemiyle irdelenmiştir. Analizlerde, aşınma hacmi için S/N, **daha küçük daha iyidir** olacak şekilde seçilmiştir. Taguchi yöntemi; kaplama sıcaklığı, kaplama süresi ve uygulanan yüke bağlı olarak aşınma hacmi için S/N oranını Şekil 5.37'deki gibi, aşınma hacmi grafiğini ise Şekil 5.38'deki gibi üretmiştir. Şekil 5.39 ve Şekil 5.40'ta ise sırasıyla S/N artık ve normal dağılım grafiği ile aşınma hacmi artık ve normal dağılım grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 5.37. Aşınma hacmi S/N grafiği

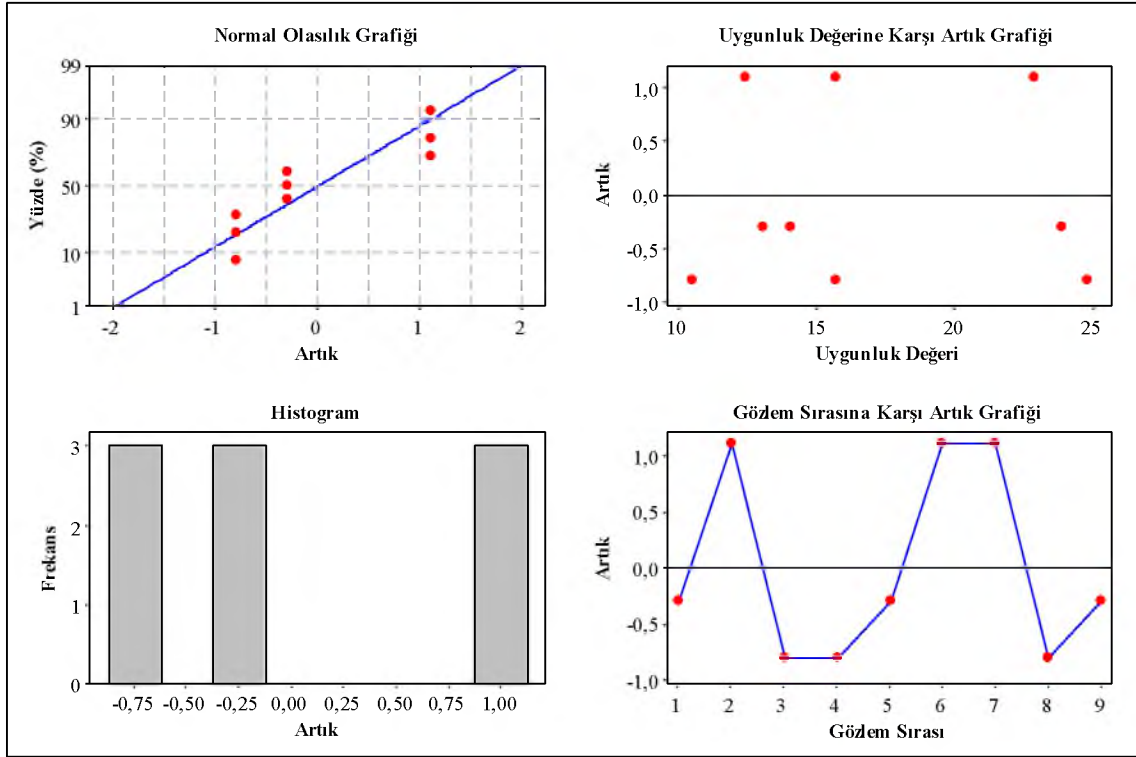


Şekil 5.38. Kaplama sıcaklığı ve süresi ile uygulanan yüke bağlı aşınma hacmi

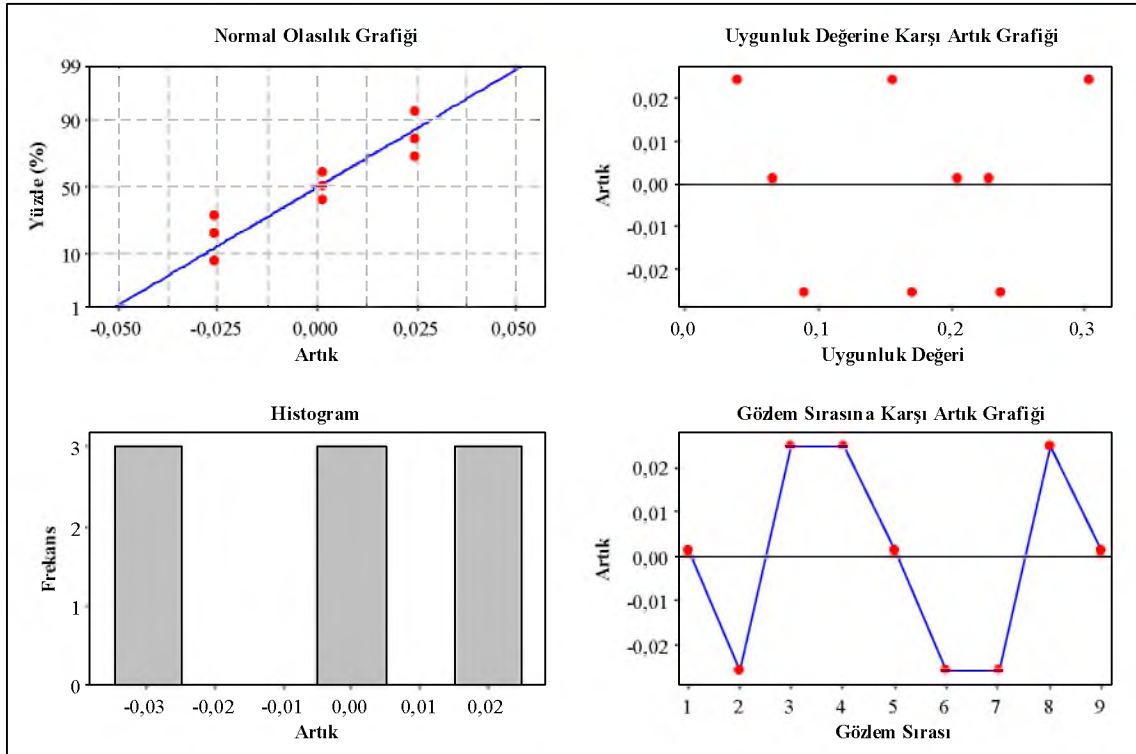
Şekil 5.38'deki grafik Şekil 5.37'deki S/N grafiğinin simetrisi şekilde elde edilmiştir. Şekil 5.38'de görüldüğü gibi kaplanmış Hardox 400 çeliklerinin aşınma deneylerinde, aşınma hacminin kaplama sıcaklığının 950 °C'den 1000 °C'ye çıkmasıyla azaldığı, 1000 °C'den 1050 °C'ye çıkmasıyla çok az da olsa artmaya başladığı görülmektedir. Benzer durum kaplama süresi için de söz konusudur. Kaplama süresinin bir saatten iki saate çıkmasıyla aşınma hacmi kısmen azalmış, ancak kaplama süresinin iki saatten üç saate çıkmasıyla aşınma hacmi ani olarak artmıştır. Taguchi yöntemine göre 1000 °C'de 2 saat süreyle kaplanan numunenin 5 N'luk yük altındaki aşınması minimum, 950 °C'de 3 saat süreyle kaplanan numunenin 15 N'luk yük altındaki aşınması maksimumdur. Minimum ve maksimum aşınma hacimleri yaklaşık 0,063 mm³ ve 0,328 mm³'tür.

