

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI AKIM YOĞUNLUKLARINDA ÜRETİLEN AKIMLI Nİ-B
KAPLAMALARIN SERT KROM KAPLAMAYA
ALTERNATİFLİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yasin UĞUR

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

EYLÜL 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI AKIM YOĞUNLUKLARINDA ÜRETİLEN AKIMLI Nİ-B
KAPLAMALARIN SERT KROM KAPLAMAYA
ALTERNATİFLİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yasin UĞUR

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hatem AKBULUT

EYLÜL 2025

Yasin UĞUR tarafından hazırlanan “FARKLI AKIM YOĞUNLUKLARINDA ÜRETİLEN AKIMLI Nİ-B KAPLAMALARIN SERT KROM KAPLAMAYA ALTERNATİFLİĞİ ” adlı tez çalışması 26.09.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Prof. Dr. Hatem AKBULUT** (Danışman)
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç. Dr. Harun GÜL**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç. Dr. Serdar ASLAN**
Sakarya Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “FARKLI AKIM YOĞUNLUKLARINDA ÜRETİLEN AKIMLI Nİ-B KAPLAMALARIN SERT KROM KAPLAMAYA ALTERNATİFLİĞİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(26/09/2025).

Yasin UĞUR



Aileme ...



TEŞEKKÜR

Çalışma esnasında "Akımlı (Electrodeposition) Ni-B Coating – Sert Cr’a Alternatif Olarak Ni-B Kaplama" konusu üzerinde durulmuştur. Bu esnada ilgili elementler ve konu ile alakalı gerekli analizler irdelenerek literatür ile desteklenmiştir.

Çalışmanın faaliyete geçirilmesi sırasında tecrübe, bilgi ve birikimlerinden faydalanılan Prof. Dr. Hatem AKBULUT'a, tüm aşamalarda desteği ile yardımlarını esirgemeyen bilgilerini daima hissettiren danışman hocam Prof. Dr. Erhan DURU'ya ve Sakarya Üniversitesi kütüphane personeline teşekkürlerimi sunarım.

Yasin UĞUR

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	v
TEŞEKKÜR.....	ix
İÇİNDEKİLER.....	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER.....	xv
TABLO LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY.....	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. AKIMSIZ NİKEL KAPLAMALAR	3
2.1. Akımsız Nikel Kaplama Genel Bakış.....	3
2.2. Akımsız Nikel Kaplama Özellikleri	5
2.3. Akımsız Nikel Kaplama Banyolarının Temel Bileşenleri	6
2.3.1. Redükleyici maddeler	7
2.3.2. Kompleks oluşturmalar.....	8
2.3.3. Hızlandırıcılar.....	8
2.3.4. İnhibitörler	9
2.3.5. Yüzey aktifleştirici maddeler	9
2.3.6. Enerji.....	10
3. AKIMLI NİKEL KAPLAMA	13
3.1. Akımlı Kaplamalar	13
3.2. Akımlı Kaplamaların Tarihçesi	14
3.3. Akımlı Kaplamaların Çalışma Prensipleri	14
3.4. Akımlı Kaplamaların Uygulamaları	16
3.5. Akımlı Nikel Kaplamalar.....	17
3.5.1. Akımlı Ni-Co kaplamalar	18
3.5.2. Akımlı Ni-P kaplamalar.....	19
3.5.3. Akımlı Ni-B Kaplamalar	20
3.6. Akımlı ve Akımsız Nikel Kaplama Farkları	21
4. MATERYAL VE METOT	23
4.1. Araştırmanın Amacı	23
4.2. Araştırmanın Önemi	24
4.3. Araştırmanın Yöntemi	24
4.4. Veri Toplama Süreci ve Araçları	25
5. BULGULAR.....	27
5.1. Sertlik Ölçümleri	27
5.2. Aşınma Testleri	29
5.3. X-Işınları Difraksiyon (XRD) Analiz.....	30
5.4. SEM Yüzey/Kesit Görüntüleri	31
5.5. Aşınma Sonrası SEM Yüzey Görüntüleri.....	34

6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	37
KAYNAKLAR.....	41
EKLER	45
ÖZGEÇMİŞ.....	47



KISALTMALAR

A	: Amper
Akt.	: Aktaran
Cr	: Krom
Çev.	: Çeviren
DMAB	: Dimetilamin Boran
Dr.	: Doktor
Ed.	: Editör(ler)
Prof.	: Profesör
S.	: Sayfa Sayısı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TMAB	: Tremetilamin Boran
Vb.	: Ve Benzeri
Vd.	: Ve Diğerleri
XRD	: X-Işınları Difraktometresi
Yy.	: Yüzyıl



SİMGELER

°C	: Derece / Celsius Sıcaklığı
Dm²	: Desimetrekaare
g	: Gram
L	: Litre
Ni	: Nikel
Ni-B	: Nikel – Bor
pH	: Power of Hydrogen – Hidrojenin Gücü



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Akımsız Nikel Kaplamalarda Tercih Edilen Redükleyici Maddeler.....	8
Tablo 3.1. Akımlı ve Akımsız Nikel Kaplama Farkları	22
Tablo 4.1. Kaplama banyosu bileşimi	25
Tablo 4.2. Proses parametreleri	26





ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Akımsız ve Akımlı Kaplama Uygulamasındaki Kaplama Farklılıkları.....	5
Şekil 2.2. Nikel Sülfat Yapısı.....	7
Şekil 2.3. Yüzey Aktifleştirici Maddenin Hidrojen Molekülüne Kenetlenmesi	10
Şekil 3.1. Akımlı Kaplama Sistemlerinin Görünüşü	15
Şekil 3.2. Akımlı Kaplama Sistemlerinin Şematik Görünüşü.....	16
Şekil 3.3. Akımlı Kaplama Uygulama Alanları	17
Şekil 3.4. Akımlı Ni-B Kaplama İşlemi	21
Şekil 5.1. Farklı akım yoğunluklarında kaplanan Ni-B ve referans sert Cr kaplamaların ortalama mikrosertlik değerleri (HV) ve standart sapmaları	28
Şekil 5.2. Sürtünme katsayısı değişiminin kayma mesafesi (m) ile ilişkisi (a), aşınma hızı ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) ve yük (N)/mesafe (m) parametreleri (b)	29
Şekil 5.3. Farklı akım yoğunluğunda üretilen kaplamaların ve sert krom kaplamanın XRD grafiği.....	31
Şekil 5.4. SEM yüzey görüntüleri: (a) Ni-B (5 A/dm ²), (b) Ni-B (10 A/dm ²), (c) Ni-B (15 A/dm ²), (d) Cr ⁶⁺ sert krom. Büyütme: $\times 500$. Ölçek çubuğu: 50 μm . ..	32
Şekil 5.5. SEM kesit görüntüleri; (a) Ni-B (5 A/dm ²), (b) Ni-B (10 A/dm ²), (c) Ni-B (15 A/dm ²), (d) Sert krom. Büyütme: $\times 500$. Ölçek çubuğu: 50 μm	33
Şekil 5.6. Kaplamaların aşınma sonrası yüzey SEM görüntüsü (a) Ni-B (5 A/dm ²), (b) Ni-B (10 A/dm ²), (c) Ni-B (15 A/dm ²), (d) Sert krom	35



FARKLI AKIM YOĞUNLUKLARINDA ÜRETİLEN AKIMLI Nİ-B KAPLAMALARIN SERT KROM KAPLAMAYA ALTERNATİFLİĞİ

ÖZET

Bu tezde, ST37 kalite çelik altlıklar üzerinde akımlı kaplama yöntemiyle elde edilen nikel-bor (Ni-B) alaşım kaplamaların, Cr^{6+} içeren sert krom kaplamalara teknik ve çevresel açıdan bir alternatif olup olamayacağı kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Çalışmanın amacı, akım yoğunluğunun (5, 10 ve 15 A/dm²) Ni-B kaplamaların mikroyapı, sertlik, sürtünme ve aşınma performansı üzerindeki etkisini sistematik olarak ortaya koymak ve sonuçları sert krom referansı ile karşılaştırmaktır. Kaplamalar, standart yüzey hazırlığı sonrası asidik banyoda üretilmiş; yüzey morfolojisi ve kesit yapısı Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile, faz/atomik düzen bilgisi X-ışını Kırınımı (XRD) ile analiz edilmiştir. Tribolojik davranış, bilye-disk (ball-on-disk) tribometresi kullanılarak toplam 500 m kayma mesafesi esas alınarak belirlenmiş; sürtünme katsayısı-mesafe eğrileri ve özgül aşınma hızları üzerinden nicel karşılaştırmalar yapılmıştır. Mekanik performans, düşük yükte Vickers mikrosertlik ölçümleriyle desteklenmiştir.

Bulgular, akım yoğunluğunun kaplama kalitesi ve performansı üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. 5 A/dm² koşulunda üretilen Ni-B kaplamalarda belirgin nodüler yapı ve yer yer gözeneklilik gözlenirken, 10 A/dm² koşulunda en kompakt, homojen ve sürekliliği yüksek morfoloji elde edilmiştir. 15 A/dm²'de iri nodül oluşumları ve pürüzlülük artışıyla ilişkili yüzey kusurları belirginleşmiştir. XRD sonuçları, Ni-B kaplamalarda Ni esaslı piklerin baskın olduğunu; bor katkısının amorf/çok ince taneli karaktere yol açarak geniş tepeciklerle yansıdığını işaret etmektedir. Tribolojik testlerde 10 A/dm²'de üretilen Ni-B kaplamalar, 500 m boyunca daha kararlı ve nispeten düşük sürtünme katsayısı eğilimleri ile daha düşük aşınma oranları sergilemiş; mikrosertlik verileri de bu koşulda dengeli ve uygulamaya elverişli bir performansı doğrulamıştır. Sert krom kaplamalar yüksek sertlik ve tipik mikroçatlaklı morfoloji özelliklerine sahiptir, Ni-B akımlı kaplamanın 10 A/dm² koşulunda aşınma direnci-sürtünme davranışı-yapısal bütünlük üçlüsünde rekabetçi bir profil sunduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, Cr^{6+} içermeyen prosesin iş sağlığı-güvenliği ve çevresel üstünlükleri de dikkate alındığında, ST37 çelik üzerinde 10 A/dm² akım yoğunluğunda elde edilen Ni-B akımlı kaplama, sert krom kaplamaya güçlü bir alternatif olarak önerilmektedir. Bu sonuç, taşıt/kalıp parçaları ve genel amaçlı tribolojik bileşenler gibi endüstriyel uygulamalara doğrudan girdi sağlayacak niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Ni-B akımlı kaplama; ST37 çelik; akım yoğunluğu; bilye-disk tribometresi; triboloji; sürtünme katsayısı; özgül aşınma; mikrosertlik; XRD; sert krom alternatifi.



ELECTRODEPOSITED Ni–B COATINGS PRODUCED AT DIFFERENT CURRENT DENSITIES: VIABILITY AS AN ALTERNATIVE TO HARD CHROMIUM

SUMMARY

Background and Motivation

Hard chromium (Cr⁶-based) coatings are widely used in transportation, tooling, and general mechanical components due to their high hardness and abrasion resistance. However, occupational and environmental hazards associated with hexavalent chromium have intensified the search for technically equivalent yet safer alternatives. Among several candidates, nickel–boron (Ni–B) alloy coatings produced by current-assisted deposition (electrodeposition) have drawn increasing attention because they can combine high hardness, favorable tribological behavior, and process scalability while avoiding Cr⁶. Despite the growing body of work on Ni–B coatings, the interplay between current density, microstructural development, and tribological performance is still system-specific and requires careful optimization for a given substrate and bath chemistry.

Objective

This study systematically evaluates whether electrodeposited Ni–B coatings can serve as a viable substitute for hard chromium coatings on ST37-grade steel substrates. The primary objective is to clarify how current density (5, 10, and 15 A/dm²) governs microstructure, hardness, friction, and wear, and to benchmark these responses against a hard chromium reference. The overarching research question is: Under what deposition conditions do Ni–B coatings deliver a performance envelope that is competitive with hard chromium while providing clear health, safety, and environmental advantages?

Materials and Methods

Commercial ST37 steel coupons were prepared using standard surface treatments prior to deposition. Ni–B coatings were produced from an acidic electrolyte under three current-density conditions: 5, 10, and 15 A/dm². The study focused on isolating the effect of current density while keeping other variables constant and industrially realistic.

Microstructural and phase characterization involved:

- Scanning Electron Microscopy (SEM) for surface morphology and cross-sectional integrity,
- X-ray Diffraction (XRD) for phase/atomic-order signatures typical of Ni–B systems (e.g., broadened peaks consistent with very fine grains or partial amorphous character).

Mechanical and tribological properties were assessed via:

- Vickers microhardness at low loads to capture near-surface properties relevant to wear,
- Ball-on-disk tribometry (bilye–disk) to obtain friction vs. sliding distance curves and specific wear rates over a total sliding distance of 500 m. The tribometry protocol emphasized stability of friction signals and repeatability of wear tracks.

A hard chromium coated counterpart, prepared according to accepted industrial practice, served as a reference to contextualize the performance of Ni–B coatings. All comparative assessments were conducted on identically prepped ST37 substrates to avoid confounding from substrate metallurgy.

Results

Morphology and cross-sectional integrity. At 5 A/dm², Ni–B coatings exhibited a nodular surface with localized porosity, indicating nucleation-dominated growth and less dense coalescence. Increasing to 10 A/dm² promoted a compact, homogeneous, and continuous morphology with improved layer integrity through the cross-section. At 15 A/dm², surface roughening and coarse nodule formation became more prominent, consistent with mass-transport limitations and localized current crowding that can lead to microdefects. In contrast, the hard chromium reference showed the well-documented microcracked morphology associated with internal stresses during deposition.

Phase features. XRD patterns of Ni–B coatings were dominated by Ni-based peaks, with peak broadening consistent with very fine crystallites and/or partial amorphous character induced by boron incorporation. The evolution of peak widths across current densities suggested subtle changes in short-range order but remained within the expected envelope for electrodeposited Ni–B systems.

Microhardness. Vickers microhardness trends supported the morphological observations: the 10 A/dm² coating consistently delivered the most balanced hardness response, aligning with its dense and uniform microstructure. The 5 A/dm² coating, while serviceable, did not reach the same hardness levels, and the 15 A/dm² condition showed greater dispersion attributable to surface defects and roughness.

Friction and wear. Ball-on-disk tests over 500 m revealed that 10 A/dm² Ni–B coatings maintained more stable and generally lower friction profiles compared with the 5 and 15 A/dm² coatings. Correspondingly, specific wear rates were minimized near 10 A/dm², reflecting an advantageous combination of hardness and structural continuity. The 5 A/dm² coating exhibited higher friction transients and wear—consistent with its porosity—while the 15 A/dm² condition suffered from defect-assisted wear mechanisms. As expected, the hard chromium reference performed strongly in hardness-driven wear resistance; nevertheless, the 10 A/dm² Ni–B condition was competitive, especially when friction stability and overall integrity are taken together.

Discussion

The data demonstrate that current density is a first-order driver of Ni–B coating quality on ST37 steel. The 10 A/dm² deposition window emerges as a process optimum for this electrolyte/substrate system—balancing deposition rate, mass transport, and nucleation/growth dynamics to minimize voids and coarse nodules while preventing excessive roughness. This microstructural “sweet spot” translates directly to tribological advantages: lower and more stable friction, reduced wear, and consistent microhardness.

Placing these findings in context, the hard chromium benchmark remains formidable in terms of absolute hardness; however, its microcracked morphology can compromise integrity in certain cyclic or corrosive environments. By comparison, a dense Ni–B layer at 10 A/dm² avoids Cr⁶ hazards and achieves a balanced performance envelope that is highly attractive for general-purpose wear scenarios where a combination of hardness, toughness, and friction stability is needed.

Environmental and Regulatory Context

A key differentiator is the elimination of hexavalent chromium from the coating process. This shift reduces regulatory burden, mitigates worker exposure, and eases end-of-life considerations. For manufacturers seeking REACH/RoHS-aligned solutions and improved ESG profiles, current-assisted Ni–B represents a technically grounded pathway that does not sacrifice functional performance when properly optimized.