Şekil 5.39'da S/N için verilen hata bileşen veya diğer adıyla artık grafiklerine bakıldığı zaman normal olasılık grafiğindeki artık veya hata değerlerinin doğrunun etrafında toplanmaları, normallik ön şartını sağladığını göstermiştir. Bu olasılıktaki artık değerlerin sıklığı, histogram grafiğinde görülmektedir. Yaklaşık -0,75, -0,25 ve 1 değerlerinin her birinde üçer tane olmak üzere toplam deney sayısı kadar artık değer oluşmuştur. Uygunluk değerine karşı artık değerine bakıldığında, söz konusu dokuz artık

değeri uygunluk sınırındadır. Son olarak artık değerlerinin gözlem sırasına göre değişimi ise gözlem sırasına karşı artık grafiğindeki gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.39. Aşınma hacmi S/N grafiği için hata bileşen (artık) grafikleri



Şekil 5.40. Kaplama sıcaklığı ve süresi ile uygulanan yüke bağlı aşınma hacminin hata bileşen (artık) grafikleri

Şekil 5.40'ta aşınma hacminin hata bileşen (artık) grafiklerine bakıldığı zaman, Şekil 5.39'daki S/N grafiğinininki gibi normal olasılık grafiğindeki artık veya hata değerlerinin doğrunun etrafında toplandığı, bu olasılıktaki artık değerlerin sıklığı, histogram grafiğinde görülmektedir. Yaklaşık -0,03, 0 ve 0,2 değerlerinin her birinde üçer tane olmak üzere toplam dokuz artık değer oluşmuştur ve bu artık değerlerinin gözlem sırasına göre değişimi yanındaki grafikte gösterilmiştir.

Taguchi yöntemi, aşınma hacminin modellenmesi için tahmin edilen model katsayılarını, ANOVA analizlerini ve aşınma parametrelerinin etki sıralamasını da üretmiştir. Üretilen bu değerler sırasıyla Çizelge 5.20–Çizelge 5.22'de verilmiştir.

Çizelge 5.20. Aşınma hacminin tahmin edilen model katsayıları

<i>Terim</i>	<i>Katsayı</i>	<i>Standart Hata Katsayısı</i>	<i>T</i>	<i>P</i>
Sabitler	0,165926	0,01461	11,358	0,008
Kaplama Sıcaklığı 950 °C	0,014074	0,02066	0,681	0,566
Kaplama Sıcaklığı 1000 °C	-0,008148	0,02066	-0,394	0,731
Kaplama Süresi 1 Saat	-0,013148	0,02066	-0,636	0,590
Kaplama Süresi 2 Saat	-0,019815	0,02066	-0,959	0,439
Uygulanan Yük 5 N	-0,101481	0,02066	-4,912	0,039
Uygulanan Yük 10 N	0,010741	0,02066	0,520	0,655
S = 0,04383 R ² = %94,1 R ² (adj) = %76,6				

Çizelge 5.21. Aşınma hacminin ANOVA sonuçları

<i>Kaynak</i>	<i>Serbestlik Derecesi</i>	<i>Kareler Toplamı (SS)</i>	<i>Düzeltilmiş Kareler Toplamı (Adj SS)</i>	<i>Düzeltilmiş Ortalama Kareler Toplamı (Adj MS)</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Kaplama Sıcaklığı (°C)	2	0,000899	0,000899	0,000449	0,23	0,810
Kaplama Süresi (saat)	2	0,004956	0,004956	0,002478	1,29	0,437
Uygulanan Yük (N)	2	0,055943	0,055943	0,027972	14,56	0,064
Artık hata	2	0,003841	0,003841	0,001921		
Toplam	8	0,065640				

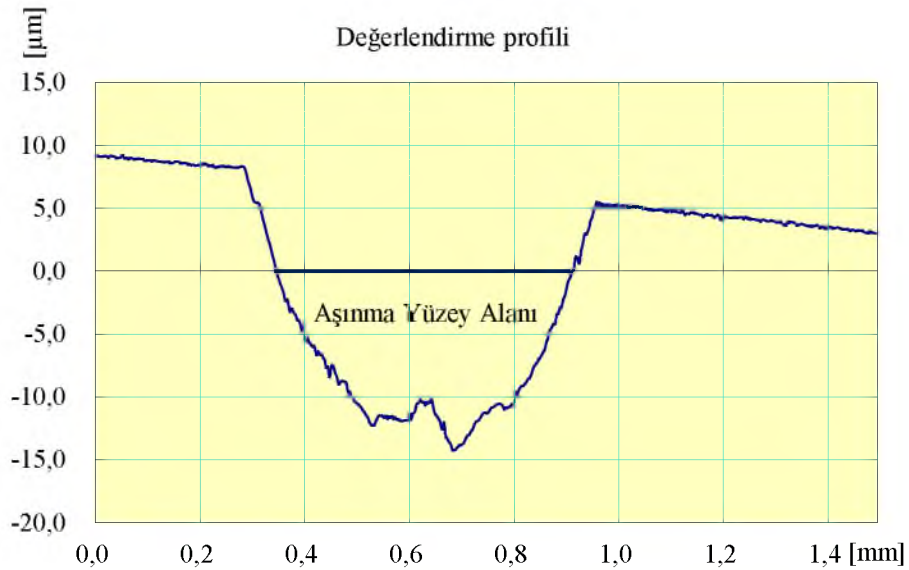
Çizelge 5.22. Aşınma parametrelerinin hacimsel aşınma üzerindeki etki sıralaması

<i>Seviye</i>	<i>Kaplama Sıcaklığı (°C)</i>	<i>Kaplama Süresi (Saat)</i>	<i>Uygulanan Yük (N)</i>
1	0,18000	0,15278	0,06444
2	0,15778	0,14611	0,17667
3	0,16000	0,19889	0,25667
Delta	0,02222	0,05278	0,19222
Etki sıralaması	3	2	1

Çizelge 5.20’de verilen regresyon katsayısı, bir yordayıcı ile yanıt değişkeni arasındaki ilişkinin boyutunu ve yönünü tanımlamaktadır. Ayrıca regresyon denkleminin üretilmesinde de kullanılmaktadır. Katsayının standart hatası, aynı popülasyondan tekrar tekrar alınan örneklerden elde edilen katsayı tahminleri arasındaki değişkenliği tahmin eder. Hesaplama, örneklem büyüklüğünün ve tahmin edilecek katsayıların, tekrar tekrar örnekleme yapılacağı zaman aynı kalacağını varsayar. T değeri, katsayı ile standart hata arasındaki oranı ölçmektedir. P değeri ise kanıtı sıfır hipotezine karşı ölçülen bir olasılıktır. P değerinin düşük olduğu durumlarda, sıfır hipotezine karşı daha güçlü kanıt sağlanmış olunur.

Çizelge 5.21’de ise faktörler arasındaki ilişkilere bağlı olarak hesaplanan kareler toplamı ve F-test değerleri verilmiştir. Grup ortalamalarının eşit olup olmadığını belirlemek için F-testini kullanmak, orana doğru varyansları dahil etmekle mümkündür. Bu durumda, F ve P değerlerine bağlı olarak uygulanan yük en yüksek etkiye sahip aşınma parametresidir. Bunu sırasıyla kaplama süresi ve kaplama sıcaklığı takip etmiştir (Çizelge 5.22).

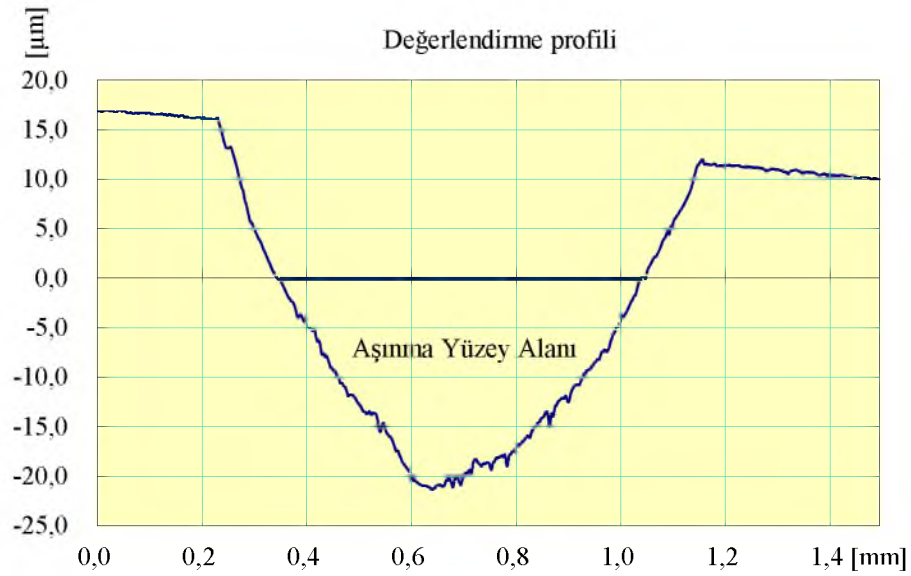
Farklı sıcaklık ve sürelerde kaplanmış Hardox 400 çeliğinde, kaplamanın aşınmaya etkisini analiz edebilmek için kaplanmamış Hardox 400 çeliğinin de 5, 10 ve 15 N’luk uygulama yüklerinde adhezif aşınma testleri yapılmıştır. Kaplanmamış numunelerin adhezif aşınma izi profilleri sırasıyla Şekil 5.41–Şekil 5.43’te, aşınma hacmi ve değerleri ise sırasıyla Çizelge 5.23–Çizelge 5.25’te verilmiştir.



Şekil 5.41. Kaplamasız Hardox 400 çeliğinin 5 N’luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili

Çizelge 5.23. Kaplamasız Hardox 400 çeliğinin 5 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri

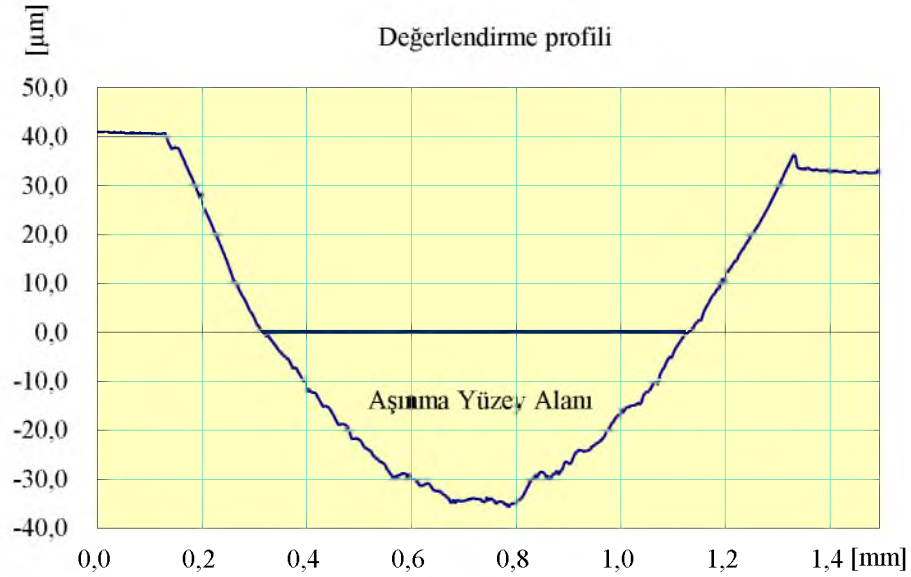
KAPLAMASIZ		YÜZEY ALANI (mm ²)		
		1.Ölçüm (mm ²)	2.Ölçüm (mm ²)	3.Ölçüm (mm ²)
Yük Miktarı	5 N			
Strok Mesafesi	5 mm	0,016	0,016	0,015
Aşınma Hacmi		0,080	0,080	0,075
ORTALAMA AŞINMA HACMI (mm ³)				
0,0783333 mm ³				



Şekil 5.42. Kaplamasız Hardox 400 çeliğinin 10 N'luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili

Çizelge 5.241. Kaplamasız Hardox 400 çeliğinin 10 N'luk yük altındaki aşınma hacmi ve değerleri

KAPLAMASIZ		YÜZEY ALANI (mm ²)		
		1.Ölçüm (mm ²)	2.Ölçüm (mm ²)	3.Ölçüm (mm ²)
Yük Miktarı	10 N			
Strok Mesafesi	5 mm	0,038	0,041	0,039
Aşınma Hacmi		0,190	0,205	0,195
ORTALAMA AŞINMA HACMI (mm ³)				
0,19666667 mm ³				



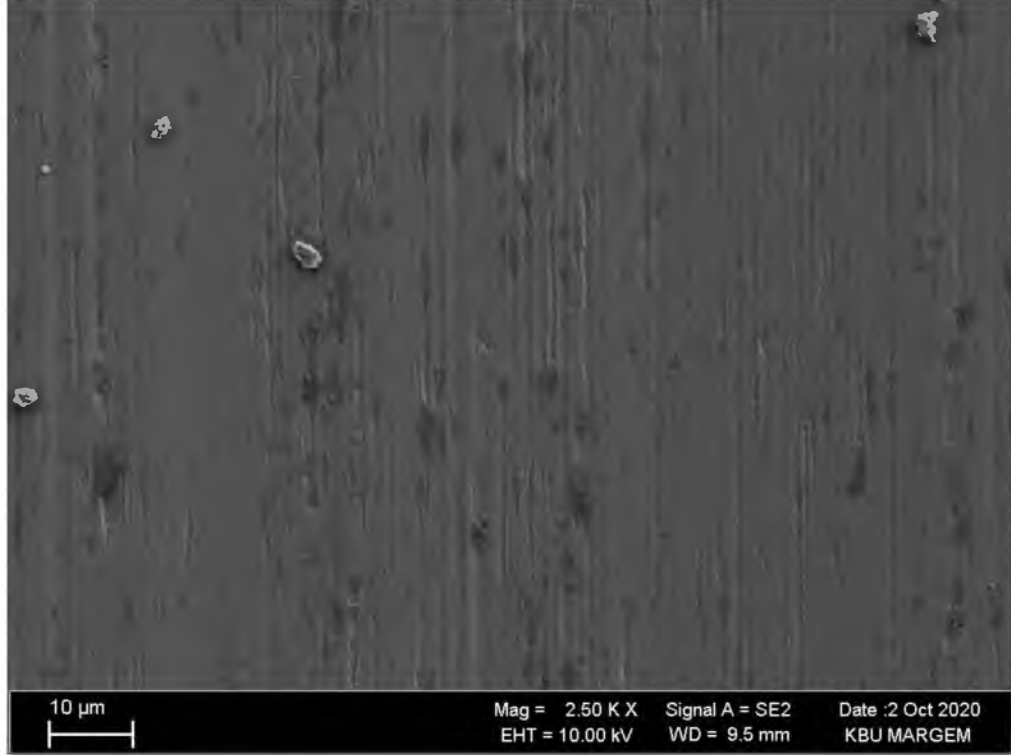
Şekil 5.43. Kaplamasız Hardox 400 çeliğinin 15 N'luk yük altındaki aşınma izi yüzey profili