Limitations and Scope of Inference

The present study confines its variables chiefly to current density, a single electrolyte family, and the ST37 substrate. Although this control clarifies causality, it may limit direct extrapolation to other steels, bath chemistries, or post-treatments (e.g., heat treatments that can modify Ni–B crystallinity and hardness). Future work should consider: (i) heat treatment schedules to enhance hardness and wear further, (ii) corrosion–wear synergy in relevant media, and (iii) counterface effects under varied loads/speeds to build comprehensive life predictions.

Practical Implications

From an implementation standpoint, targeting β~10 A/dm² in similar acidic Ni–B baths on ST37 (S235JR-equivalent) substrates provides a pragmatic recipe for industrial transition away from hard chromium in many applications—particularly automotive/transport fixtures, molds/dies, and general tribological components subjected to moderate loads and sliding. The combination of Cr⁶-free processing, stable friction, and competitive wear resistance lowers barriers to adoption where compliance, worker safety, and sustainability are decisive.

Conclusions

Electrodeposited Ni–B coatings produced on ST37 steel exhibit a strong dependence on current density. Across the explored window, 10 A/dm² yielded the most favorable microstructure (dense and homogeneous) and, consequently, the best-integrated property set—balanced microhardness, lower and more stable friction, and reduced specific wear over 500 m sliding. While hard chromium maintains advantages in peak hardness, the 10 A/dm² Ni–B coating demonstrated a competitive and application-ready performance without the environmental and health liabilities of Cr⁶. These results support Ni–B at β~10 A/dm² as a credible, safer alternative to hard chromium for a broad range of industrial wear scenarios.

Original Contributions

1. A controlled, side-by-side comparison of current density effects (5/10/15 A/dm²) on Ni–B coatings over ST37 substrates, aligned to practical deposition windows.
2. An integrated property map linking SEM/XRD microstructure to microhardness, friction stability, and wear over 500 m sliding.

3. A process recommendation ($\beta \sim 10 \text{ A/dm}^2$) that balances microstructural integrity and tribological performance while removing Cr^6 from the value chain.

Keywords: Nickel–boron (Ni–B) coating; electrodeposition; ST37 steel (S235JR); current density; ball-on-disk tribometer; friction coefficient; specific wear rate; microhardness; SEM; XRD; hard chromium alternative; Cr^6 -free processing.



1. GİRİŞ

Günümüzde malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek, yüzeylerini korumak ve kullanım ömrünü artırmak amacıyla yüzey kaplama teknolojilerine duyulan ihtiyaç artmaktadır. Sürtünme, aşınma ve korozyon etkilerine maruz kalan makine parçaları, otomotiv bileşenleri ile kalıp ve kesici takımlar gibi uygulamalarda uygun kaplama seçimi sistem performansını doğrudan belirler.

Sert krom (Cr) kaplamalar; yüksek sertlik, iyi aşınma direnci, yüksek sıcaklıklara dayanım ve düşük sürtünme katsayısı gibi özellikleri nedeniyle uzun yıllardır yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, kaplama sürecinde kullanılan heksavalent krom (Cr(VI)) bileşiklerinin toksik ve çevresel açıdan zararlı olduğu bilinmekte; REACH başta olmak üzere uluslararası düzenlemeler bu kimyasalların kullanımına ciddi kısıtlar getirmektedir. Bu durum, çevreyle daha uyumlu ve güvenli alternatif kaplama teknolojilerinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır.

Bu bağlamda nikel-bor (Ni-B) alaşım kaplamaları; yüksek mikrosertlik, iyi aşınma ve korozyon dayanımı ile düşük sürtünme katsayısı gibi özellikleri sayesinde öne çıkan bir alternatiftir. Ayrıca elektrodpozisyon (akımlı kaplama) yöntemiyle uygulanabilmesi; akım yoğunluğu, elektrolit bileşimi, sıcaklık ve pH gibi parametrelerin kontrol edilmesi yoluyla kaplama kalitesinin ve performansının ayarlanmasına olanak tanır.

Bu tez çalışmasında, farklı akım yoğunluklarında (5, 10 ve 15 A/dm²) elde edilen Ni-B kaplamaların yüzey ve yapısal özellikleri SEM ve XRD ile; mekanik ve tribolojik davranışları ise mikrosertlik ve sürtünme/aşınma testleriyle değerlendirilmiş; sert krom kaplama ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Amaç, Cr(VI) içermeyen Ni-B kaplamaların uygun proses koşullarını tanımlamak ve belirli uygulamalar için sert krom kaplamalara teknik açıdan uygulanabilir bir alternatif oluşturup oluşturamayacağını ortaya koymaktır.

İstersen bu metni doğrudan dosyana yerleştirebilirsin. Bir sonraki adımda “Tezin Amacı” veya “Yöntem” bölümünü gönder; aynı disiplinle satır satır tutarlılık kontrolü yapıp geri vereyim.



2. AKIMSIZ NİKEL KAPLAMALAR

Akımsız nikel kaplamaların yapısının oldukça önemli olması nedeniyle akımsız nikel kaplamaların tanımlaması, genel özellikleri, kullanım alanları vb. tüm detaylar alt başlıklar hâlinde incelenmiştir.

2.1. Akımsız Nikel Kaplama Genel Bakış

1946 senesinde Riddell ve Brenner tarafınca geliştirilen akımsız nikel kaplama, elektrik akımı olmadan veya kullanmadan nikel iyonlarının otokatalitik indirgenmesi sonucunda yapılan kaplama çeşidi olarak görülmektedir (Veronique vd., 2012).

18.yy içerisinde İtalyan bilim adamı Giovanni Galvani tarafından elektrik akımının yol hareketi ile birlikte iletildiği bulunmuştur. Bu durum sonucunda metal iyonların 2 elektrot arasında transfer edilebilmesi sağlanmıştır. Dolayısıyla Galvani tarafından metal kaplamanın temeli oluşturduğu düşünülmektedir. Özellikle Galvaniz sözcüğünün bilim adamından ortaya çıktığı da ne kadar önemli bir buluş yaptığının göstergesi olarak kabul edilmektedir. Konu ile alakalı esas teoriyi ilerleyen dönemlerde Faraday detaylandırmıştır. Metal kaplamanın Sanayi içerisinde kullanılması ise 20.yy itibarıyla gerçekleşmiştir. Metallerin elektrokimyasal yolla kaplanması sonucunda birçok metal işleme yöntemlerinde kullanılmaya başlandığı fark edilmektedir (Saraç, 1995).

Brenner ve Riddell tarafından 1946 senesinde bulunan akımsız nikel kaplamalar kendi içerisinde 3 farklı şekilde kategorize edilmektedir. Bu üç çeşit aşağıdaki gibidir (Agarwala ve Agarwala, 2003, s. 475-493).;

- Alaşımli kaplamalar
- Kompozit kaplamalar
- Metalik kaplamalar

Akımsız nikel kaplama uygun bir alt tabakanın üzerine herhangi elektrik akımın uygulanmaması ile elde edilmektedir. Bu esnada nikel iyonlarının kimyasal redüksiyon aracılığıyla elde edilen nikel - fosfor veya nikel - bor alaşım kaplama biçiminde tanımlanmaktadır. Akımsız nikel kaplama prosedürlerinde harici bir

elektrik akımı ya da elektrot akımı kullanılmamaktadır. Dolayısıyla kaplama için gerek duyulan nikel iyonu, çözeltinin içerisinde yer alan metal tuzları tarafınca sağlanmaktadır. Bu iyonlar, yüzeyi katalitik özellik bulunduran materyal üzerinde yani çözelti içerisinde yer alan redükleyicilerin desteği ile indirgenerek nikel (Ni) metaline dönüşmektedir. Bu esnada açığa çıkan bor veya fosfor ile entegre olan nikel sonucunda bir alaşım meydana gelmektedir (Eraslan Avcıoğlu, 2015, s. 7).

Akımsız nikel kaplamaların özellikle kaplama sektörü kapsamında sık kullanılmasının esas sebebi bazı avantajları bulunmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü işlem çözelti içerisinde meydana gelmesi nedeniyle bütün parça yüzeylerinde denk kaplama kalınlığına ulaşma işlevi bulunmaktadır. Bu önemli özelliğin akımsız kaplamada bulunması, öteki kaplama yöntemleri ile yüzeyde homojen kaplama kalınlığı sağlanamayan karışık şekilli parçaların bütün yüzeylerinde eş kalınlığa sahip kaplamalar elde edilmesine imkan sunmaktadır (Krishnan vd., 2006, s. 1917-1926).

Akımsız kaplama çözeltileri içerisinde redükleyicilerin ve metal tuzunun haricinde serbest nikel iyonlarının dengelenmesi için kompleks oluşturuvcu ile redüksiyonu kontrol altına almak amacıyla stabilizör veya inhibitör maddelerin bulunması gerekmektedir. Redüksiyon için gerek duyulan enerji ise kaplama çözeltisinin ısıtılması sonucunda elde edilmektedir. Redüklenme durumu katalitik etkiye sahip olan nikel üzerinde devam etmektedir. Akımsız kaplamaların çeşitli kaynaklarda "otokatalitik kaplama" biçiminde de adlandırılmaktadır (Eraslan Avcıoğlu, 2015, s. 7-15).

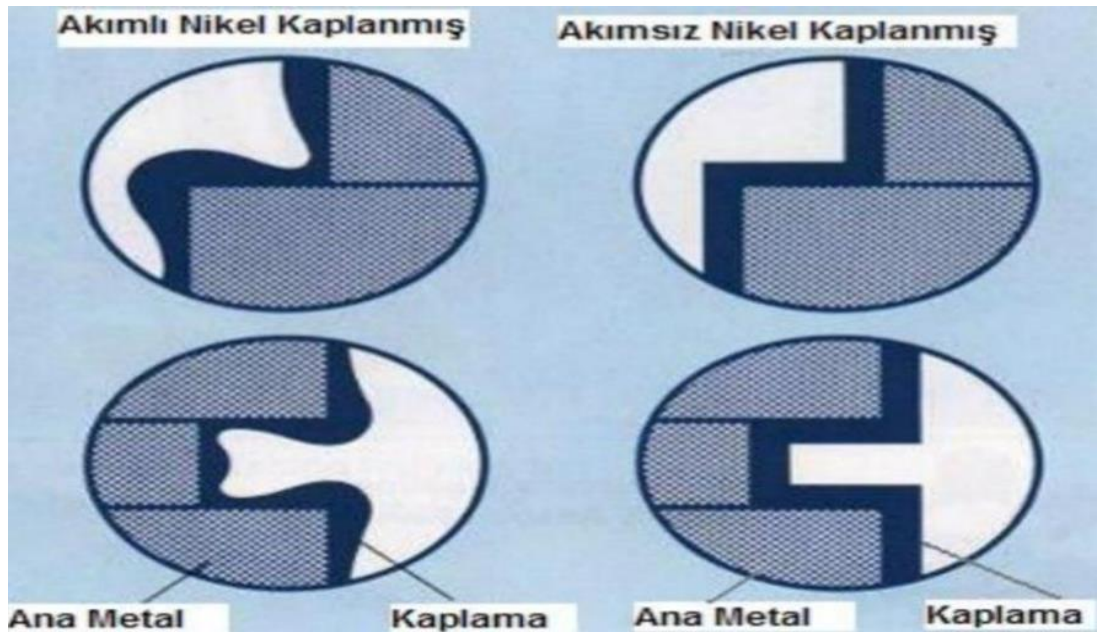
Akımsız nikel kaplamalar bir ilkel fosfor çözeltisi ile harici bir elektrik akımına gerek duyulmadan kaplama yapılmak istenen yüzeyde nikel tabakasının çeşitli kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşması ile meydana gelmektedir. Bu reaksiyon nikel çözeltisinin yüzey ile temas ettiği tüm noktalarda gerçekleşmektedir (Ploof, 2008).

Kullanılan indirgeyici ajanı bağı bir şekilde akımsız nikel kaplama yöntemi sayesinde nikel - bor, nikel - fosfor veya saf nikel tabakaları meydana getirebilmektedir. Özellikle hipofosfitli akımsız nikel kaplamaları maliyetinin düşük olması nedeniyle önemli bir avantajı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca kontrol kolaylığı ve iyi korozyonun direnci sebebiyle de bazı kesimler tarafından kullanımı tercih edilebilmektedir (Balaraju vd., 2003).

2.2. Akımsız Nikel Kaplama Özellikleri

Akımsız kaplamalar, sahip oldukları fizikokimyasal ve mekanik özellikler nedeniyle pek çok uygulamada tercih edilmektedir. Özellikle altlığa sağladıkları korozyon ve aşınma direnci, bu yöntemin kullanımını yaygınlaştırmaktadır. Bunun yanında akımsız kaplamaların öne çıkan bazı avantajları literatürde şu başlıklar altında toplanmaktadır (Çapkın, 2014, s. 6; Agarwala ve Agarwala, 2003, s. 475–493):

- Homojenlik (uniform kalınlık): Karmaşık geometrilerde dahi görece eş kalınlık.
- Yüksek sertlik: Alaşım bileşimi ve ısıtılma ile ayarlanabilir.
- Manyetik özellikler: Alaşım içeriğine bağlı ayarlanabilir manyetik/paramanyetik davranış.
- Parlaklık: Uygun katkılarla kontrol edilebilir yüzey görünümü.
- Amorf–mikrokristal katman: Ni–P/Ni–B’de sıklıkla gözlenen yapı karakteri.
- Özdirenç (elektriksel): Alaşım ve ısıtılma ile ayarlanabilir.
- Lehimlenebilirlik: Uygun yüzey hazırlığı ve bileşimle geliştirilebilir.
- Aşınmaya karşı direnç / Aşındırmaya karşı direnç: Yüzey dayanımı artışı.
- Üst düzey korozyon direnci: Özellikle Ni–P’de P içeriğine ve ısıtılma ile ayarlanabilir.



Şekil 2.1. Akımsız ve Akımlı Kaplama Uygulamasındaki Kaplama Farklılıkları

Kaynak: (Düru, 2019)

Kaplanmak istenen yüzeyin banyo çözeltisi ile temas etmesi halinde veya nikel iyonları tükenene kadar kaplama sürmektedir. Dolayısıyla kimyasal indirgeme yöntemi ile kaplama işleminden farklı bir şekilde iki yöntem daha görülmektedir. Bunlar genellikle nikel klorür ve borik asit çözeltisine çeliğin daldırılması ile Çelik tabakası üzerinden nikel karbonil buharının ayrışmasını kapsamaktadır.

Otokatalitik indirgeme reaksiyonunun tercih edilmesi ise kaplama tabakasını homojenliği noktasında önemli avantaj sunmasından kaynaklanmaktadır. Akımsız nikel kaplamalar kristali sertleştirmek amacıyla ve çökelme ile başlamak için amorf bir kafesin gerek duyulduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla yapı ve mekanik özellikleri ile ilişkisine bakıldığında mekanik çalışma için ısıtıl işlem fosfor içeriklerine ilintili bir durum görülmektedir (Agarwala ve Agarwala, 2003, s. 475-493).