Çizelge 5.252. Kaplamasız Hardox 400 çeliğinin 15 N yük uygulanmış aşınma hacmi

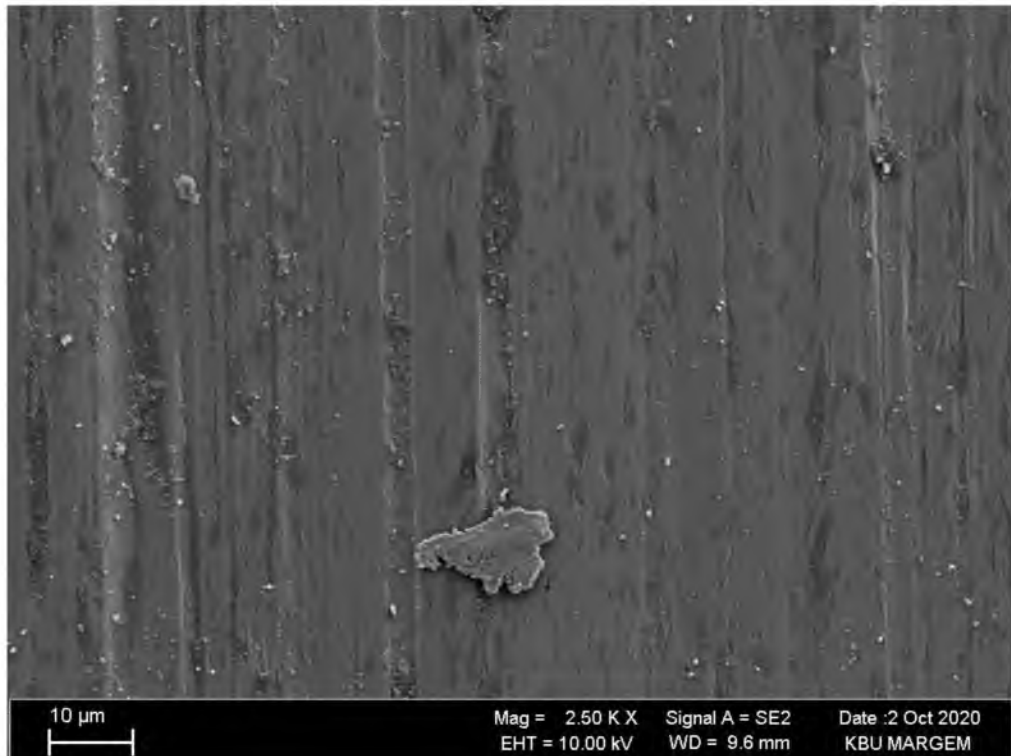
KAPLAMASIZ		YÜZEY ALANI (mm ²)		
		1.Ölçüm (mm ²)	2.Ölçüm (mm ²)	3.Ölçüm (mm ²)
Yük Miktarı	15 N			
Strok Mesafesi	5 mm	0,061	0,066	0,065
Aşınma Hacmi		0,305	0,330	0,325
ORTALAMA AŞINMA HACMİ (mm ³)				
0,320 mm ³				

Kaplanmamış Hardox 400 çeliğinin aşınma izi yüzey profili grafiklerine bakıldığında, uygulanan yükün artması numune yüzeyindeki iz genişliğinin ve derinliğinin artmasına ve bunun da aşınma hacim tablolarında görüldüğü gibi aşınma hacminin artmasına neden olmuştur. Kaplanmamış Hardox 400 çeliğinde 5, 10 ve 15 N'luk yükler için elde edilen yaklaşık aşınma hacimleri sırasıyla 0,078 mm³, 0,197 mm³ ve 0,320 mm³'tür. Kaplanmış Hardox 400 çelikleri ile karşılaştırıldığında, genel olarak kaplanmamış Hardox 400 çelikleri daha fazla aşınmıştır. Ancak 10 ve 15 N'luk uygulama yüklerinde, 3 saat süreyle 950 ve 1050 °C'de kaplanan numunelerin daha fazla aşındığı görülmektedir. Kurt ve arkadaşları (2018) tarafından yapılan çalışmada, artan yük ile aşınma hacminin arttığı, kaplama malzemelerinde daha düşük aşınma hacmi elde edildiği, kaplama süresinin artmasıyla aşınma hacminin arttığı, artan kaplama sıcaklığı ile aşınma hacminin farklı davranışlar sergilediği ve bunun da artan sertlik ile birlikte dayanımın düşmesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

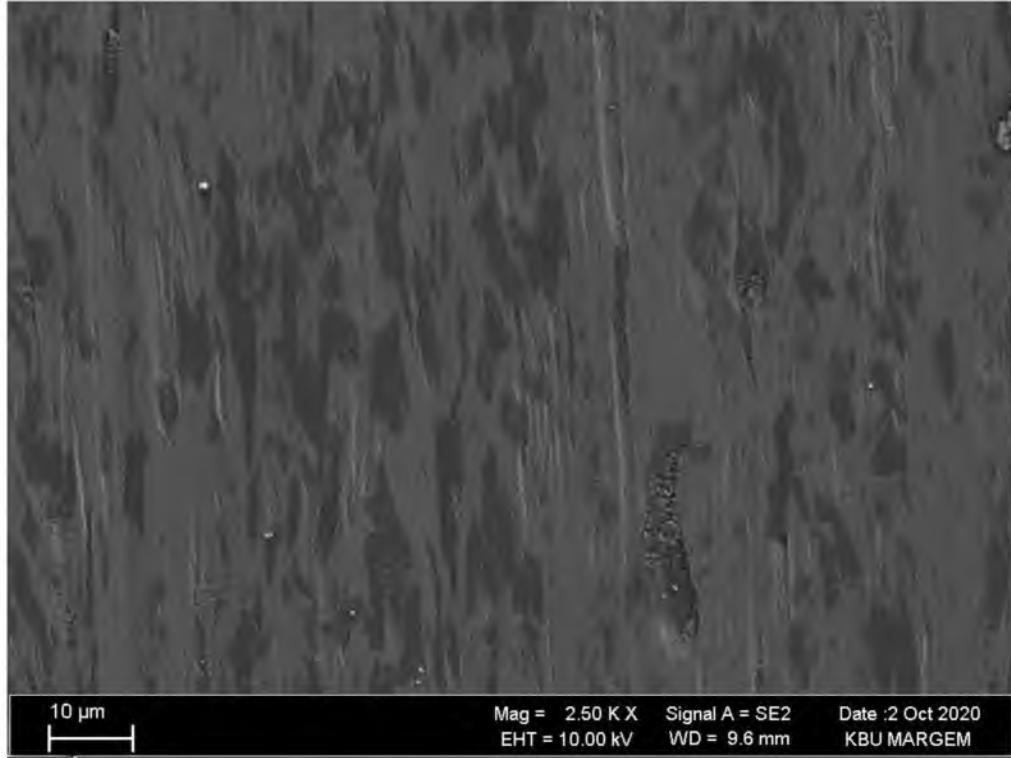
Aşınma hacmi, izin geometrik boyutuna göre belirlendiği için aşınmış yüzeylerdeki SEM ve EDX analizleri, bu durumunun daha iyi analiz edilebilmesi için önem arz etmektedir. Şekil 5.44–Şekil 5.46’da 5, 10 ve 15 N yüklerde aşındırılan kaplanmamış numunelere ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.44. 5 N uygulama yükündeki kaplamasız numunenin aşınma yüzeyinden alınan SEM görüntüsü

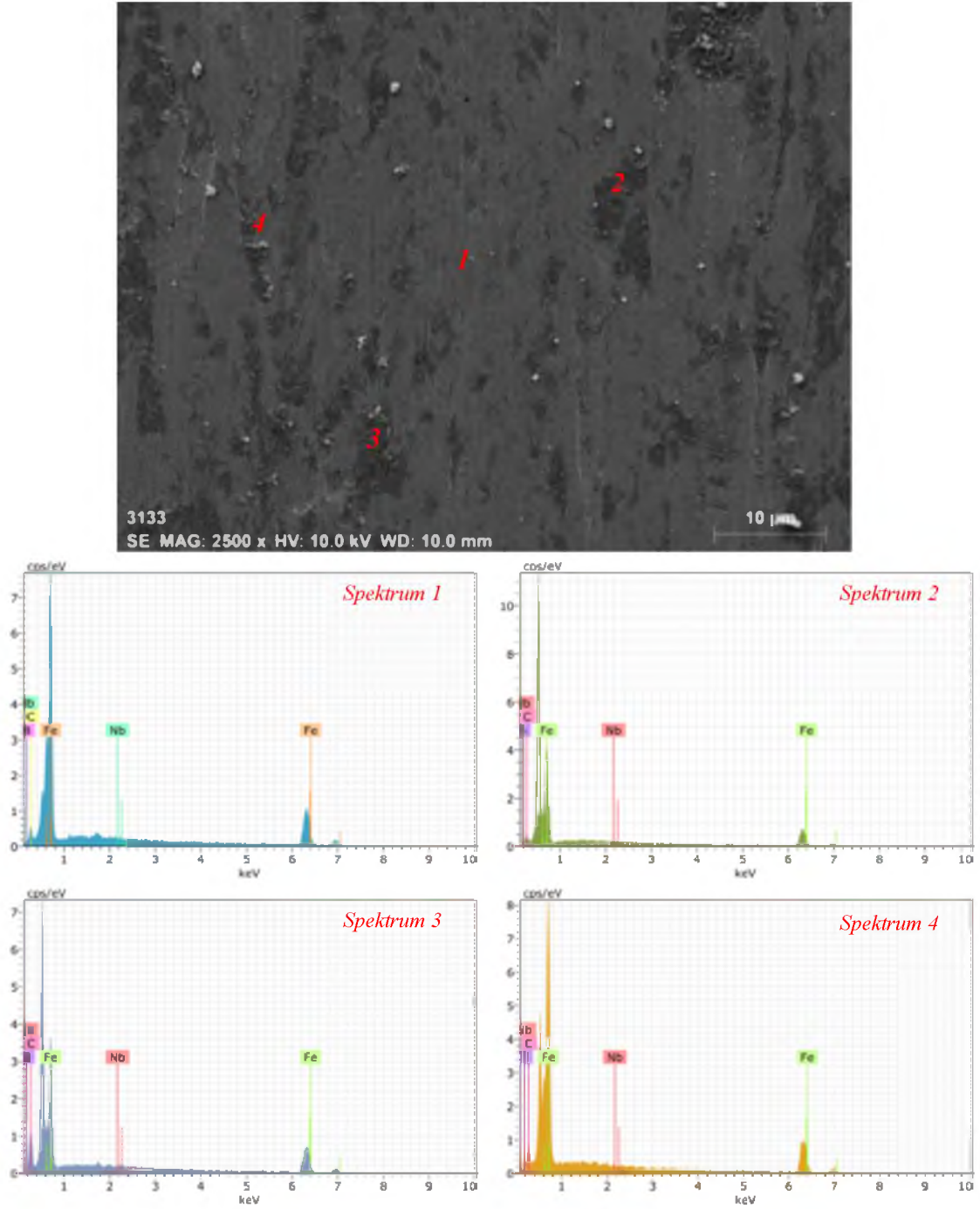


Şekil 5.45. 10 N uygulama yükündeki kaplamasız numunenin aşınma yüzeyinden alınan SEM görüntüsü



Şekil 5.46. 15 N uygulama yükündeki kaplamasız numunenin aşınma yüzeyinden alınan SEM görüntüsü

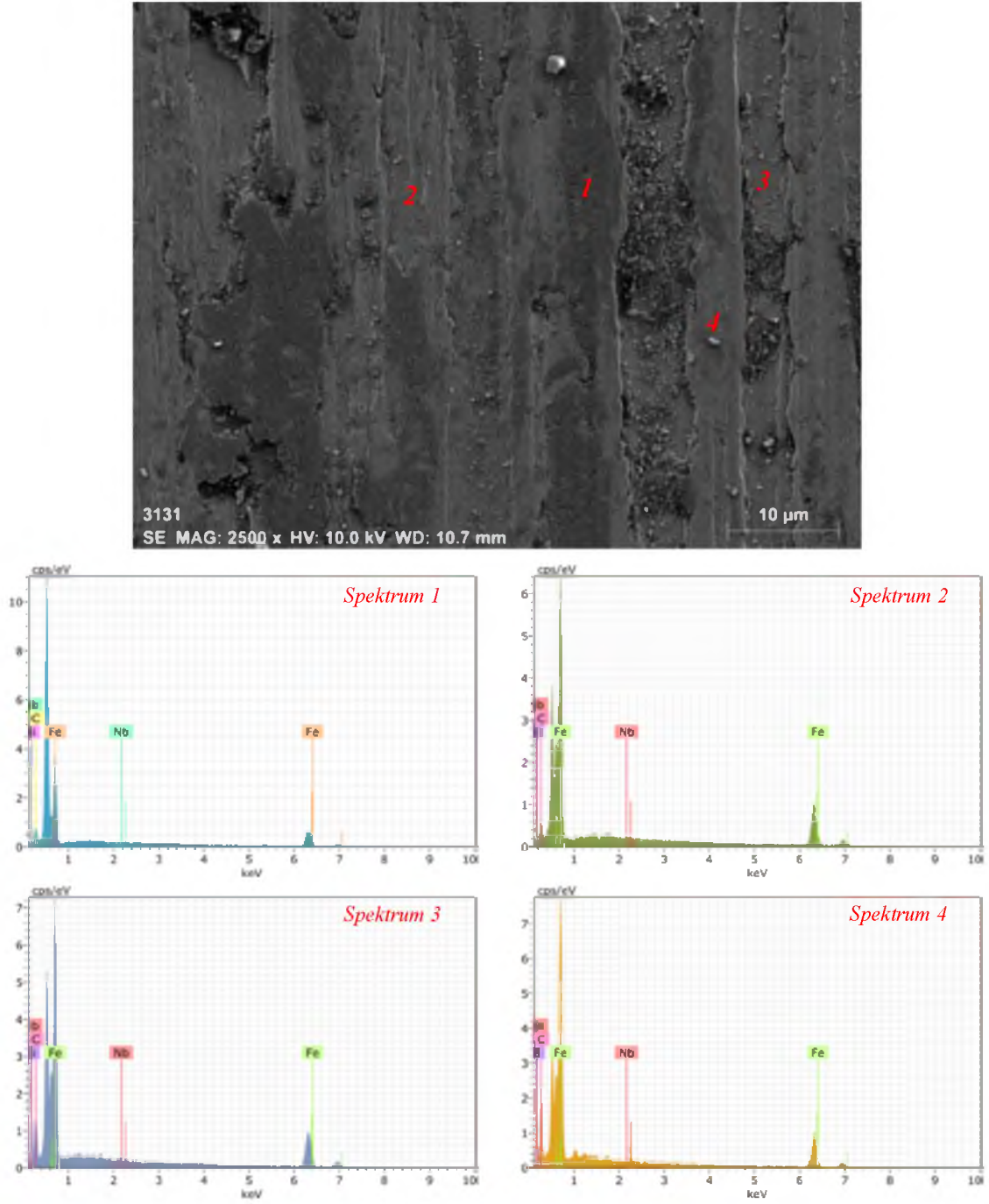
Şekil 5.44–Şekil 5.46’daki SEM görüntüleri incelendiğinde, uygulanan yükün artmasıyla aşınmış yüzeylerdeki izlerin ve çukur genişliklerinin belirgin şekilde ayırt edildiği görülmektedir. Özellikle 15 N’luk uygulama yüklerinde, plastik deformasyon sonucu koyu renkte yapılar, aşınma yüzeylerinde yoğunlaşmıştır. Benzer durum kaplanmış numunelerde de görülmüştür. Ancak onların düşük ve orta uygulama yüklerindeki iz ve çukur genişlikleri kaplanmamış Hardox 400 çeliğinkinden daha küçük elde edilirken, 3 saat süreyle kaplanan yüksek uygulama yüklerindeki iz ve çukur genişlikleri daha belirgin elde edilmiştir. Kaplanmış Hardox 400 çeliklerinin 10 ve 15 N’luk yük altındaki aşınma SEM görüntüleri ile EDX analizleri Şekil 5.47 ve Şekil 5.48’de, onların spektrum değerleri için elde edilen kimyasal elementlerin kütleli yüzdesi ise sırasıyla Çizelge 5.26 ve Çizelge 5.27’de verilmiştir.