2.3. Akımsız Nikel Kaplama Banyolarının Temel Bileşenleri

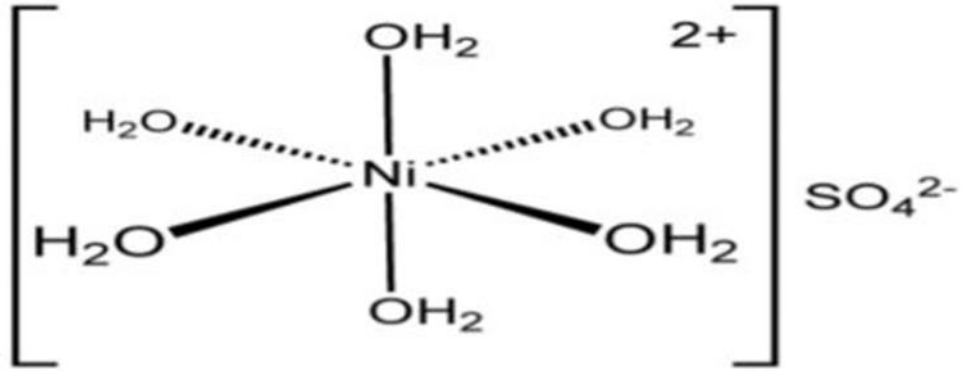
Akımsız kaplamaların sergilediği üstün fiziksel ve mekanik özellikler, büyük ölçüde kaplama banyo bileşimine; başka bir deyişle, kaplamanın elde edildiği çözelti içeriğine bağlıdır. Akımsız kaplama teknolojisinin ortaya çıkışından bu yana banyo reçetelerinde çeşitli iyileştirmeler ve ayarlamalar yapılmış olsa da temel bileşen seti esasen değişmemiştir. Bu çalışmada, akımsız kaplama banyolarında yaygın kabul gören temel bileşenler (nikel iyonu kaynağı, indirgen madde, kompleksleyici/tampon sistemleri, stabilizatör/inhibitör katkıları ve yüzey kalitesi için isteğe bağlı katkıları) alt başlıklar hâlinde ele alınmış; her birinin işlevi ve proses üzerindeki etkileri özetlenmiştir (Eraslan Avcıoğlu, 2015, s. 9–10).

Akımsız nikel kaplamada nikel iyonu kaynağı olarak Ni^{2+} kaynağı olarak uygun nikel tuzları kullanılır. Hangi tuzun tercih edileceği; saflık, çözelti uyumu, çözünürlük, tampon/iletkenlik etkisi, maliyet ve hedeflenen kaplama özellikleri gibi ölçütlere göre belirlenir. Uygulamada en yaygın nikel tuzları şunlardır (Eraslan Avcıoğlu, 2015, s. 10):

- Nikel sülfat ($NiSO_4 \cdot 6H_2O$)
- Nikel klorür ($NiCl_2 \cdot 6H_2O$),
- Nikel asetat ($Ni(CH_3CO_2)_2 \cdot 4H_2O$)
- Nikel sülfamat ($Ni(SO_3NH_2)_2 \cdot 4H_2O$)

Bu tuzların seçimi, banyoda Ni^{2+} iyon derişiminin kararlı tutulmasını, kompleksleyici/tampon sistemi ile pH kontrolünü ve kaplama hızının hedef aralıkta kalmasını sağlar. Örneğin nikel sülfat, yüksek çözünürlüğü ve yaygın bulunurluğu nedeniyle en sık tercih edilen Ni kaynağıdır; nikel klorür, çözünürlüğe katkı sağlarken belirli aralıklarda kullanılır; nikel asetat, tampon etkisiyle pH yönetimine yardımcı olabilir; nikel sülfamat ise yüksek Ni derişimi gerektiren reçetelerde tercih edilebilir. Seçim yapılırken banyonun kompleksleyici yapısı (ör. sitrat, laktat vb.), indirgen madde türü ve sıcaklık/pH çalışma aralığı ile uyumluluk mutlaka gözetilmelidir.

Yukarıdaki alternatifler arasında asidik çözeltiler için nikel sülfat ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) tuzları sıklıkla tercih edilmektedir. Akımsız kaplama uygulamalarının ilk yıllarında nikel klorür ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), Ni^{2+} kaynağı olarak yaygın kullanılmış; ancak zamanla çözeltideki klorür anyonunun kaplama yapısında çekme yönünde iç gerilmeyi artırdığı, kırılganlığı yükselttiği ve bazı koşullarda korozyon/kaplama özellikleri üzerinde olumsuz etkilere yol açtığı rapor edilmiştir. Bu nedenle nikel klorür kullanımı ikincil bir seçenek hâline gelmiş; nikel sülfat ise çözünürlük ve daha dengeli iç gerilme profili nedeniyle tercih edilir olmuştur (Mallory ve Hajdu, 1990).



Şekil 2.2. Nikel Sülfat Yapısı

Kaynak: (Çapkın, 2014, s. 11)

2.3.1. Redükleyici maddeler

Akımsız kaplama banyolarında, nikel iyonu kaynağının yanı sıra en kritik bileşenlerden biri indirgen maddelerdir. Uygulamada yaygın olarak kullanılan indirgenler sodyum hipofosfit (NaH_2PO_2), sodyum borohidrür (NaBH_4), dimetilamin boran (DMAB) ve hidrazin (N_2H_4) olarak sıralanabilir. Kaplama sırasında hidrojen

açığa çıkışı eşliğinde nikelin indirgenmesi, indirgen maddenin katalitik dehidrojenasyonu/oksidasyonu sonucunda gerçekleşir; başka bir deyişle, indirgen maddenin yüzeyde parçalanması ve elektron sağlamasıyla $Ni^{2+} \rightarrow Ni^0$ dönüşümü sürdürülür (Mallory ve Hajdu, 1990).

Tablo 2.1. Akımsız Nikel Kaplamalarda Tercih Edilen Redükleyici Maddeler

Redükleyici madde	Kimyasal formül	Serbest elektron	Çözelti pH aralığı	Redoks potansiyeli (V)
Sodyum hipofosfit	$NaH_2PO_2 \cdot H_2O$	2	4-6 ; 7-10	-1,4
Sodyum borhidrür	$NaBH_4$	8	12 - 14	-1,2
Dimetilamin boran	$(CH_3)_2NH \cdot BH_4$	6	6 - 10	-1,2
Hidranın	H_2NNH_2	4	8 – 11	-1,2

2.3.2. Kompleks oluşturucular

Akımsız nikel kaplama banyolarında çözeltideki Ni^{2+} iyonları, su molekülleri ve banyo bileşenleriyle etkileşerek koordinatif bağlar yapar. Bu ortamda “serbest nikel iyonu” ifadesi, komplekslenmemiş Ni^{2+} aktivitesini (etkin derişimini) tanımlar; pratikte Ni^{2+} ’nin önemli bir kısmı kompleks hâlinedir. Özellikle Ni–P banyolarında, serbest Ni^{2+} aktivitesinin kontrol edilememesi durumunda nikel fosfit/fosfat ya da nikel hidroksit türü istenmeyen çökeltiler oluşabilir. Bu çökeltiler, çözeltinin kimyasal dengesini bozarak kaplama kalitesini düşürür, hatta bazı koşullarda banyonun kendiliğinden ayrışmasına ve kullanılamaz hâle gelmesine yol açabilir.

Bu nedenle banyoya ilave edilen kompleks oluşturucular (genellikle organik asitler ve bunların tuzları) serbest Ni^{2+} aktivitesini kontrol altında tutarak çökelme eğilimini azaltır, pH tamponlamasına katkı verir ve banyo kararlılığını artırır. Başka bir deyişle, kompleks oluşturucular Ni^{2+} ’yi bağlayıp etkinliğini ayarlayarak homojen çökelme ve tekrar edilebilir kaplama koşulları sağlar; böylece kaplama hızı, morfoloji ve nihai özellikler üzerindeki istenmeyen dalgalanmalar sınırlandırılır (Martyak ve McCaskie, 1996, s. 62–66).

2.3.3. Hızlandırıcılar

Akımsız nikel kaplama banyolarında kullanılan kompleks oluşturucular, serbest Ni^{2+} aktivitesini düşürerek banyonun kararlılığını artırsa da, bu durum çoğu kez kaplama hızını pratik açıdan kabul edilemeyecek ölçüde düşürebilir. Bu etkiyi dengelemek için

banyoya hızlandırıcı olarak adlandırılan bazı kimyasal katkıları eklenir. Özellikle hipofosfit içeren Ni-P banyolarında, uygun hızlandırıcılar hipofosfit molekülünün katalitik yüzeyde adsorpsiyonunu ve dehidrojenasyonunu kolaylaştırır; başka bir deyişle P-H bağının aktivasyon enerjisini düşürerek yüzeydeki indirgeme hızını artırır. Uygulamada bu tip banyolarda en yaygın rapor edilen hızlandırıcılardan biri süksinik asittir. Ayrıca belirli koşullarda diğer organik asitler, çözünebilen florürler ve bazı solventler de hızlandırıcı etki gösterebilir (Baudrand, 1994, s. 954–1009).

2.3.4. İnhibitörler

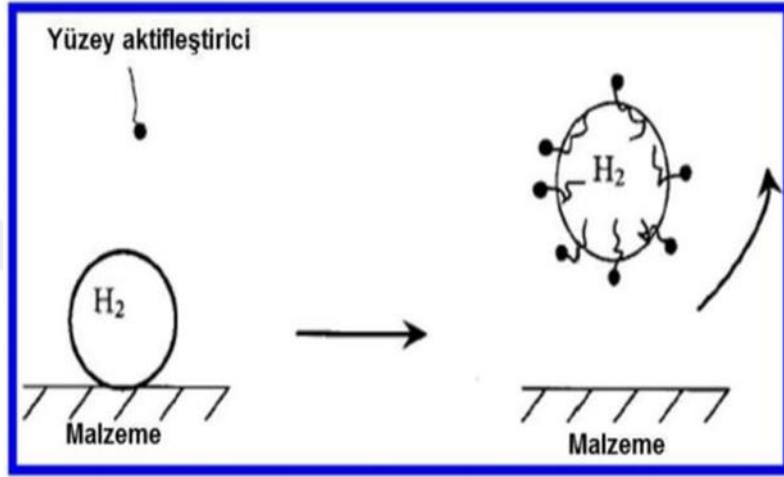
Akımsız nikel kaplama banyolarında hedef, sistemin kararlı bir çalışma aralığında tutulması ve kaplamanın uygun bir hızda ilerlemesidir. Ancak işlem koşulları uygunsuzlaştığında banyo hızla kararsız hâle geçebilir ve kontrolsüz indirgenme sonucu istenmeyen çökeltiler oluşur. Bu durumda tipik olarak metal nikelin (siyah nikel) toplu çökmesi, Ni-P banyolarında nikel fosfit/fosfat, Ni-B banyolarında nikel borat türü çökeltiler ve eşzamanlı hidrojen çıkışında ani artış gözlemlenebilir. Temel tetikleyiciler arasında yerel aşırı ısınma (hot spot), indirgen maddenin aşırı dozlanması, kolloidal/nanopartikül veya toz kontaminasyonu ile yabancı tanecikler üzerinde katalitik çekirdeklenme, iz metal iyonlarının taşınması (drag-in) ve yetersiz karıştırma sayılabilir.

Bu tür istenmeyen nükleasyon ve otokatalitik bozunma eğilimlerini bastırmak için banyoya inhibitör katkıları ilave edilir. İnhibitörler tipik olarak (i) aktif çekirdekler/partiküller üzerinde adsorpsiyon ile yüzeyi pasifleştirir, (ii) serbest Ni²⁺ aktivitesinin ve indirgenme hızının aşırı yükselmesini yavaşlatır, (iii) yan reaksiyonları sınırlandırarak banyo kararlılığını artırır ve böylece kabul edilebilir kaplama hızı ile uniform çökme korunur. Uygun inhibitör seçimi ve dozajı; banyo kimyasına (kompleksleyici–tampon sistemi), çalışma pH/sıcaklık aralığına, kullanılan indirgen maddeye (örn. hipofosfit, DMAB) ve prosesin kirlilik/kontaminasyon riskine göre belirlenmelidir. Doğru inhibitör yönetimi, kaplama kalitesinin sürekliliği ve banyo ömrünün uzatılması açısından kritik öneme sahiptir (Eraslan Avcıoğlu, 2015, s. 14).

2.3.5. Yüzey aktifleştirici maddeler

Akımsız nikel kaplama prosedürlerinde karşılaşılan temel sorunlardan biri, kaplama sırasında oluşan hidrojen kabarcıklarının yüzeyde tutunması sonucu ortaya çıkan gözenek (por) oluşumudur. Bu gözenekler, kaplamanın özellikle korozyon direncini

olumsuz etkiler. Çözeltinin karıştırılması veya iş parçasının döndürülmesi gibi yöntemler kabarcıkların uzaklaştırılmasına yardımcı olsa da tek başına yeterli ve kalıcı çözüm değildir. Bu nedenle banyo bileşimiyle uyumlu yüzey aktifleştirici maddelerin (surfaktanların) ilavesi tercih edilir. Uygun surfaktanlar, sıvı–katı ara yüzeyinde ıslatmayı iyileştirir, yüzey gerilimini düşürür ve hidrojen kabarcıklarının nükleasyon–büyüme–ayrılma döngüsünü hızlandırarak kabarcıkların yüzeye tutunmadan uzaklaşmasını sağlar (Chen vd., 2002, s. 2668–2678).



Şekil 2.3. Yüzey Aktifleştirici Maddenin Hidrojen Molekülüne Kenetlenmesi

Kaynak: (Chen vd., 2002, s. 2668-2678)

Akımsız nikel kaplama banyoları çok sayıda eşzamanlı kimyasal reaksiyonun yürüdüğü kompleks sistemlerdir. Bu nedenle eklenecek surfaktanın, banyonun kompleksleyici–tampon sistemi, indirgen maddesi (ör. hipofosfit, DMAB) ve çalışma pH/sıcaklığı ile uyumlu seçilmesi gerekir. Uygun tür ve dozajda yüzey aktifleştirici kullanımı, gözeneksiz/az gözenekli kaplama elde etmeye katkı sağlarken, bazı durumlarda banyo yüzeyi köpüklenmesini kontrol ederek ısı kaybını ve istenmeyen buharlaşmayı sınırlamaya da yardımcı olabilir. Bununla birlikte aşırı surfaktan ilavesi, kaplama hızını ve morfolojisini olumsuz etkileyebileceğinden dozaj kontrolü kritik önemdedir; optimum seviye deneysel olarak belirlenmeli ve proses boyunca izlenmelidir (Chen vd., 2002, s. 2668–2678).

2.3.6. Enerji

Akımsız nikel kaplama, yüzeyde gerçekleşen katalitik indirgenme reaksiyonlarına dayanır ve bu reaksiyonların ilerleyebilmesi için enerji girdisi gereklidir. Söz konusu enerji pratikte ısı ile sağlanır; bu nedenle banyo çözeltisinin sıcaklığı, kaplamanın

başlaması ve kararlı biçimde sürmesi açısından en kritik proses parametrelerinden biridir. Sıcaklık, banyo kinetiğini (reaksiyon hızı) ve kaplama hızını doğrudan etkiler; başka bir ifadeyle sistemin etkin aktivasyon enerjisini aşmaya yardımcı olur (Eraslan Avcıoğlu, 2015, s. 16).

Asidik hipofosfitli (Ni-P) banyolar sıcaklığa belirgin derecede duyarlıdır: ~65 °C altındaki sıcaklıklarda kaplama hızı genellikle düşüktür; sıcaklık yükseldikçe kaplama hızı artar. Benzer eğilim bor içeren (Ni-B) banyolarda da gözlenir. Bununla birlikte, ~100 °C ve üzeri sıcaklıklarda akımsız nikel banyo çözeltilerinde kararlılık kaybı ve kendiliğinden bozunma riski artar. Literatürde borhidrür (NaBH₄) içeren banyolar için tipik çalışma aralığı ~80–95 °C olarak verilirken, aminoboran/DMAB içeren banyolarda ~60–70 °C aralığı tercih edilir (Baudrand, 1994, s. 954–1009). Bu aralıklar, hem kaplama hızını yeterli seviyede tutmak hem de banyo stabilitesini korumak amacıyla seçilir.