Şekil 5.47. 1050 °C’de 3 saat süreyle kaplanan ve 10 N uygulama yükündeki aşındırılan numunenin EDX analizi

Çizelge 5.26. 1050 °C’de 3 saat süreyle kaplanan ve 10 N uygulama yükündeki aşındırılan numunenin kütleli kimyasal bileşim yüzdesi

Spektrum	B	C	Fe	Nb
1	9,34	6,43	84,15	0,08
2	10,96	7,64	81,17	0,23
3	12,08	17,81	70,06	0,04
4	12,55	9,32	78,13	0,00
5	15,18	16,83	67,99	0,00



Şekil 5.48. 950 °C’de 3 saat süreyle kaplanan ve 15 N uygulama yükündeki aşındırılan numunenin EDX analizi

Çizelge 5.27. 950 °C’de 3 saat süreyle kaplanan ve 15 N uygulama yükündeki aşındırılan numunenin kütleli kimyasal bileşim yüzdesi

Spektrum	B	C	Fe	Nb
1	11,13	13,34	75,52	0,00
2	8,41	7,92	83,30	0,37
3	10,73	15,40	73,53	0,34
4	11,47	24,05	64,42	0,06

Şekil 5.44– Şekil 5.47’de verilen kaplanmış numune ile kaplanmamış numunenin SEM görüntüleri karşılaştırıldığında, kaplanmış numuneler yüzeyleri daha pürüzlü elde edilmiştir. Bilimsel çalışmalarda kaplanmış yüzeylerin pürüzlü olduğu, artan kaplama sıcaklığı ve süresiyle bu pürüzlülük değerinin arttığı belirtilmiştir (Kurt ve arkadaşları, 2020). Ancak yapılan farklı bir çalışmada ise artan kaplama sıcaklığı ve süresinin yüzey pürüzlülüğünü düşürdüğü belirtilmiştir (Kurt ve arkadaşları, 2018).

Şekil 5.47’de görüldüğü gibi orta yüklerde numune yüzeyinde aşınma izleri küçük oluşurken, Şekil 5.48’deki yüksek yüklerde numune yüzeyinde geniş aşınma izleri oluşmuştur. Her iki aşınmış numunenin EDX analizlerinde kaplama yüzeyinde bulunması gereken elementlerin mevcut olması gerekmektedir. Bu elementler, 3’er saat süreyle 950 °C ve 1050 °C sıcaklıklarda kaplanan numuneler için metalografik muayene sonuçları başlığı altında Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.9’da verilmişti. Çizelgelerde kaplama tabakalarında B, C, Fe ve Nb elementlerinin olduğu ve bu elementlerin Çizelge 5.26 ve Çizelge 5.27’de aşınmış yüzeylerde de mevcut olduğu görülmektedir. Ancak aşınmamış kaplama yüzeylerle karşılaştırıldığında, aşınmış kaplama yüzeylerinde Nb oranının azaldığı, Fe element oranının ise arttığı göze çarpmaktadır. Bu iki farklı durumda açıklanabilir. Bunlardan birincisi, aşındırıcı malzeme ile kaplama malzemesi arasındaki difüzyondan, ikincisi de kaplama malzemesindeki üst katmanın kırılarak altlık malzeme üzerindeki difüzyon bölgesinin ortaya çıkmasından kaynaklanabilir. 1050 °C’de 3 saat süreyle kaplanan numuneler için birinci durumun, 950 °C’de 3 saat süreyle kaplanan numuneler için ikinci durumun söz konusu olduğu düşünülmektedir. Ayrıca kaplama tabakası oldukça sert bir yapıya sahiptir. Kaplama tabakası altında bulunan gözenekli bir yapı, aşınma deneyleri esnasında plastik deformasyondan kaynaklı kırılmaya sebebiyet verdiği için 950 C’de 3 saat süreyle kaplanan numuneler için aşınma bölgesindeki iz ve çukurlar yüksek elde edilmiş ve bu durum da doğal olarak aşınma hacminin artmasına neden olmuştur. Kurt ve arkadaşları (2020), kaplanmış yüzeylerde çizilme, çatlak ve çukur oluşumu gibi aşınma mekanizmaların oluştuğunu, aşınma hacminin sertlik ve elastik modüldeki artış ile düşeceğini belirtmişlerdir. Strahin ve arkadaşları (2017), kaplama yüzeylerinde aşınma çizgilerinin kaplanmamış altlık malzemesininkinden daha küçük olduğunu ve aşınma yönteminin aşınma hacmi üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu vurgulamışlardır. Günen ve arkadaşları (2020), kaplama tabakasının yüksek sıcaklıklarda bile iyi aşınma direnci sergilediğini gözlemlemişlerdir. Mariani ve arkadaşları (2020) ise elde edilen NbC kaplama ile aşınma direncinin minimum 2 kat artırılabilirliğini ifade etmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada Hardox 400 çeliğine, katı ortam TRD yöntemi ile Ferro Niyobyum ve Ferro Bor tozlarını kullanarak 950, 1000 ve 1050 °C sıcaklıklarda, 1, 2 ve 3 saatlik sürelerde kaplama işlemi uygulanmıştır. TRD işlemi sonrasında numunelerin optik mikroskop görüntüleri elde edilmiş ve mikrosertlik ölçüm cihazı ile sertlikleri hesaplanmıştır. SEM, EDX ve XRD ile yapıları analiz edilmiştir. Ayrıca Ferro Niyobyum ve Ferro Bor'un aşınmaya etkisini tespit etmek için numuneler farklı yüklerde (5, 10 ve 15N) Taguchi deney tasarımına göre adhezif aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Daha sonra numunelere uygulanan aşınma testinin etkilerini incelemek amacıyla aşınan yüzeylerin SEM ve EDS görüntüleri çekilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

1. Metalografik incelemeler neticesinde numunelerde ana malzeme kısmı ve kaplama tabakasındaki difüzyon bölgesi açık bir şekilde gözlemlenmiştir. NbC-B partiküllerinin numunenin yüzeyi boyunca homojen bir şekilde dağıldığı ve kaplama sürelerine bağlı olarak kaplama tabakası kalınlıklarının arttığı görülmüştür.

2. Yapılan mikroyapı incelemeleri neticesinde matrise doğru gidildikçe NbC-B oranının azaldığı ve demir oranının arttığı gözlemlenmiştir. Analiz fotoğraflarında numunelerin yüzeye yakın bölgelerinde Nb elementinin yoğun olduğu tespit edilmiştir. Kaplama tabakası karbür yapısını Nb, B ve C elementlerinin oluşturduğu görülmüştür.

3. XRD analizlerinden, en düşük NbC-B fazı kararlılığı 950 °C'de oluşmuştur. Artan kaplama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak Fe içeren fazda azalma, NbC-B fazında ise artma meydana gelmiştir.

4. Mikrosertlik ölçümünde, kaplama sıcaklığı ve süresi arttıkça numunelerin sertliğinde de artış görülmüştür. Ölçüm sonuçlarında en düşük sertlik değeri 914,6 HV iken, en yüksek sertlik değeri ise 2934,2 HV bulunmuştur.

5. Yapılan adhezif aşınma neticesinde etkili olan değişkenin yük miktarı olduğu görülmüştür. Farklı sıcaklıklarda kaplanmış olan numunelerin, farklı yüklere maruz bırakılması bunu kanıtlar nitelikte olmuştur. Yapılan gözlemde, kaplama süresi etki öneminin uygulanan yük miktarından daha az olduğu, belirleyici kriterin yük miktarının büyüklüğüyle doğru orantılı olduğu görülmüştür. Buna göre yük miktarı arttıkça ortalama aşınma hacmi artmıştır. Kaplamasız numunelerde de durum aynıdır. Yük miktarı arttıkça

ortalama aşınma hacmi artmıştır. Genel olarak kaplanmış yüzeylerde aşınma hacmi daha düşük elde edilmiştir.

6. Aşınma deneyi sonrası kaplanmış numunelere ait SEM görüntülerinde aşınma çizgileri ve çukur genişlikleri belirgin bir şekilde ayırt edilmiştir. Artan yük oranına bağlı olarak aşınma izlerinin daha derin ve geniş olduğu gözlenmiştir. EDX analizlerinin yapıldığı numunelerde aşınmaya bağlı olarak Nb elementinin oranının oldukça az olduğu, B elementinin ise nispeten daha yoğun olduğu tespit edilmiştir.

6.2. Öneriler

Yapılan literatür çalışmalarında, mühendislik uygulamalarında kullanılan altlık malzemelerine farklı tozlar kullanılarak birden fazla kaplama süresi ve sıcaklığı için analizler yapıldığı görülmüştür. Bu analizlere farklı boyut katmak için yapılacak çalışmalara aşağıda maddeler halinde verilen işlemlerin yapılması önerilmektedir.

1. Kaplama süresi ve sıcaklığının artması kaplama kalınlığını ve sertliği arttırdığı için kaplama parametrelerinin sadece düşük ve yüksek değerlerinde deney tekrarı yapılarak kaplama parametrelerinin etki önemi belirlenebilir.
2. Yüksek kaplama sıcaklığı ve süresi için altlık malzemesi yüzeyi, farklı kaplama tozları kullanılarak kaplanabilir. Dolayısıyla, kaplama tozlarının kaplama kalınlığına ve sertliğe etkisi analiz edilebilir.
3. Kaplama tabakalarının farklı aşınma ortamlarındaki davranışları araştırılabilir.
4. Kaplamalarda yüksek sertlik elde edildiği için yüksek sıcaklıklardaki aşınma davranışları deney tasarım yöntemleri ile incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Amaya, A., Piamba, O. and Olaya, J., 2018, Improvement of corrosion resistance for gray cast iron in palm biodiesel application using thermoreactive diffusion niobium carbide (NbC) coating, *Coatings*, 8(6), 216.
- Amaya, A., Piamba, O. and Olaya, J., 2019, Corrosiveness of palm biodiesel in gray cast iron coated by thermoreactive diffusion vanadium carbide (VC) coating, *Coatings*, 9(2), 135.
- Arai, T., 1991, Thermoreactive deposition/diffusion process for surface hardening of steels, *ASM Handbook*, V.4: Heat Treating, Materials Park, OH: ASM International, 1000-1014.
- Avila, A.A.A, Tulcan, O.E.P. and Florez, J.J.O, 2015, Vanadium carbide coatings produced on gray cast iron using the thermo-reactive deposition/diffusion technique, *Ingeniería Mecánica Tecnología Y Desarrollo*, 5(3), 333-338.
- Biesuz, M. and Sglavo V.M., 2016, Chromium and vanadium carbide and nitride coatings obtained by TRD techniques on UNI 42CrMoS4 (AISI 4140) steel, *Surface & Coatings Technology*, 286, 319-326.
- Bilen, F. A., 2016, Hardox 400-AISI 304 çelik çiftlerinin plazma transferli ark kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılması, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Elazığ.
- Buglacki, H. and Smajdor, M., 2003, Mechanical properties of abrasion-resistant Hardox 400 steel and their welded joints, *Advances in Materials Science*, 4(2), 1-8.
- Castillejo, F.E., Marulanda, D.M., Olaya, J.J. and Alfonso, J.E., 2014, Wear and corrosion resistance of niobium–chromium carbide coatings on AISI D2 produced through TRD, *Surface & Coatings Technology*, 254, 104-111.
- Castillejo-Nieto, F.E., Olaya-Florez, J.J. and Alfonso, J.E., 2015, Wear resistance of vanadium-niobium carbide layers grown via TRD, *DYNA* 82 (193), 104-109.
- Çeğil, Ö., 2002, AISI 8620 çeliğinin bor-vanadyumlanması ve yüzey özelliklerinin incelenmesi, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya.
- Çelik, O.N., 1989, Nitrürasyon tav fırını dizaynı ve nitrürasyonu etkileyen parametrelerin incelenmesi, *Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, Eskişehir.
- Chattopadhyay, R., 2014, Green tribology, green surface engineering, and global warming, *ASM International Materials Park, Ohio* 143-144.
- Chen, F.S., Lee, P.Y. and Yeh, M.C., 1998, Thermal reactive deposition coating of chromium carbide on die steel in a fluidized bed furnace, *Materials Chemistry and Physics*, 53(1), 19-27.

- Deniz, G., 2004, Termo-reaktif difüzyon (TRD) tekniği ile AISI 1010 ve AISI M2 çeliklerinin titanyumnitrür kaplanması, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya.
- Ertürk, Ş., 2010, Termo-kimyasal yöntemle kaplanmış farklı kesici takım malzemelerin talaşlı işlem kabiliyetinin incelenmesi, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya.
- Evcin, A., 2016, İnce film teknolojisi, yüksek lisans ders notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, İnternet adresi: <http://blog.aku.edu.tr/evcin/dersler/ince-film-teknolojisi/> [Ziyaret Tarihi: 07 Mayıs 2020].
- Fan, X.S., Yang, Z.G., Zhang, C. and Zhang, Y.D., 2012, Thermo-reactive deposition processed vanadium carbide coating: growth kinetics model and diffusion mechanism, *Surface & Coatings Technology*, 208, 80-86.
- Fan, X.S., Yang, Z.G., Zhang, C., Zhang, Y.D. and Che, H.Q., 2010, Evaluation of vanadium carbide coatings on AISI H13 obtained by thermo-reactive deposition/diffusion technique, *Surface & Coatings Technology*, 205(2), 641-646.
- Fernandes, F.A.P., Nascimento de Oliveira, C.K., Neto, A.L., Totten, G.E. and Casteletti, L.C., 2010, Wear behavior of niobium carbide coated AISI 52100 steel, *International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering (18th IFHTSE Congress)*, 5088-5093.
- Franco, E., Edil da Costa, C., Milan, J.C.G., Tsipas, S.A. and Gordo, E., 2020, Multi-component boron and niobium coating on M2 high speed steel processed by powder metallurgy, *Surface & Coatings Technology*, 384, 125306.
- Ghadi, A., Soltanieh, M., Saghafian, H. and Yang, Z.G., 2016, Investigation of chromium and vanadium carbide composite coatings on CK45 steel by thermal reactive diffusion, *Surface & Coatings Technology*, 289, 1-10.
- Górka, J., Czupryński, A., Żuk, M., Adamiak, M. and Kopyś, A., 2018, Properties and structure of deposited nanocrystalline coatings in relation to selected construction materials resistant to abrasive wear, *Materials*, 11(7), 1184.
- Günen, A., Kalkandelen, M., Gök, M.S, Kanca, E., Kurt, B., Karakaş, M.S., Karahan, İ.H. and Çetin, M., 2020, Characteristics and high temperature wear behavior of chrome vanadium carbide composite coatings produced by thermo-reactive diffusion, *Surface & Coatings Technology*, 402, 126402.
- Gur, A.K., 2013, Investigating the wear behaviour of FeCr/CB₄C powder alloys coating produced by plasma transferred arc weld surfacing using the Taguchi method, *Materials Testing*, 55(6), 462-467.
- Hacısalıhoğlu, İ., Yıldız, F. and Çelik, A., 2018, Tribocorrosion behavior of plasma nitrided Hardox steels in NaCl solution, *Tribology International*, 120, 434-445.

- İnternet adresi 1, 2020, Malzemelerin yüzey işlemleri: <https://www.metalreyonu.com.tr/blog/malzemelerin-yuzey-islemleri> [Ziyaret Tarihi: 07 Mayıs 2020].
- İnternet adresi 2, 2020, Hardox çelikleri ve Hardox-400 çeliğinin özellikleri: <http://www.muhendisalemi.com/hardox-celikleri-ve-hardox-400-celiginin-ozellikleri/> [Ziyaret Tarihi: 11 Mayıs 2020].
- İpek, M., 1996, Kutu sementasyon yöntemiyle çelik yüzeylerin TiC kaplanması, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya.
- Jungedal, M., 2012, Mild impact wear in a concrete mixer an evaluation of wet abrasive wear, *Royal Institute of Technology Department of Material Science and Engineering, Thesis*, Stockholm.
- Katinas, E., Jankauskas, V., Kazak, N. and Michailov, V., 2019, Improving abrasive wear resistance for steel Hardox 400 by electro-spark deposition, *Journal of Friction and Wear*, 40(1), 100-106.
- Kaya, S., 2017, Yüzeyi modifiye edilmiş ferritik paslanmaz çeliğin aşınma direncinin Taguchi metoduyla optimizasyonu, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Elazığ.
- Khafri, M.A and Fazlalipour, F., 2008a, Kinetics of V(N,C) coating produced by a duplex surface treatment, *Surface & Coatings Technology*, 202(17), 4107-4113.
- Khafri, M.A. and Fazlalipour, F., 2008b, Vanadium carbide coatings on die steel deposited by the thermo-reactive diffusion technique, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 69(10), 2465-2470.
- Khalaj, G., Nazari, A., Khoie, S.M.M., Khalaj, M.J. and Pouraliakbar, H., 2013, Chromium carbonitride coating produced on DIN 1.2210 steel by thermo-reactive deposition technique: Thermodynamics, kinetics and modeling, *Surface & Coatings Technology*, 225, 1-10.
- Kılınç, B., Durmaz, M., Abakay, E., Şen, U. and Şen, Ş., 2018, The properties of Cr-Al-N based coatings deposited by nitro-chromizing treatment on AISI 1010 Steel, *19th International Metallurgy & Materials Congress*.
- King, P.C., Reynoldson, R.W., Brownrigg, A. and Long, J.M., 2004, Cr(N,C) diffusion coating formation on pre-nitrocarburised H13 tool steel, *Surface & Coatings Technology*, 179(1), 18-26.
- Koçaslan, A., 2016, 16MnCr5 çeliğinin borlama ve termal çevrimli borlama özelliklerinin araştırılması, *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, Isparta.
- Kon, Ö., 2006, Termo-reaktif difüzyon (TRD) yöntemi ile TBCN kaplanmış WC-Co kesici takımların ve çeliklerin aşınma özellikleri, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya.