Sıcaklığın hedef aralıkta ve üniform tutulması; yerel aşırı ısınma (hot spot), hidrojen gazı çıkışının ani artışı ve kontrolsüz nükleasyon gibi istenmeyen olguları sınırlamak açısından önemlidir. Bu nedenle proses yönetiminde etkin ısı kontrol (doğru konumlanmış ısıtıcı/ısı eşanjörü), yeterli karıştırma/sirkülasyon ve sürekli sıcaklık izleme (kalibre edilmiş sensörlerle) önerilir. Uygun sıcaklık-pH-bileşen derişimi üçlüsünün birlikte yönetimi, tekrar edilebilir kaplama kalitesi ve uzun banyo ömrü için belirleyicidir



3. AKIMLI NİKEL KAPLAMA

Akımlı (elektrodepozit) nikel kaplama, harici elektrik akımı uygulanarak elektrolitteki nikel türlerinin katot yüzeyinde metalik nikel olarak biriktirilmesine dayanan bir yöntemdir. Endüstride geniş kullanım alanı bulan bu süreçte kaplama kalınlığı, morfoloji ve nihai yüzey özellikleri; akım yoğunluğu, banyo bileşimi, pH, sıcaklık, karıştırma/sirkülasyon ve katkı maddeleri gibi parametrelerle hassas biçimde ayarlanabilir. Bu bölümde yöntemin tanımı ve temel elektrokimyasal ilkeleri, banyo bileşenleri ile katkılar, proses parametrelerinin kaplama kalitesi üzerindeki etkileri, tipik mikro yapı-özellik ilişkileri ve başlıca kullanım alanları ele alınmıştır. Değerlendirme; yüksek birikim hızı, proses esnekliği ve sertlik/aşınma dayanımı gibi avantajların yanı sıra, akım dağılımına bağlı kalınlık farklılıkları, karmaşık geometrilerde gölge etkisi ve hidrojen gelişiminin kaplama bütünlüğüne etkisi gibi sınırlılıkları da kapsamaktadır. Bölüm sonunda, akımlı Ni kaplamaların Ni-B alaşım sistemleriyle ilişkisi ve deneysel çalışmada kullanılan parametrelerle (akım yoğunluğu aralığı, banyo kimyası ve test koşulları) kurulan bağ özetlenmektedir.

3.1. Akımlı Kaplamalar

Akımlı (elektrodepozit) kaplamalar, bir metal veya alaşımın başka bir yüzey üzerine elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla ince bir tabaka hâlinde biriktirilmesine dayanan kaplama süreçleridir. Uygulamanın temel hedefi, altlığın korozyona karşı korunması ve aşınma direncinin artırılmasıdır; bunun yanında dekoratif/estetik görünüm elde edilmesi de önemli bir kullanım nedenidir. Yöntem; atmosfer basıncında, görece düşük sıcaklıklarda ve çok çeşitli banyo reçeteleriyle uygulanabildiği için ekonomik ve proses açısından esnek bir seçenek olarak geniş bir endüstriyel kullanım alanı bulur (Aydın, 2021).

Akımlı kaplamada kaplama kalınlığı, morfoloji ve yüzey özellikleri; akım yoğunluğu, banyo bileşimi, pH, sıcaklık, karıştırma/sirkülasyon ve katkı maddeleri gibi parametrelerle ayarlanır. Bununla birlikte, yöntemin doğası gereği akım dağılımı etkileri görülebilir: karmaşık geometrilerde ve keskin köşe/kenarlarda kalınlık farklılıkları (gölge etkisi) oluşabilir; hidrojen gelişimi kaplama bütünlüğünü ve

aderansı etkileyebilir. Bu nedenlerle, hedeflenen performans için proses parametrelerinin dikkatle seçilmesi ve banyo yönetiminin sürekli izlenmesi gerekir. Genel olarak akımlı kaplamalar, uygun reçete ve koşullar altında yüksek birikim hızı, geniş malzeme uyumluluğu ve yenilenebilir banyo kontrolü gibi avantajlar sunarken; akım dağılımına bağlı homojenlik sınırlamaları ve bazı banyo kimyalarının çevresel/iş sağlığı gereklilikleri gibi hususlar da göz önünde bulundurulmalıdır (Aydın, 2021).

3.2. Akımlı Kaplamaların Tarihçesi

Akımlı (elektrodepozit) kaplamalar, elektrokimyasal kaplama tekniklerine dayanan bir yöntem olup tarihçesi 18. yüzyılın sonlarına uzanır. 18. yüzyıl sonunda elektro-kimya alanındaki öncü çalışmalar, metallerin çözeltilerden elektrik etkisiyle yüzeye biriktirilebileceğine dair ilk kavrayışları oluşturmuştur. 18. yüzyıl sonlarında ve 19. yüzyılın başlarında yürütülen deneysel çalışmalar (örneğin galvanik olgunun keşfi ve elektro-kimyasal araştırmalar), elektrolitik çözeltiler kullanılarak metal kaplamaların elde edilmesine zemin hazırlamıştır (Öndüç, 2024, s. 21).

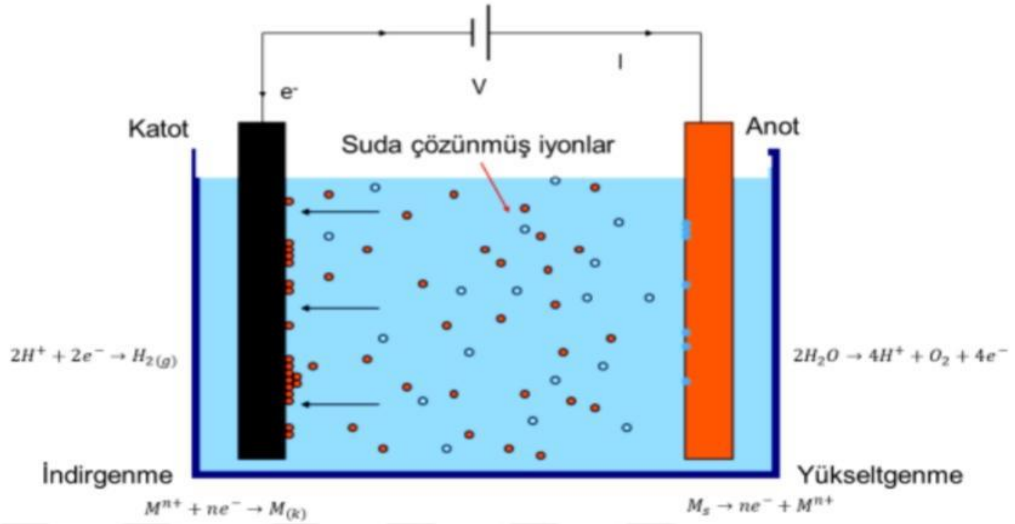
19.yüzyılın ilk yarısında konuyla ilgili uygulamalı denemeler hız kazanmıştır. 1843 yılında Becquerel, krom klorür ve krom sülfat içeren banyolarla krom kaplama elde etmeye yönelik ilk çalışmaları rapor etmiştir. Bunu izleyen yıllarda, metal iyonlarının elektrik akımı altında bir yüzeye biriktirilmesine dayanan nikel kaplama fikri literatürde yer bulmuş; elektroliz temelli süreçlerin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği tartışılmıştır. 1900'lere gelindiğinde banyo bileşimi ve proses parametrelerinin kontrolüne ilişkin önemli gelişmeler kaydedilmiş; 1935 yılı civarında kaplamalarda pH kontrolünün önemi net biçimde ortaya konmuştur. 20. yüzyılın ortasında ise Schlötter tarafından modern nikel banyolarının ticarileşmesine yönelik adımlar atılarak yöntem endüstride yaygın bir uygulama alanı bulmuştur (Raub, 1993).

Bu tarihsel süreç, elektrokimyasal ilkelerin anlaşılmasıyla başlayan kavramsal temelden, banyo kimyasının ve operasyonel parametrelerin (pH, sıcaklık, akım yoğunluğu, katkılar) kontrol edildiği modern akımlı kaplama teknolojilerine uzanan bir gelişim çizgisine işaret eder.

3.3. Akımlı Kaplamaların Çalışma Prensibi

Akımlı (elektrodepozit) kaplama; sulu bir elektrolit içinde yer alan iki elektrot (anot–katot) arasına harici elektrik akımı uygulanmasıyla, elektrot yüzeylerinde gerçekleşen

elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda metalin katot üzerinde ince bir film hâlinde birikmesine dayanır. Çözelti içindeki iyonik iletkenlik akımın taşınmasını sağlar; artı uca bağlı elektrot anot, eksi uca bağlı elektrot ise katot olarak adlandırılır. Genel olarak anotta yükseltgenme, katotta indirgenme reaksiyonları yürür (Öndüç, 2024, s. 21).



Şekil 3.1. Akımlı Kaplama Sistemlerinin Görünüşü

Kaynak: (Öndüç, 2024, s. 23)

Elektrolit, uygun nikel tuzlarının (ör. sülfat/klorür/sülfamat) sulu çözeltisi ve kompleksleyici–tampon–katkı bileşenlerinden oluşur. Uygulanan akım altında, nikel türleri katotta metalik nikel olarak birikir; böylece istenen kaplama kalınlığı ve morfolojisi elde edilir. Sürecin ekonomik, düşük sıcaklıkta ve atmosfer basıncında işletilebilmesi, yöntemi endüstride yaygın kılar.

Katot (birikim);

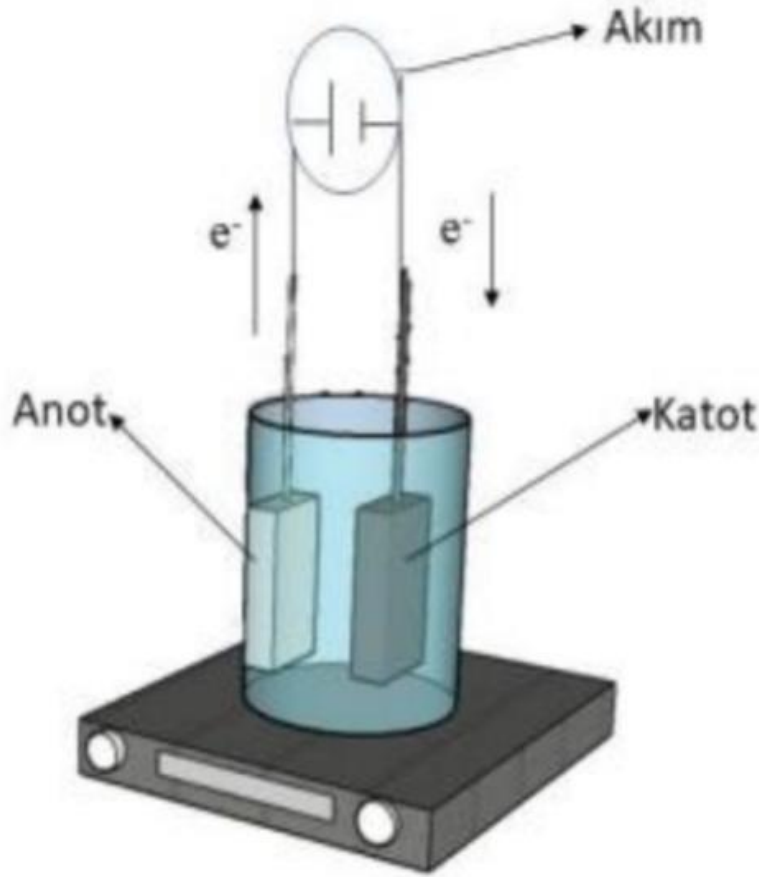
Metal türü + elektronlar → Metal Birikim

Nikel Kaplamaların Örneği;

Nikel kompleksi + e⁻ → Ni(s)

Yükseltgenme $Ms \rightarrow ne^- + Mn^+$,

İndirgenme $Mn^+ + ne^- \rightarrow M(k)$



Şekil 3.2. Akımlı Kaplama Sistemlerinin Şematik Görünüşü

Kaynak: (Öndüç, 2024, s. 23)

3.4. Akımlı Kaplamaların Uygulamaları

Saf ve alaşımlı nikelin akımlı (elektrodepozit) olarak biriktirilmesi; korozyon direnci, aşınma dayanımı, difüzyon bariyeri işlevi ve iletkenlik/temas performansı gibi nedenlerle çok sayıda endüstride kullanılır. Uygulamada seçilen nikel banyosu türü (sülfat/klorür/sülfamat), katkıları, akım yoğunluğu ve ısıtma işlemi; elde edilen kaplamanın kristal yapısını, iç gerilmesini, morfolojisini ve dolayısıyla performansını belirler. Başlıca kullanım alanları (ASM, 2002):

- Otomotiv
- Denizcilik
- Havacılık ve Savunma
- Elektronik ve mikroelektronik

- Tıp ve dişçilik
- Kalıpçılık ve takım üretimi



Şekil 3.3. Akımlı Kaplama Uygulama Alanları

Kaynak: (Öndüç, 2024, s. 20)

3.5. Akımlı Nikel Kaplamalar

Akımlı (elektrodepozit) nikel kaplama, galvanik kaplama yöntemleri arasında geniş yaygınlığa sahiptir. Parlak–yarı parlak–opak görünümler sunabilmesi nedeniyle dekoratif amaçlarla (aksesuar, trim parçalar, takılarda ara/son katman) sıkça tercih edilirken, kaynaklanabilirlik, yapışma (aderans) ve ayarlanabilir manyetik/elektriksel özellikleri sayesinde çok sayıda fonksiyonel uygulamada da kullanılır. Ayrıca korozyon direnci ve difüzyon bariyeri işlevi, otomotiv ve elektronik endüstrilerinde nikel kaplamayı kritik kılar. Uygulamada; banyo türü (tipik olarak sülfat, klorür veya sülfamat), katkıları ve akım yoğunluğu seçimiyle parlak/yarı parlak/opak kaplama rejimleri elde edilebilir (Giurlani, 2018).

Akımlı nikel banyolarında, metal matrisle birlikte ince parçacıkların birlikte biriktirilmesi (ko-birikim) ile nano-kompozit kaplamalar üretimi üzerine kapsamlı çalışmalar mevcuttur. Bu kompozitlerde, yüksek aşınma direnci, yüksek sıcaklıklarda korozyon/oksidasyon direnci, bazı sistemlerde kendi kendini yağlama gibi özellikler rapor edilmiştir. Son yirmi yılda elektrodpozit nano-kompozitlere ilgi belirgin biçimde artmış; optimum üretim koşullarının (akım yoğunluğu, sıcaklık, partikül konsantrasyonu ve boyutu, banyo bileşimi/iletkenlik, karıştırma–sirkülasyon, yüzey-aktif/dispersant seçimi) belirlenmesinin performans için belirleyici olduğu gösterilmiştir. Bu çerçevede nikel, mühendislik uygulamalarında metal matris olarak yaygın biçimde tercih edilmektedir (Vaezi, 2008, s. 176–182).

Nano-kompozit nikel kaplamalarda kullanılan tipik takviye parçacıkları arasında seramikler (örn. Al_2O_3 , SiC, ZrO_2 , TiO_2), karbürler (örn. WC), elmas ve uygulamaya bağlı katı yağlayıcılar (örn. h-BN, MoS_2) yer alır. Bu parçacıkların nikel matris içinde homojen dağılması, tribolojik performansı yükseltir; yüzey pürüzlülüğü /sertlik /mikroyapı üzerinde istenen etkiyi sağlayabilmek için parçacıkların ıslanabilirliği, yüzey yükü ve dispersiyonu uygun surfaktan/dispersant ve karıştırma stratejileriyle yönetilmelidir. Elektrodpozisyon, püskürtme/termal sprej veya sökme–yeniden kaplama gibi alternatiflere kıyasla maliyet etkinliği ve düşük proses sıcaklığı avantajlarıyla öne çıkar. Literatürde Al_2O_3 , SiC, elmas ve karbür nano/tozların nikel matrisle elektrokaplama yoluyla ko-birikimi; aşınma, manyetik, elektriksel ve korozyon gereksinimlerini aynı anda karşılayabilen yüksek performanslı kaplamalar elde etmek için yaygın biçimde incelenmektedir (Karslıoğlu ve Akbulut, 2015, s. 615–627).

Özetle, akımlı nikel kaplamalar; uygun banyo kimyası ve proses parametreleriyle dekoratif, koruyucu ve fonksiyonel hedeflere uyarlanabilir. Nano-kompozit yaklaşımlar, doğru parçacık seçimi ve dağılım kontrolü ile aşınma/korozyon/oksidasyon gereksinimlerinin birlikte optimize edilmesine olanak verir; bu da nikel kaplamayı güncel mühendislik uygulamalarında esnek ve yüksek performanslı bir seçenek hâline getirir.

3.5.1. Akımlı Ni-Co kaplamalar

Saf nikel kaplamalar, termal oksidasyona dayanım ve korozyon direnci bakımından öne çıkar. Nikelin kobalt ile alaşımlandırılması ise kaplamanın kristal yapısı,

morfolojisi ve fiziksel–mekanik özelliklerini belirgin biçimde iyileştirebilir. Akımlı Ni–Co kaplamalarda nikel ve kobaltın birlikte birikimi (ko-birikim) sırasında literatürde “anomalous co-deposition” olarak anılan olgu gözlenebilir; bu durumda daha az asil olan kobalt, beklenenden daha yüksek oranda kaplamaya katılabilir. Uygulamada Ni–Co alaşımlı kaplamaların elde edilmesi için çözünebilir kobalt tuzlarının (ör. sülfat/klorür/sülfamat türleri) elektrolite ilavesi yaygın yaklaşımdır; banyo bileşimi ve akım yoğunluğu ayarı, kaplamadaki Ni/Co oranını ve nihai özellikleri kontrol etmeye hizmet eder (Safavi vd., 2020).

Ni–Co alaşım kaplamalar, saf nikel kaplamalarla kıyaslandığında genellikle daha yüksek sertlik, iyileştirilmiş aşınma dayanımı ve iyi korozyon direnci sunabilir. Ayrıca ayarlanabilir manyetik özellikleri sayesinde manyetik kayıt ortamları/birimleri, mikroeletromekanik sistemler (MEMS) ve elektronik temas yüzeyleri gibi alanlarda değerlendirilebilir. Pürüzsüz yüzey elde edebilme ve tribolojik performans avantajı, kaplamayı otomotiv, havacılık ve diğer endüstriyel uygulamalarda da cazip kılar. Bilim ve teknolojiye ilerlemeyle birlikte, Ni–Co kaplamaların yüksek sertlik–pürüzsüzlük–stabilite kombinasyonuna ihtiyaç duyulan farklı alanlarda kullanımının artması beklenmektedir (Karslıoğlu ve Akbulut, 2015, s. 615–627).

3.5.2. Akımlı Ni-P kaplamalar

Akımlı (elektrodepozit) nikel–fosfor (Ni-P) kaplama, harici elektrik akımı uygulanarak elektrolit içindeki nikel ve fosfor taşıyan türlerin katot yüzeyinde birlikte biriktirilmesine dayanır. Bu süreç sonucunda altlık üzerinde metalik nikel matrisi içinde fosfor içeren bir alaşım tabakası oluşur. Yöntem; görsel/parlak yüzey, korozyon direnci ve aşınma dayanımı gibi hedefler için yaygın biçimde kullanılır. Uygulama sırasında kaplama kalınlığı, alaşım bileşimi (P yüzdesi) ve buna bağlı nihai özellikler; akım yoğunluğu, banyo bileşimi (nikel tuzu ve fosfor kaynağı), pH, sıcaklık, karıştırma ve katkı maddeleri gibi parametrelerle ayarlanabilir (Öndüç, 2024, s. 25).

Ni-P kaplamaların özellikleri hem üretim sırasında (proses parametrelerinin seçimi) hem de üretim sonrasında (ör. ısıtma işlemi) kontrol edilebilir. Bu sayede kaplama performansı hedef uygulamaya göre optimize edilebilir. Literatürde Ni-P kaplamaların yüksek aşınma direnci ve yüksek sertlik sunduğu; uygun ısıtma işlemleri (ör. fosfor içeriğine bağlı çökelme sertleşmesi mekanizmaları) bu özelliklerin daha da iyileştirilebildiği rapor edilmektedir (Walsh, 2009, s. 28–42). Kaplamanın elektriksel

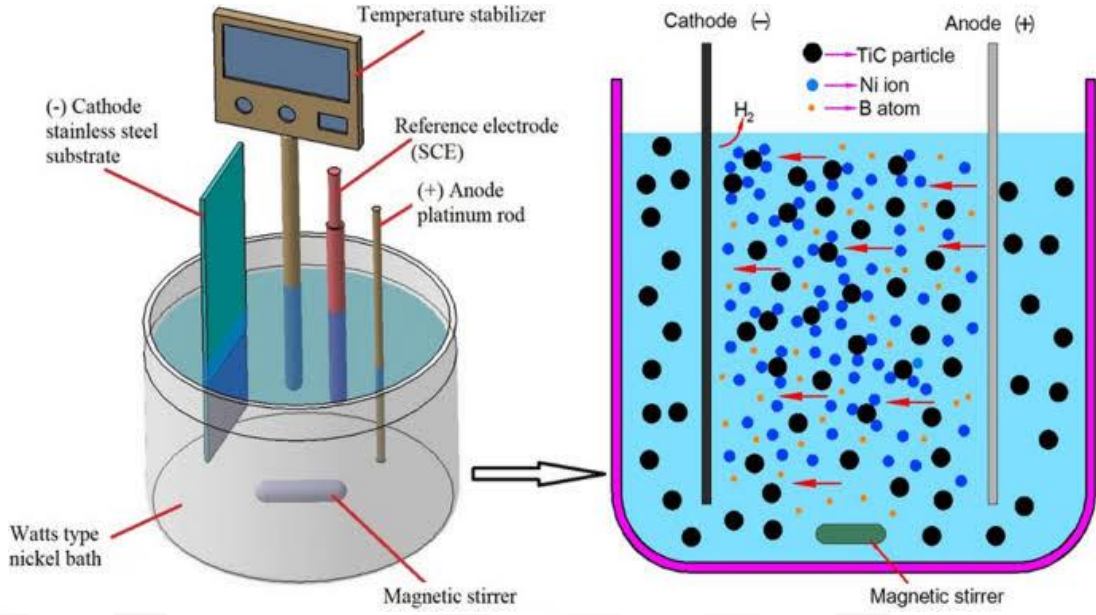
ve manyetik davranışı da fosfor içeriği ve ısıtım işlem koşullarına bağılı olarak ayarlanabilir; bu durum bazı elektronik/temas uygulamaları için avantaj sağlar.

Korozyon direnci, Ni-P sistemlerinin öne çıkan kazanımlarından biridir. Özellikle deniz suyu gibi agresif ortamlara maruz kalan parçalar için Ni-P kaplamalar korozyon etkilere karşı etkili bir bariyer sağlayabilir; bu nedenle denizcilik uygulamalarında Ni-P kaplamalara yaygın biçimde rastlanır (Walsh vd., 2020, s. 8–19). Bunun yanında otomotiv, kalıpcılık ve elektronik sektörlerinde de Ni-P kaplamalar, difüzyon bariyeri, boyut tamamlama, aşınma ve korozyon koruması gibi işlevlerle tercih edilmektedir.

Özetle, akımlı Ni-P kaplamalar; proses parametrelerinin ve sonradan uygulanabilecek ısıtım işlemlerin dikkatli yönetimi ile kalınlık–bileşim–mikro yapı üzerinde geniş bir kontrol aralığı sunar. Bu sayede dekoratif/koruyucu ve fonksiyonel gereksinimlerin birlikte karşılanabildiği, uyarlanabilir performans sağlayan bir kaplama seçeneği olarak öne çıkar (Öndüç, 2024; Walsh, 2009; Walsh vd., 2020).

3.5.3. Akımlı Ni-B Kaplamalar

Çeşitli endüstriyel süreçlerde yaygın olarak tercih edilen bir diğerkaplama yöntemi ise Ni-B (Nikel - Bor) kaplama tekniğı olarak görölmektedir. Bu kaplama yönteminde nikel ile borun entegrasyonu sonucunda elde edilen bir ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla farklı endüstrilerde aşınma direnci ve korozyon direnci gibi nedenlerden ötürü tercih edilmektedir. Aynı zamanda bu özelliklerinin dışında farklı özelliklerin artırılması amacıyla da tercih edilen yapısıyla dikkat çekmektedir. Ni-B alaşım kaplama yaklaşık 900 HV yüksek bir sertliğe sahip olması nedeniyle yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Bu nedenle başlıca amacı kaplama yüzeyindeki gücü veya mukavemeti arttırmaya yönelik olarak görölmektedir. Akımlı Ni-B kaplama yönteminde genel olarak nikel elektrolitin tercih ettiğı Watts bir banyo kullanılmaktadır (Öndüç, 2024, s. 27-28).



Şekil 3.4. Akımlı Ni-B Kaplama İşlemi

Kaynak: (<https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-023-07020-0>)

Elektrokimyasal Ni-B kaplaması için boru kaynağı olarak tremetilamin boran (TMAB), sodyum borohidrit, dimetilamin boran (DMAB) sıkça tercih edilmektedir. Ayrıca nikel - bor kaplamalarda altlık malzemesi olarak sıkça kullanılan Çelik türleri karbonlu deliklerden oluşmaktadır. Bu nedenle kaplama işlemi öncesinde bazı hazırlık prosedürlerinde yüzey temizleme işlemi yapılmaktadır. Temizlik işlemi kaplamanın kalitesini bir hayli etkileyen unsurların başında gelmektedir. Nikel ile Bor içeren elektrolit çözelti hazırlanmakta ve kaplama işlemi esnasında metal yüzeye nüfus etmektedir. Bu durum çözeltide metal iyonların kaynağı çözelti içerisinde bulunan bor ile nikel tuzlarından oluşmaktadır (Öndüç, 2024, s. 27-28).

3.6. Akımlı ve Akımsız Nikel Kaplama Farkları

Akımsız ve akımlı nikel kaplamalar birçok açıdan farklılık göstermesi nedeniyle karşılaştırma yapılmaktadır. Bu nedenle kimyasal yapılarının ve birikme mekanizmalarından birbirinden farklı olmaları sebebiyle fiziksel ve mekanik açıdan önemli farklılıklara sahip olarak görülmektedirler. Akımsız nikel kaplamalar sertlik ve aşama dirençleri bakımından Üstün özellikler gösterirken akımlı veya elektrolitik nikel kaplamalar ise oldukça iyi iletkenlik ve manyetiklik özellikleri sunmaktadır. Dolayısıyla akımsız ve akımlı nikel kaplamaların özelliklerinin karşılaştırılması aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tubun, 2013, s. 5).

Tablo 3.1. Akımlı ve Akımsız Nikel Kaplama Farkları

Kaplamanın Özelliği	Elektrolitik Kaplama	Nikel Akımsız Ni-P Kaplama
Bileşimi	+ %99 Ni	%85-98 Ni + %2-15 P
Görünüşü	Mat-Parlak	Yarı Parlak
Yapısı	Kristal	Amorf
Yoğunluk	8,9 g/cm ³	7,9 g/cm ³
Kalınlık Dağılımı	Değişken	%10
Ergime Noktası	1455 °C	~890 °C
Sertlik	40-150 VSD	500-600 VSD
Isıl İşlem Sonrası Sertlik	Etkisiz	1000 VSD
Aşınma Direnci	Orta	Çok İyi
Korozyon Direnci	İyi (gözenekli)	Çok İyi
Relatif Manyetik Duyarlılık	%36	%4
Elektriksel Direnç	7 mikroohm/cm	60-100 mikroohm/cm
Isıl İletkenlik	0,16 cal/cm.s.°C	0,01-0,02 cal/cm.s.°C
% Uzama	6-30	2
Çeliğe Göre Sürtünme Katsayısı		
Yağlanmış	Yapışma	0,38
Yağlanmamış	0,2	0,2

Kaynak: (Tubun, 2013, s. 5)

Yukarıda görüldüğü gibi akımlı ve akımsız nikel kaplamaların birbirlerinden birçok noktada ayrıştığı fark edilmektedir. Her ikisinin kendi içerisinde avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu sebeple kullanım amacına veya isteğe göre tercihlerin şekillendiği görülmektedir.

4. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde çalışmanın amaç ve kapsamı, kullanılan malzemeler, kaplama yöntemi ve karakterizasyon/deney protokolleri alt başlıklar hâlinde sunulmuştur. Böylece deneysel kurgu ile veri toplama–değerlendirme adımlarının bütüncül ve tekrarlanabilir biçimde izah edilmesi hedeflenmiştir.

4.1. Araştırmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, sert krom (Cr) kaplamalara çevresel ve teknik açıdan bir alternatif olarak akımlı Ni-B kaplamaların uygun üretim koşullarını belirlemek ve bu kaplamaların mikroyapısal ve tribolojik performansını sistematik biçimde değerlendirmektir. Bu kapsamda, 5, 10 ve 15 A/dm² akım yoğunluklarında elektrodpozit Ni-B kaplamalar üretilmiş; kaplamaların yüzey ve kesit morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş, faz bilgisi X-ışını kırınımı (XRD) ile değerlendirilmiş, mikrosertlik ölçümleri yapılmış ve tribolojik performans ball-on-disc yöntemiyle (toplam kayma mesafesi 500 m) analiz edilmiştir. Elde edilen veriler geleneksel sert krom kaplamalar ile karşılaştırılarak, kaplama kalitesi, homojenlik, gözeneklilik, tabaka bütünlüğü, sürtünme katsayısı ve aşınma direnci açısından en uygun akım yoğunluğunun belirlenmesi hedeflenmiştir. Çalışma, endüstriyel uygulamalar için dayanımı yüksek, performansı dengeli ve çevreyle daha uyumlu kaplama koşullarının nesnel olarak ortaya konmasını amaçlamaktadır.

Bu çalışmada 5, 10 ve 15 A/dm² akım yoğunlukları, Ni-B sistemlerinde mikroyapı–özellik ilişkisinin belirginleştiği temsilî bir çalışma penceresini kapsayacak biçimde seçilmiştir. Banyo kimyası, pH ve sıcaklık sabit tutularak akım yoğunluğunun bağımsız değişken olarak etkisi izole edilmiştir. Böylece morfoloji, sertlik ve tribolojik davranışa ilişkin nedensel yorum yapmaya elverişli bir deneysel tasarım elde edilmiştir.

4.2. Araştırmanın Önemi

Bu çalışma, sert krom (Cr) kaplamalara karşı çevresel ve sağlık açısından daha güvenli bir seçenek olarak akımlı Ni-B (nikel-bor) kaplamaların sistematik değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Sert krom proseslerinde kullanılan altı değerlikli krom bileşikleri önemli sağlık/çevre riskleri ve düzenleyici kısıtlar nedeniyle giderek sınırlandırılırken, endüstrinin eşdeğer performans sunabilen sürdürülebilir alternatiflere ihtiyacı artmaktadır. Bu bağlamda Ni-B kaplamalar; yüksek sertlik, iyi aşınma davranışı, düşük sürtünme katsayısı ve çatlak içermeyen yüzey morfolojisi potansiyeliyle öne çıkmaktadır.

Çalışmanın önemi üç ekseninde toplanır:

- i. Teknik katkı: Akım yoğunluğunun ($5/10/15 \text{ A/dm}^2$) Ni-B kaplama mikroyapısı, tabaka bütünlüğü, sertlik ve tribolojik performans üzerindeki etkileri aynı deneysel çatı altında ve karşılaştırmalı biçimde incelenmektedir.
- ii. Karşılaştırmalı yaklaşım: Ni-B kaplamaların bulguları, sert krom kaplamalarla doğrudan yan yana değerlendirilerek uygulanabilirlik açısından pratik bir referans sunar.
- iii. Sürdürülebilirlik odağı: Elde edilecek sonuçlar, performans–çevre uyumu dengesi gözetilerek endüstriyel uygulamalara yönelik parametre belirleme ve proses optimizasyonu için somut veri sağlayacaktır.

Literatürde Ni-B kaplamalara ilişkin çok sayıda çalışma bulunmakla birlikte, akım yoğunluğu–mikroyapı–triboloji ilişkisinin sert kromla doğrudan kıyas edildiği bütünsel çalışmalar sınırlıdır. Bu tez, söz konusu boşluğa deneysel olarak tutarlı bir çerçeve sunarak uygulanabilir proses penceresinin sınırlarını ortaya koymayı hedeflemektedir.