- Kulu, P., Veinthal, R., Saarna, M. and Tarbe, R., 2007, Surface fatigue processes at impact wear of powder materials, *Wear*, 263(1-6), 463-471.
- Kurt, B., Günen, A., Kanca, Y., Koç, V., Gök, M.S., Kırar, E. and Askerov, K., 2018, Properties and tribologic behavior of titanium carbide coatings on AISI D2 steel deposited by thermoreactive diffusion, *The Minerals, Metals & Materials Society*, 70(11), 2650-2659.
- Kurt, B., Küçük, Y. and Gök, M.S., 2014, Microabrasion wear behavior of VC and CrC coatings deposited by thermoreactive diffusion technique, *Tribology Transactions*, 57(2), 345-352.
- Kurt, B., Özdoğan, L., Güney, B., Bölükbaşı, Ö.S. and Günen, A., 2020, Characterization and wear behavior of TiBC coatings formed by thermoreactive diffusion technique on AISI D6 steel, *Surface & Coatings Technology*, 2020, 385, 125332.
- Liu, X., Wang, H., Li, D. and Wu, Y., 2006, Study on kinetics of carbide coating growth by thermal diffusion process, *Surface & Coatings Technology*, 201(6), 2414-2418.
- Mariani, F.E., Rêgo, G.C., Bonella, P.G., Neto, A.L., Totten, G.E. and Casteletti, L.C., 2020, Wear resistance of niobium carbide layers produced on gray cast iron by thermoreactive treatments, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29, 3516-3522.
- Matijević, B. and Stupnišek, M., 2009, Novelty in diffusion coating technology, *Materials and Manufacturing Processes*, 24(7-8), 887-893.
- Mishra, A., 2014, Evaluation of the impact of taguchi methods on product process parameters optimization, *Suresh Gyan Vihar University, Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering*, India.
- Orjuela-Guerrero, F.A., Alfonso-Orjuela, J.E. and Olaya-Flórez, J.J., 2015, Effect of V addition on the hardness, adherence and friction coefficient of VC coatings produced by thermo-reactive diffusion deposition, *DYNA*, 82(194), 178-184.
- Özay, Ç., 2004, Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Cu-C-Al₂SiO₅ kompozitinin abrasiv aşınma dayanımının araştırılması, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Elazığ.
- Özay, Ç., 2009, Teğetsel tornalama-frezleme yönteminde işleme parametrelerinin teorik ve deneysel olarak araştırılması, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, Elazığ.
- Özdemir, U. ve Erten, M., 2003, Plazma (iyon) nitrürleme yöntemi ve malzeme özellikleri üzerindeki etkisi, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 1 (2), 41-48.
- Pouraliakbar, H., Khalaj, G., Gomidželović, L., Khalaj, M-J. and Nazerfakhari, M., 2015, Duplex ceramic coating produced by low temperature thermo-reactive deposition and diffusion on the cold work tool steel substrate: Thermodynamics, kinetics and modeling, *Ceramics International*, 41, 9350-9360.

- Said, G., 2012, Metallerin ısıtıl işlem teorisi, 1. Baskıdan Çeviri, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, s. 409-418.
- Şakar, G., 1998, İyon nitürasyon deney düzeneğinin imali ve uygulanması, Atatürk Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, Erzurum.
- Sarıkaya, Ö., 2007, Aşınmaya karşı yüzey mühendisliği yöntemleri, Sakarya, s. 248-254.
- Sen, S., 2005, A study on kinetics of CrxC-coated high-chromium steel by thermo-reactive diffusion technique, *Vacuum*, 79 (1-2), 63-70.
- Shan, Z.J., Pang, Z.G., Luo, F.Q. and Wei, F.D., 2012, Kinetics of V(N,C) and Nb(N,C) coatings produced by V-Nb-RE deposition technique, *Surface & Coatings Technology*, 206(19-20), 4322-4327.
- Sinoplu, Ö., 2012, Termo-reaktif difüzyon yöntemiyle (TRD) krom karbür ve vanadyum karbür kaplanan AISI D3 seri soğuk iş takım çeliğinin mikroyapı ve aşınma özelliklerinin incelenmesi, *Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Bartın.
- Soltani, R., Sohi, M.H., Ansari, M., Haghighi, A., Ghasemi, H.M. and Haftlang, F., 2017, Evaluation of niobium carbide coatings produced on AISI L2 steel via thermo-reactive diffusion technique, *Journal of Vacuum*, 146, 44-51.
- Strahin, B.L., Shreeram, D.D. and Doll, G.L., 2017, Properties and tribological performance of vanadium carbide coatings on AISI 52100 steel deposited by thermoreactive diffusion, *The Minerals, Metals & Materials Society*, 69(7), 1160-1164.
- Tarafder, S., 1994, Recent advances in heat-treat technology, National Metallurgical Laboratory, Jamshedpur 831 007, O-1—O-18.
- Toprak, M., 2019, Katı borlamanın Hardox 450 ve Hardox HiTuf çeliklerin yüzey özelliklerine etkisi, *Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Şanlıurfa.
- Wei, C.Y. and Chen, F.S., 2005, Thermoreactive deposition/diffusion coating of chromium carbide by contact-free method, *Materials Chemistry and Physics*, 91(1), 192-199.
- Woydt, M. and Mohrbacher, H., 2014, The tribological and mechanical properties of niobium carbides (NbC) bonded with cobalt or Fe₃Al, *Wear*, 321, 1-7.
- Wu, S., Li, P., Li, H., Guo, B. and Guo, Q., 2016, Synthesis of Cr₇C₃-CrB composite powders by powder immersion method, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 54(4), 485-489.
- Yıldırım, Y.B., 2016, Termoreaktif difüzyon (TRD) yöntemiyle ferro titanium kaplanan orta karbonlu çeliğin mikroyapı özelliklerinin incelenmesi, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Elazığ.

- Yılmaz, E., 2008, Termoreaktif difüzyon yöntemiyle çeliklerin demir alüminid kaplanması, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya, 2008, 129.
- Yılmaz, R., Gedikli, M. ve Barlas, Z., 2005, Hardox 400 çeliğinin sert dolgu kaynağında paso sayısının sertliğe, aşınmaya ve mikroyapıya etkisi, *Teknoloji*, 8(1), 57-64.
- Yurdakul, H., 2016, Sementasyon ısıtıl işlemine tabi tutulmuş farklı derinliklerdeki 16MnCr5 (1,7131 DIN) çeliğinin mekanik özelliklerinin incelenmesi, Karabük Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, Karabük.
- Zong, X., Gao, F. and Sun, L., 2020, Investigation of microstructure and properties of vanadium carbide coating deposited on AISI 52100 (ShKh15) by thermo-reactive diffusion, *Metal Science and Heat Treatment*, 61, 738-742.