4.3. Araştırmanın Yöntemi

Bu çalışmada, sert krom (Cr) kaplamalara alternatif olarak akımlı Ni-B kaplamaların karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Deneysel tasarım; Ni-B kaplamaların üretimi (elektrodepozisyon), ardından çok yönlü yapısal, mekanik ve tribolojik incelemeleri içermektedir. Uygulanan başlıca yöntemler:

- X-ışını kırınımı (XRD): Faz/yarı-kristalin yapı ve tercihli yönelimlerin değerlendirilmesi.

- SEM yüzey ve kesit incelemeleri (EDS doğrulamalı): Morfoloji, kaplama sürekliliği, gözeneklilik ve ara yüzey kalitesi.
- Mikrosertlik (Vickers): Çoklu ölçümle ortalama sertlik ve dağılım.
- Triboloji – ball-on-disc: Sürtünme katsayısı–mesafe eğrileri ve özgül aşınma hızı; toplam kayma mesafesi 500 m.
- Sürtünme katsayısı analizi: Testler sırasında anlık μ takibi ve stabil rejim karşılaştırmaları.

Elde edilen tüm veriler, akım yoğunluğu (5, 10, 15 A/dm²) değişiminin Ni-B kaplamaların mikroyapısı, tabaka bütünlüğü, sertliği, sürtünme davranışı ve aşınma direnci üzerindeki etkilerini ortaya koymak üzere yorumlanmış ve geleneksel sert krom kaplamalar ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, en uygun akım yoğunluğu penceresinin belirlenmesine ve endüstriyel uygulanabilirlik açısından performans–parametre ilişkisinin netleştirilmesine hizmet etmiştir.

Tüm ölçümler standart hazırlık ve kalibrasyon adımlarıyla yürütülmüş; her numune için çoklu tekrar alınarak ortalama ve saçılım değerleri raporlanmıştır. Numune hazırlığı, cihaz ayarları ve analiz adımları tekrarlanabilir olacak şekilde belgelendirilmiştir; bu yaklaşım sonuçların iç geçerliliğini güçlendirmiştir.

4.4. Veri Toplama Süreci ve Araçları

Bu çalışmada akımlı Ni-B kaplamalar ve referans sert Cr kaplamalar, kimyasal kaplama banyolarında üretilmiş; her koşul için kaplama sonrası SEM (yüzey/kesit), XRD, mikrosertlik ve tribolojik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deneyler üç parti hâlinde (toplam ~3 hafta) yürütülmüş, her partide akım yoğunluğu set noktası 5, 10 ve 15 A/dm² olacak şekilde belirlenmiştir. Ölçümler aynı numune türü ve benzer hazırlık prosedürleriyle tekrarlanmış, sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Tablo 4.1. Kaplama banyosu bileşimi

Bileşen	Konsantrasyon (g/L)
Nikel Sülfat (NiSO ₄ ·6H ₂ O)	240
Nikel Klorür (NiCl ₂ ·6H ₂ O)	45
Borik Asit (H ₃ BO ₃)	30
TMA-B (Trimetilammonyum Borohidrid)	3
Sakkarin	1

Tablo 4.2. Proses parametreleri

Parametre	Değer
Sıcaklık	50 °C
pH	3,5
Akım yoğunluğu	5, 10, 15 A/dm²
Görev Döngüsü % (Duty Cycle)	%50
Karıştırma hızı	450–500 rpm
Elektrotlar arası mesafe	4 cm
Kaplama süresi	60dk

5. BULGULAR

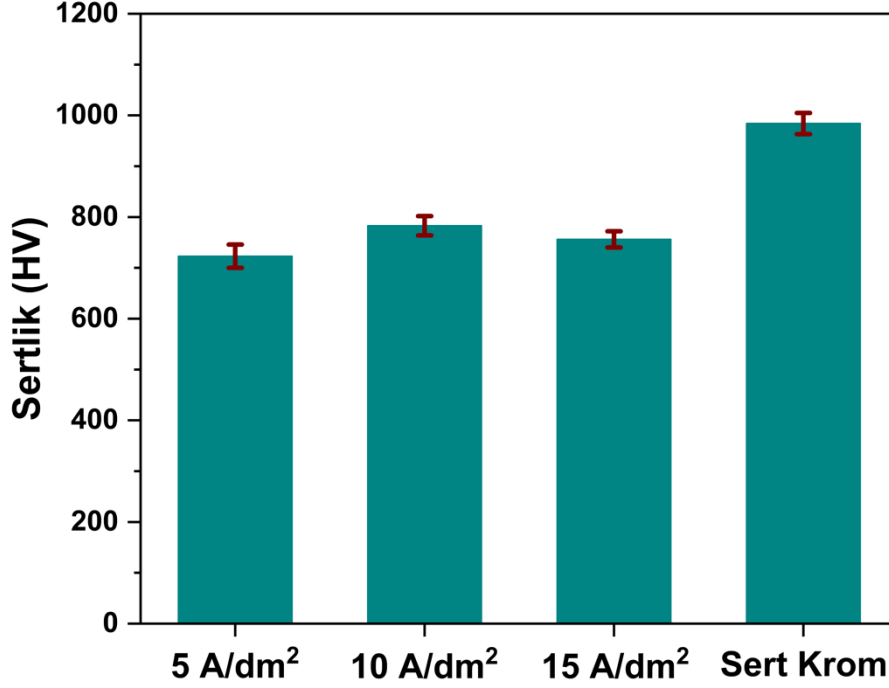
Bu çalışmada akımlı Ni-B kaplamalar (ve referans sert Cr) kimyasal kaplama banyosunda üretilmiştir. Deneyler üç parti (toplam ~3 hafta) hâlinde yürütülmüş; her partide akım yoğunlukları 5, 10, 15 A/dm² olarak uygulanmıştır. Elde edilen veriler, akım yoğunluğunun kaplama davranışına etkisini ve Ni-B'nin sert Cr'a göre konumunu ortaya koymak üzere değerlendirilmiştir.

- Sertlik Ölçümleri
- Aşınma Testleri
- X-Işınları Difraksiyon (XRD) Analiz
- SEM Yüzey/Kesit Görüntüleri
- Sürtünme Katsayısı- Kayma Mesafesi Grafikleri

Yukarıda belirtilen deneyler akımlı kaplama için uygulanmış ve 3 hafta boyunca ortaya çıkan analizler irdelenmiştir. Yapılan karakterizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen bulgular alt başlıklar hâlinde incelenmiştir.

5.1. Sertlik Ölçümleri

Sertlik ortalama ve standart sapma grafiğinde farklı numunelerin ortalama sertlik değerleri (Vickers sertliği, HV cinsinden) ve bu değerlere özgü standart sapmalar gösterilmiştir. Grafikte bulunan X ekseninde dört farklı numune yer almaktadır. Bunlar; 5 A/dm², 10 A/dm², 15 A/dm² ve Sert Cr olarak bulunmaktadır. Grafikte bulunan Y ekseninde ise ortalama sertlik değerleri (HV) verilmiştir.



Şekil 5.1. Farklı akım yoğunluklarında kaplanan Ni-B ve referans sert Cr kaplamaların ortalama mikrosertlik değerleri (HV) ve standart sapmaları

Şekil 5.1 üzerinde görülen grafiğe göre numune değerleri ve sertlik değerleri ele alındığında 5 A/dm², 10 A/dm², 15 A/dm² numuneleri farklı akım şiddetlerinde akımlı kaplanmış örnekler olarak bulunmaktadır. Sert Cr ise ticari olarak kullanılan veya geleneksel sert krom kaplama ile hazırlanmış bir referans numunesi olarak dikkat çekmektedir.

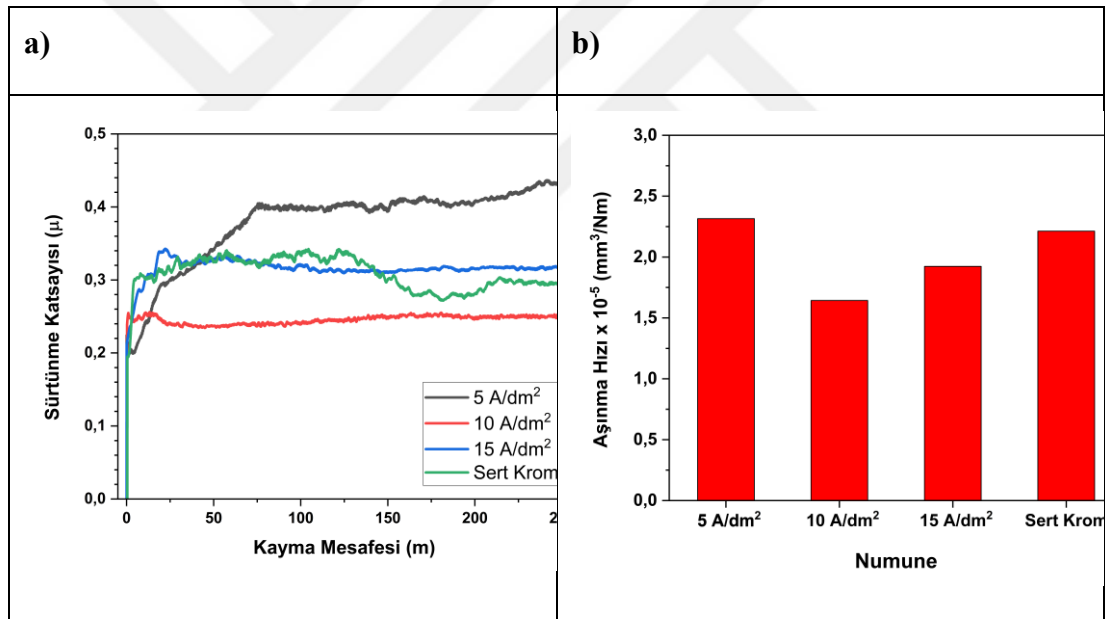
Şekil 5.1 'de farklı akım yoğunluklarında üretilen Ni-B kaplamaların ve referans sert krom kaplamanın ortalama Vickers mikrosertlik değerleri sunulmaktadır. 5 A/dm²'de üretilen Ni-B kaplamalar 723 HV, 10 A/dm²'de üretilenler 783 HV, 15 A/dm²'de üretilenler ise 756 HV sertlik göstermiştir. Karşılaştırma amacıyla incelenen sert krom kaplamanın sertliği ise 984 HV olarak belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, akım yoğunluğunun Ni-B kaplamaların sertlik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Düşük akım yoğunluğunda sertlik nispeten sınırlı kalırken, 10 A/dm²'de elde edilen kaplamalar en yüksek sertlik değerine ulaşmıştır. Bu durum, orta akım yoğunluğunda daha homojen ve kompakt mikro yapı oluşumu ile ilişkilidir (Şekil 5.4b ve Şekil 5.5b). Yüksek akım yoğunluğunda (15 A/dm²) sertlikte kısmi bir düşüş gözlenmiştir; bu, yüzey SEM görüntülerinde belirginleşen iri nodül oluşumu ve hidrojen çıkışı kaynaklı gözeneklilikle ilişkilendirilmektedir.

Literatürde ısıt işlemsiz Ni-B kaplamaların genellikle 700–900 HV aralığında sertlik sunduğu, uygun parametreler ve ısıt işlem sonrası bu değerin ~1100 HV'ye kadar çıkabildiği rapor edilmiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen değerler literatürle uyumlu olup, 10 A/dm²'de üretilen Ni-B kaplamaların sert krom kaplamalara yakın sertlik sergilediği görülmektedir. Bu bulgu, Ni-B kaplamaların çevresel açıdan zararlı sert krom kaplamalara teknik olarak güçlü bir alternatif olabileceğini desteklemektedir.

5.2. Aşınma Testleri

Aşınma testleri şekil 5.2 üzerindeki grafikte gösterilmiştir. Farklı numunelere ait aşınma hızları (mm³/Nm cinsinden) karşılaştırılmıştır. Y ekseninde aşınma hızı verilmiş, X ekseninde ise numuneler sırasıyla: 5 A/dm², 10 A/dm², 15 A/dm² ve Sert Krom olarak yer almaktadır.



Şekil 5.2. Sürtünme katsayısı değişiminin kayma mesafesi (m) ile ilişkisi (a), aşınma hızı (mm³/N·m) ve yük (N)/mesafe (m) parametreleri (b)

Şekil 5.2a'da kaplamaların kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı (μ) değişimleri, Şekil 5.2b'de ise ortalama aşınma hızı değerleri verilmiştir.

Ni-B kaplamalarda akım yoğunluğuna bağlı olarak sürtünme katsayısında belirgin farklılıklar gözlenmiştir. 5 A/dm²'de üretilen kaplamalar yaklaşık 0,30–0,32 seviyesinde bir μ değeri göstermiştir. 10 A/dm²'de üretilen kaplamalarda μ değerinin 0,25'in altında sabit kaldığı ve en düşük sürtünme katsayısını sunduğu görülmektedir. 15 A/dm²'de ise μ değerleri tekrar yükselmiş ve 0,30 civarında seyretmiştir.

Karşılaştırma amacıyla incelenen sert krom kaplama, test süresince en yüksek sürtünme katsayısını göstermiş ve μ değerleri 0,40–0,45 aralığına ulaşmıştır. Bu durum, sert krom kaplamalarda gözlenen mikroçatlaklı yapının kayma sırasında yüzeyde gerilim yoğunlaşmalarına yol açmasıyla ilişkilendirilebilir.

Aşınma hızı sonuçları (Şekil 5.2b) sürtünme davranışını destekler niteliktedir. Ni-B kaplamalarda en düşük aşınma hızı 10 A/dm² akım yoğunluğunda elde edilmiş, yaklaşık $1,8 \times 10^{-5}$ mm³/N·m seviyesinde ölçülmüştür. 5 A/dm² ve 15 A/dm²'de üretilen kaplamaların aşınma hızları nispeten daha yüksek bulunmuş, sert krom kaplamalar ise yaklaşık $2,5 \times 10^{-5}$ mm³/N·m değeriyle en yüksek aşınma hızını göstermiştir.

Bu bulgular, Ni-B kaplamalarda optimum tribolojik performansın 10 A/dm² akım yoğunluğunda elde edildiğini göstermektedir. Yüzey SEM (Şekil 5.4) ve kesit morfolojisi (Şekil 5.5) sonuçlarıyla uyumlu olarak, bu koşulda üretilen kaplamaların daha kompakt ve homojen bir yapı sergilemesi, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma direncine katkı sağlamıştır. Sert krom kaplamaların ise mikroçatlaklı yapısı nedeniyle daha yüksek sürtünme ve aşınma davranışı sergilediği tespit edilmiştir. Şekil 5.4'te farklı akım yoğunluklarında üretilen Ni-B kaplamalara ve sert krom kaplamaya ait aşınma sonrası yüzey SEM görüntüleri verilmektedir.

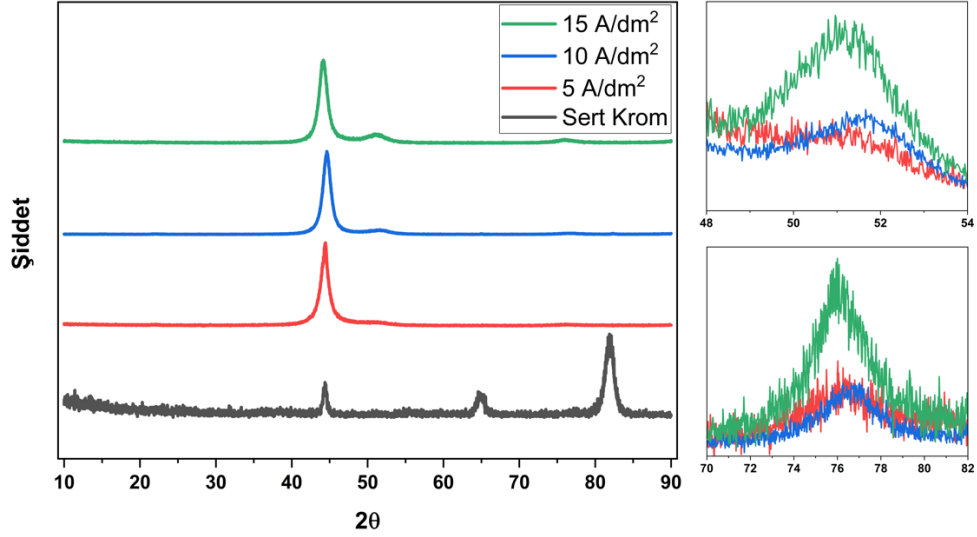
5.3. X-Işınları Difraksiyon (XRD) Analiz

Bu bölümde kaplamaların faz/yarı-kristalin yapısı ve olası tercihli yönelimleri XRD ile değerlendirilmiştir. Ölçümler Cu K α ışınımı kullanılarak standart 2 θ aralığında gerçekleştirilmiş, pik konumları ve bağıl şiddetler akım yoğunluğuna bağlı mikro-yapısal değişimleri incelemek üzere karşılaştırılmıştır.

Şekil 5.3'te farklı akım yoğunluklarında üretilen Ni-B kaplamalara ve sert krom kaplamaya ait XRD desenleri görülmektedir. Ni-B kaplamalarda, nikelin karakteristik pikleri yaklaşık 44° (111), 52° (200) ve 76° (220) 2 θ konumlarında tespit edilmiştir.

Düşük akım yoğunluğunda (5 A/dm²) Ni pikleri dar ve nispeten düşük şiddetli olup, kaplamaların ince taneli ve kısmen amorf karakter taşıdığını işaret etmektedir. Orta akım yoğunluğunda (10 A/dm²) bu piklerin keskinleştiği ve şiddetlerinin arttığı gözlenmektedir; bu durum, daha yoğun kristalleşme ve tane boyutunda büyüme eğilimi ile ilişkilendirilebilir. Yüksek akım yoğunluğunda (15 A/dm²) ise özellikle 52°

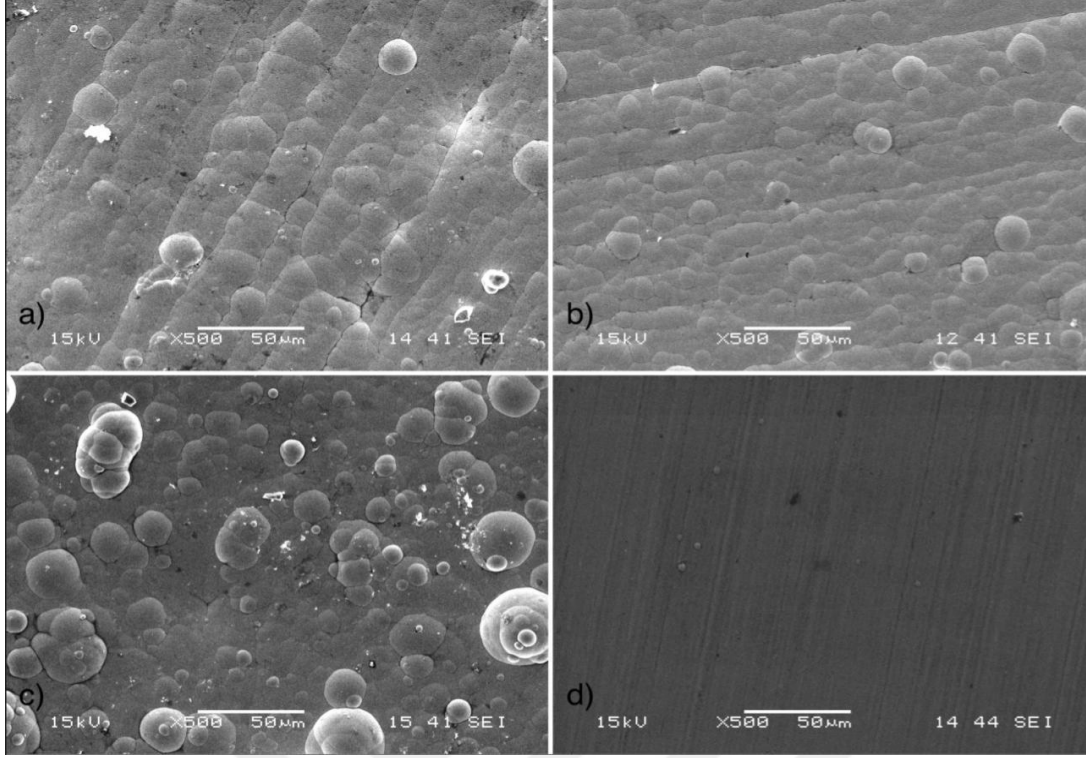
ve 76° açılarındaki (200) ve (220) yönelimli piklerin şiddeti belirgin şekilde artmıştır. Bu durum, yüksek akımda oluşan çok yönlü kristal yönelimlerini tercihli hale getirdiğini ve kaplamalarda kısmi tekstürleşmeye neden olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.3. Farklı akım yoğunluğunda üretilen kaplamaların ve sert krom kaplamanın XRD grafiği

5.4. SEM Yüzey/Kesit Görüntüleri

Şekil 5.4 üzerindeki grafikte dört farklı yüzeyin SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri yer almaktadır. Bu görüntüler 500x büyütme ile alınmış ve ölçek çubuğu 50 μm 'dir. Görseller sırasıyla şu şekilde etiketlenmiştir;



Şekil 5.4. SEM yüzey görüntüleri: (a) Ni-B (5 A/dm²), (b) Ni-B (10 A/dm²), (c) Ni-B (15 A/dm²), (d) Cr⁶⁺ sert krom. Büyütme: ×500. Ölçek çubuğu: 50 µm.

Şekil 5.4 üzerindeki grafikte görüldüğü gibi 5 A/dm², 10 A/dm², 15 A/dm² ile kaplanmış numunelere ve referans sert krom kaplamasına karşılık gelmektedir. SEM analizi sonucunda elde edilen bulgular şu şekildedir;

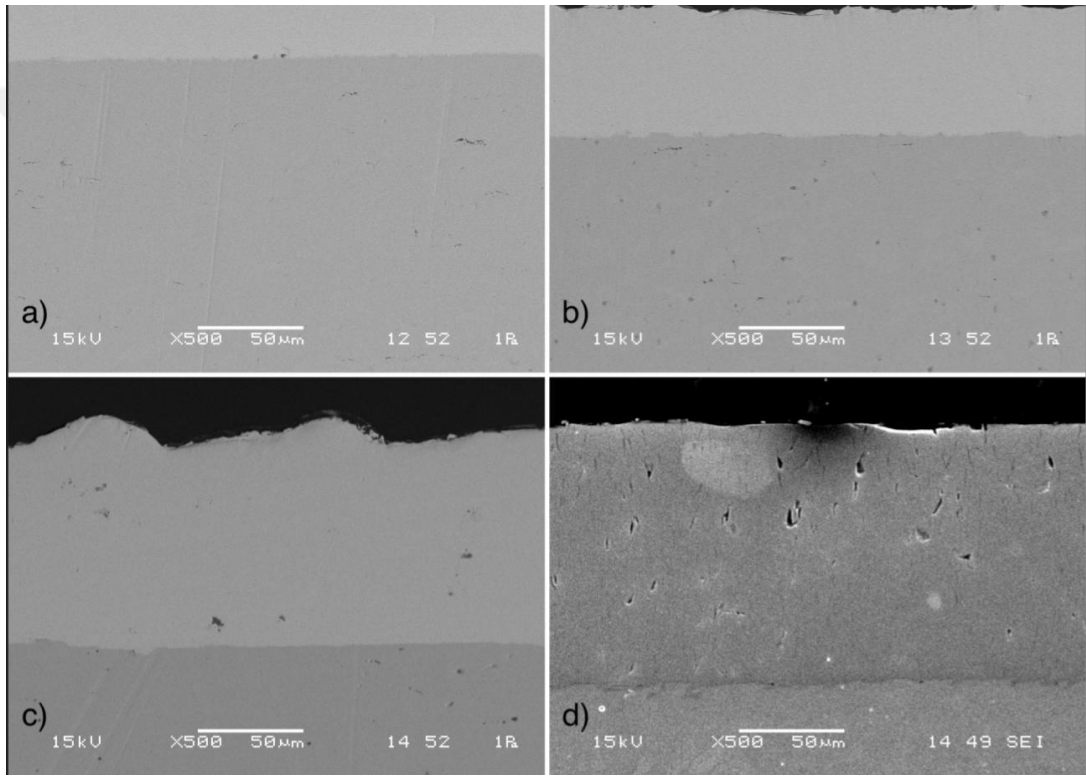
Düşük akım yoğunluğunda (5 A/dm², Şekil 5.4a) elde edilen Ni-B kaplamalar, belirgin nodüler yapıya sahip olup yüzeyde gözenekler ve mikroyapısal dalgalanmalar gözlenmiştir. Bu durum, düşük akımda iyon birikim hızının sınırlı olması ve hidrojen çıkışı ile birlikte yüzey pürüzlülüğünün artmasından kaynaklanmaktadır.

Orta akım yoğunluğunda (10 A/dm², Şekil 5.4b) üretilen Ni-B kaplamaların ise daha homojen ve kompakt bir morfolojiye sahip olduğu dikkat çekmektedir. Nodüler yapının daha ince ve düzenli dağıldığı bu numunelerde gözeneklilik azalmış, yüzey yoğun ve süreklilik gösteren bir form kazanmıştır. Bu nedenle 10 A/dm²'de elde edilen kaplamaların en uygun yüzey morfolojisini sunduğu söylenebilir.

Yüksek akım yoğunluğunda (15 A/dm², Şekil 5.4c) kaplamalarda aşırı büyümüş nodüller ve yüzeyde belirgin pürüzlülük gözlenmiştir. Hidrojen çıkışının artmasıyla oluşan bu iri nodüller, kaplamanın homojenliğini bozmakta ve lokal gerilim yığılmalarına yol açabilecek bir morfoloji oluşturmaktadır.

Karşılaştırma amacıyla incelenen sert krom kaplama (Şekil 5.4d), tipik mikroçatlaklı yapıyı sergilemiştir. Sert krom kaplamalarda sıkça raporlanan bu mikroçatlaklar, iç gerilimin yüksek olmasıyla ilişkilidir ve kaplamaların korozyon direncini olumsuz etkileyebilmektedir.

Şekil 5.5 üzerindeki grafikte kesit yüzeyleri gösterilmiştir. Ayrıca kaplanmış numunelerin kesit (cross-section) SEM analizleri olması sebebiyle kaplama kalınlığı ile tabaka bütünlüğü hakkında bilgi vermektedir. Ölçek 50 μm , büyütme 500x olması sebebiyle ilgili görsellerde her bir numunenin yüzeyden alta doğru olan yapısı ve kaplama tabakasının substratla (alt tabaka) olan ilişkisi incelenmiştir.



Şekil 5.5. SEM kesit görüntüleri; (a) Ni-B (5 A/dm²), (b) Ni-B (10 A/dm²), (c) Ni-B (15 A/dm²), (d) Sert krom. Büyütme: $\times 500$. Ölçek çubuğu: 50 μm .

Şekil 5.5 üzerindeki grafikte görüldüğü gibi 5 A/dm², 10 A/dm², 15 A/dm² ile kaplanmış numunelere ve referans sert krom kaplamasına karşılık gelmektedir. SEM analizi sonucunda elde edilen bulgular şu şekildedir;

Düşük akım yoğunluğunda (5 A/dm², Şekil 5.5a) elde edilen Ni-B kaplamalar yaklaşık 50 μm kalınlıkta olup yüzeyde dalgalı bir profil sergilemektedir. Bu durum, yüzey SEM görüntülerinde (Şekil 5.5a) görülen iri nodüller ve gözenekli yapı ile uyumludur.

Düşük akım yoğunluğu, birikim hızının sınırlı olması nedeniyle kaplama sürekliliğini artırsa da yüzey homojenliğini olumsuz etkilemektedir.

Orta akım yoğunluğunda (10 A/dm^2 , Şekil 5.5b) üretilen Ni-B kaplamaların hem kalınlık hem de yüzey sürekliliği açısından en dengeli yapı sunduğu görülmektedir. Kaplama homojen, kompakt ve altlıkla güçlü bir aderans göstermektedir. Yüzey SEM görüntüleri (Şekil 5.5b) ile karşılaştırıldığında, bu numunelerde nodüllerin daha ince ve düzgün dağıldığı, kesitte ise daha uniform bir tabaka elde edildiği açıkça görülmektedir. Bu bulgular, 10 A/dm^2 'nin optimum akım yoğunluğu olduğunu teyit etmektedir.

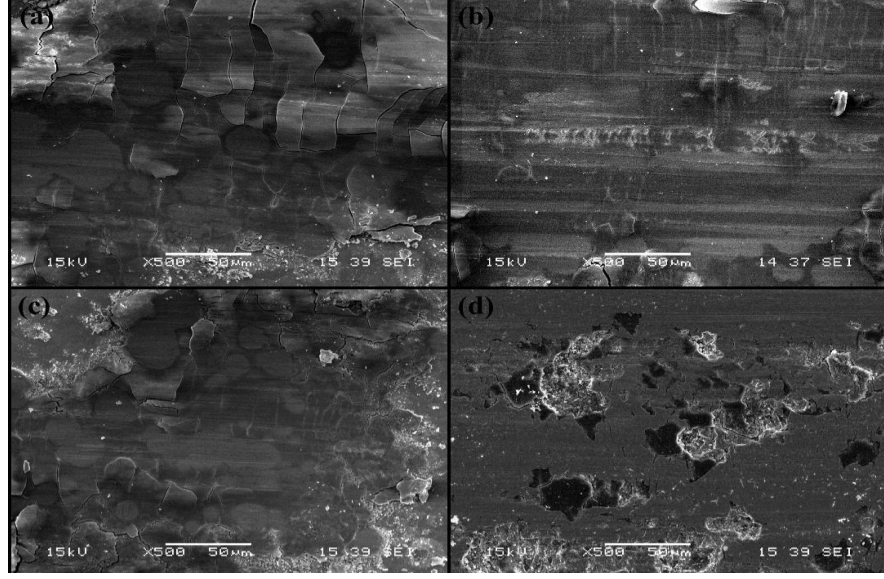
Yüksek akım yoğunluğunda (15 A/dm^2 , Şekil 5.5c) elde edilen kaplamalarda tabaka kalınlığının arttığı ancak yüzeyde dalgalı ve pürüzlü bir profil oluştuğu görülmektedir. Bu yapı, yüzey SEM görüntülerinde (Şekil 5.5c) gözlenen aşırı büyümüş nodüllerle uyumlu olup, yüksek akım yoğunluğunda hidrojen çıkışı ve lokal iyon dengesizliği nedeniyle kaplamada gözeneklilik ve yüzey düzensizlikleri artmaktadır.

Karşılaştırma amacıyla incelenen sert krom kaplama (Şekil 5.5d), tipik mikroçatlaklı morfolojisini kesitte de ortaya koymuştur. Yüzey SEM görüntülerinde (Şekil 5.5d) görülen çatlaklar, kesitte derinlemesine ilerleyen mikroçatlak ağları şeklinde belirlenmiştir. Bu durum, sert krom kaplamalarda yaygın olarak rapor edilen yüksek iç gerilim ve hidrojenin kafes dışına difüzyonu ile ilişkilidir.

5.5. Aşınma Sonrası SEM Yüzey Görüntüleri

Aşağıda bulunan (Şekil 5.6) üzerindeki SEM yüzey aşınma görüntülerinde de benzer sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Özellikle 10 A/dm^2 kaplamanın daha az aşınmaya sahip olduğu görülmüştür. Sert kroma ait d) görüntüsünde ötekilerden daha farklı aşınma yüzey sorunları fark edilmiştir. Dolayısıyla gözenekli yapının olduğu da öngörülmektedir.

5 A/dm^2 'de üretilen Ni-B kaplamalarda (Şekil 5.6a) yüzeyde paralel aşınma izleri ve lokal malzeme kayıpları gözlenmektedir. Bu durum, orta düzey sertlik (723 HV , Şekil 5.1) ve μ değerlerinin ($\sim 0,30$, Şekil 5.6a) etkisiyle aşındırıcı yüzey-toplam yük etkileşimlerinin nispeten daha belirgin olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.6. Kaplamaların aşınma sonrası yüzey SEM görüntüsü (a) Ni-B (5 A/dm²), (b) Ni-B (10 A/dm²), (c) Ni-B (15 A/dm²), (d) Sert krom

10 A/dm²'de üretilen Ni-B kaplamalarda (Şekil 5.6b) yüzeyin en az hasar gördüğü, aşınma izlerinin daha ince ve düzenli olduğu dikkat çekmektedir. Bu bulgu, bu numunenin en yüksek sertlik değerine (783 HV, Şekil 5.1) ve en düşük sürtünme katsayısına (~0,25, Şekil 5.6a) sahip olmasıyla doğrudan ilişkilidir. Ayrıca aşınma hızı değerleri de (Şekil 5.6b) bu kaplamaların en yüksek tribolojik performansı sunduğunu doğrulamaktadır.

15 A/dm²'de üretilen Ni-B kaplamalarda (Şekil 5c) yüzeyde daha geniş malzeme kayıpları ve düzensiz aşınma izleri görülmektedir. Bu durum, sertlikteki düşüş (756 HV) ve yüzey SEM görüntülerinde gözlenen iri nodül oluşumu ile ilişkilidir. Yüksek akım yoğunluğu, hidrojen çıkışı ve gözenek oluşumu nedeniyle kaplamanın tribolojik dayanımını sınırlamaktadır.

Sert krom kaplamada (Şekil 5d) ise tipik kırılgan aşınma davranışı gözlenmiş, aşınma sonrası yüzeyde geniş çaplı malzeme kopmaları ve çatlak ilerlemeleri meydana gelmiştir. Bu yapı, sert krom kaplamaların yüksek sertliğine (984 HV) rağmen mikroçatlaklı doğaları nedeniyle tribolojik performanslarının sınırlı olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, aşınma sonrası yüzey morfolojileri, sertlik ve tribolojik test sonuçlarını destekler niteliktedir. Ni-B kaplamalar içinde 10 A/dm² akım yoğunluğunda üretilen numuneler, en homojen aşınma izleri, düşük sürtünme katsayısı ve minimum malzeme kaybı ile optimum tribolojik performansı sunmuştur. Sert krom kaplamalar ise yüksek

sertliklerine rağmen mikroçatlaklı yapıları nedeniyle Ni-B kaplamalara kıyasla daha yüksek aşınma hasarı sergilemiştir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Araştırma içerisinde Sert Cr'a alternatif olarak akımlı Ni-B kaplama incelenmiştir. Bu esnada yapılan karakterizasyon analizleri ile birlikte önemli bulgular ve sonuçlar elde edilmiştir. Çalışma içerisinde elde edilen önemli sonuçların başında sertlik ölçümleri gelmektedir. 5, 10 ve 15 A/dm² numuneleri farklı akım şiddetlerinde elektrodpozisyonla kaplanmış örnekler olarak bulunmaktadır. Sert Cr ise ticari olarak kullanılan veya geleneksel sert krom kaplama ile hazırlanmış bir referans numunesi olarak dikkat çekmektedir. Sertlik değerleri incelendiğinde sert Cr numunesi, açık ara en yüksek sertlik değerine sahip olarak görülmektedir (~1000 HV civarı). Farklı akım yoğunluklarında kaplanmış üç numune ise (5 ve 15 A/dm²) yaklaşık olarak birbirine yakın (723-783 HV) (10 A/dm²)'de ise (~800 HV) sertlik değerlerinde bulunmaktadır. Bu durum, geleneksel sert krom kaplamanın hala daha yüksek sertlik sağladığını, ancak belirli elektrodpozisyon parametreleri ile elde edilen kaplamaların da kabul edilebilir sertlik seviyelerine ulaşabildiğini göstermektedir. Aynı zamanda araştırmada standart sapma analizine göre en düşük standart sapma genellikle 10 A/dm² örneğinde görülmüştür. Dolayısıyla bu akım değerinin daha homojen ve tekrarlanabilir bir kaplama sağladığı öngörülmüştür. Ayrıca, 10A/dm² numunesi en düşük standart sapmaya sahip olması nedeniyle üretim sürecinde daha istikrarlı bir yapı sunmaktadır.

Araştırma içerisinde aşınma testleri ile alakalı da önemli sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada aşınma hızları incelendiğinde 10 A/dm² akım yoğunluğu ile kaplanan numune en düşük aşınma hızına sahip olarak görülmektedir. Bu durum numunenin yüzeyinde daha dayanıklı ve kompakt bir kaplama yapısı oluştuğunu ortaya koymaktadır. 5 A/dm² numunesi en yüksek aşınma hızına sahip şekilde görülmektedir. Bu düşük akım yoğunluğunda kaplama işlemi yetersiz kalabilme veya gözenekli bir yapı oluşma ihtimali ile karşılaşmaktadır. Sert krom, genel olarak yüksek aşınma direnci ile bilinmesine rağmen grafikte, aşınma hızının 10 A/dm² numunesinden daha yüksek olduğu görülmektedir. 15 A/dm² numunesinde ise aşınma direnci, 10 A/dm² numunesinden daha düşük ama 5 A/dm² ve Sert Krom numunelerinden daha iyi seviyede olduğu fark edilmektedir. Bu durum çok yüksek akım yoğunluğunun kaplama kalitesini olumsuz etkileyebileceğini düşündürmektedir. Örnek vermek

gerekirse çatlak oluşumu, hızlı kristal büyümesi, vb. durumların oluşum riski bulunmaktadır.

Araştırma içerisinde SEM yüzey görüntüleri ile alakalı da önemli sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar ışığında 5A/dm^2 ile kaplanan yüzeyde çok sayıda küresel yapı bulunmaktadır. Dolayısıyla hidrojen gazı kaynaklı boşluklar veya gözenekler olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda çeşitli çatlak izleri görülürken kaplama kalitesinin düşük olduğu fark edilmektedir. Bu sebeple hem sertlik değeri düşük hem de aşınma direnci zayıf olduğu saptanmıştır. 10A/dm^2 ile kaplanan yüzey örneğine göre çok daha sıkı ve homojen bir yapıda görülmektedir. Küresel yapılar hâlâ görülürken daha düzenli yapısı ile dikkat çekmektedir. Bu nedenle yüzey kalitesi artmış, sertlikte artış ve aşınma direncinde iyileşme sağlanmıştır. 15A/dm^2 ile kaplanan yüzeyde çok sayıda büyük küresel yapı görülmektedir. Bu durumun aşırı gaz çıkışı ve/veya çok hızlı kristal büyümesi nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Ayrıca yüzeyin bozuk olduğu ve gözeneklerin fazla olduğu da dikkat çekmektedir. Dolayısıyla kaplamanın mekanik performansını düşme ihtimali artmaktadır. Bu sebeple aşırı akım yoğunluğu yüzeyi bozmuş olma ihtimali öngörülmektedir. Sert krom kaplama yüzeyinde ise oldukça düzgün ve neredeyse hiç küresel yapı veya çatlak gözlenmemiştir. Bu durum sert kromun geleneksel olarak yüksek aşınma direncini açıklamaktadır. Referans olarak alınan sert krom kaplama ise düzgün ve pürüzsüz bir yapı sunmuş olsa da uygun parametrelerle elde edilen yer alternatif kaplamalar, onu aşan performans sergileyebilmektedir.

Araştırma içerisinde SEM kesit görüntüleri ile ilgili önemli sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar ışığında 5 A/dm^2 akım yoğunluğu ile kaplanmış numunenin kaplama tabakası ince ve homojen görünmektedir. Fakat yüzeyde düzensizlikler ve bazı boşluklar gözlemlenmektedir. Bu boşluklar kaplama sırasında gaz çıkışı (hidrojen vb.) nedeniyle oluşma ihtimalini taşımaktadır. Kaplama kalınlığı diğerlerine göre düşük olması sebebiyle daha düşük mekanik dayanım anlamına gelmektedir. Önceki SEM ve aşınma grafiğiyle uyumlu olarak aşınma direnci düşük olarak fark edilmektedir. 10 A/dm^2 akım yoğunluğu ile kaplanmış numunenin yüzeyi oldukça düzgün ve kaplama kalınlığı homojen görülmektedir. Tabaka-substrat arayüzü net ve düzgün, delaminasyon (ayrılma) belirtileri bulunmamaktadır. Bu durum yüksek mekanik dayanım ve iyi aşınma direnci göstermektedir. En düşük aşınma hızına sahip olması sebebiyle yapısal açıdan en başarılı kaplama olarak tespit edilmektedir. 15 A/dm^2 akım

yoğunluğu ile kaplanmış numunenin kaplama kalitesi orta kalitede görülmektedir. Özellikle üst yüzeyde dalgalanma ve boşluklar gözlemlenmiştir. Bu durum çok yüksek akım yoğunluğunun neden olduğu kontrolsüz çökme ve gaz çıkışı ile açıklanmaktadır. Dolayısıyla gözeneklilik durumu artmış ve mekanik dayanım noktasında düşüş meydana gelmiştir. Aynı zamanda aşınma grafiğinde duruma paralel bir sonuç ortaya çıkmıştır. Sert krom kaplamanın kalınlığı belirgin ama yapısal olarak çatlaklar ve delaminasyon bölgeleri bulunmaktadır. Krom kaplamalarda görülebilen mikro çatlak yapıları görülmektedir. Dolayısıyla kaplamanın kırılabilirliğini ve termal gerilmelerden etkilenme ihtimalini artırmaktadır. Bu nedenle, bazı özel uygulamalarda dezavantaj oluşturma riskine sahip olarak bulunmaktadır. Ayrıca önceki grafikte, sert kromun 10 A/dm² kaplamaya göre daha fazla aşındığı gözlemlenmektedir. Bu görüntüdeki mikro çatlaklar durumu açıklayan unsurların başında gelmektedir.

Araştırma içerisinde sürtünme katsayısı ile alakalı da önemli sonuçlar elde edilmiştir. 10 A/dm² (Kırmızı çizgi), hızlı bir artıştan sonra sürtünme katsayısı ~0,24 seviyesinde sabitlenmiştir. Yüzey düzgünlüğü ve kaplama homojenliği nedeniyle minimum aşınma ve stabil sürtünme sağlanmıştır. Bu nedenle, tribolojik açıdan en uygun kaplama parametresi olarak olduğu düşünülmektedir. 5 A/dm² (Siyah çizgi), sürtünme katsayısı 0,45'e kadar yükselmiştir. Bu yüksek değer, yüzeyin düzensizliği, porozite ve kaplamadaki mikro çatlaklardan kaynaklanmaktadır. SEM görüntüsünde yüzeyde pürüzlü yapı ve boşluklar belirginleşmiştir. Aşınma ve enerji kaybı yüksek olması nedeniyle bu kaplama yeterince etkin kabul edilmemektedir. 15 A/dm² (Mavi çizgi), sürtünme katsayısı yaklaşık 0,32 civarında tespit edilmiştir. Başlangıçta iyi görünse de zamanla dalgalanma göstermektedir. Bu durum yüzeyin homojen olmamasından kaynaklanmaktadır. Yüksek akım yoğunluğu kontrolsüz çökmeye neden olma ihtimalini taşımaktadır. Sert Krom (Yeşil çizgi), sürtünme katsayısı 0,30 civarında görülmektedir. Başlangıçta stabil olsa da ilerleyen mesafelerde dalgalanma başlamıştır. Sert krom kaplamalarda görülen mikro çatlaklar ve kırılabilir yapı, sürtünme katsayısının artmasına neden olma ihtimaline sahip olarak görülmektedir. 10 A/dm² kaplamaya göre daha az stabil bir sürtünme performansı sergilemiştir.

Araştırma sonucunda 10 A/dm² kaplamanın birçok açıdan en verimli özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Özellikle kaplamanın sorunsuz ve gözeneklilik açısından minimum hataya sahip olduğu denek olarak 10A/dm² kaplaması saptanmıştır. Bu nedenle Sert Cr'a alternatif olarak 10A/dm² koşullarında Ni-B akımlı kaplamanın iyi

bir alternatif olacağı düşünülmektedir. 10 A/dm²'de üretilen elektrodpoze Ni-B, homojen/kompakt morfoloji, düşük COF ve düşük özgül aşınma hızıyla, çevresel açıdan sorunlu Sert Cr'a uygulanabilir bir alternatiftir.



KAYNAKLAR

- Agarwala R.C. & Agarwala V., (2003). Electroless alloy/ composite coatings: A review, *Sadhana*, 475-493.
- ASM International, (2002). ASM Handbook, Volume 5: *Surface Engineering*.
- Aydın, M., (2021).Dubleks Ni-P/Ni-Mo BN(h) Kompozit Kaplamaların Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, *Sakarya Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya.
- Balaraju, J. N., Sankara Narayan T. S. N. ve Seshadri S. K., (2003). Electroless Ni–P Composite Coatings, *Journal of Applied Electrochemistry*.
- Baudrand, D. W., (1994). Electroless Nickel Plating, In ASM Metals Handbook Volume 5 – *Surface Engineering* (pp. 954–1009).
- Cao, G., (2008), Template-based Synthesis of Nanorod, *Nanowire and Nanotube Arrays*, *Adv. Colloid Interfac. Sci.*, 136: 45-64.
- Chen, B. H., Hong, L., Ma, Y. & Ko, T. M., (2002). Effects of Surfactants in an Electroless Nickel-Plating Bath on the Properties of Ni–P All Deposits, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41, 2668–2678. Doi:10.1021/ie0105831.
- Çapkın, M. S., (2014). Akımsız Kaplama Tekniği Kullanılarak Astm A105 Kalitede Çeliğin Nikel Kaplanması; Mikro Yapısına, Korozyon Direncine ve Sertliğine Isıl İşlem Etkisinin İncelenmesi, *Anadolu Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi*, Bilecik.
- Düru, E., (2019). Tin partikül takviyeli akımsız nikel bor kompozit kaplamalar, *Sakarya Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya.
- Eraslan Avcıoğlu, S., (2015). Akımsız Ni-P, Ni-B ve Ni-W-B Kaplamaların Yüksek Sıcaklık Oksidasyon ve Camla Etkileşim Davranışlarının İncelenmesi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi*, İstanbul.
- Giurlani, W., Zangari, G., Gambinossi, F., Passaponti, M., Salvietti, E., Di Benedetto, F., Caporali, S. & Innocenti, M., (2018). Electroplating for Decorative Applications: Recent Trends in Research and Development, *Coatings* 2018, 8, 260.
- <https://dergipark.org.tr/tr/>
- <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-023-07020-0>
- <https://scholar.google.com/>
- <https://www.astm.org/>
- <https://www.iso.org/standards.html>
- <https://www.iso.org/standards-catalogue/browse-by-ics.html>
- <https://www.sciencedirect.com/browse/journals-and-books>

- Karşlıoğlu, R., & Akbulut, H., (2015). Comparison microstructure and sliding wear properties of nickel–cobalt/CNT composite coatings by DC, PC and PRC current electrodeposition, *Applied Surface Science*, 353, 615–627.
- Kılıçaslan MF, Yılmaz Y, Akgül B, Karataş H, Vurdu CD. Effect of Fe–Ni substitution in FeNiSiB soft magnetic alloys produced by melt spinning. *Advances in Materials Science*, 21(4), 79–89 (2021). doi:10.2478/adms-2021-0026
- Krishnan, K. H., John, S., Srinivasan, K. N., Praveen, J., Ganesan, M. & Kavimani, P. M., (2006). An Overall Aspect of Electroless Ni-P Depositions — A Review Article. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37, 1917–1926.
- Mallory, G. O. & Hadju, J. B., (1990). Electroless Plating: Fundamentals and Applications, *American Electroplaters and Surface Finishers Society*, New York- USA.
- Martyak, N. & McCaskie, J., (1996). Speciation in electroless nickel solutions, *Plating and Surface Finishing*, 93, 62–66.
- Ploof, L., (2008). Electroless Nickel Composite Coatings, *Sirius Technology, Inc. Oriskany*, New York.
- Raub, C., (1993), The History of Electroplating, *Butterworth-Heinemann Ltd*, United Kingdom.
- Safavi, M. S., Tanhaei, M., Ahmadipour, M. F., Ghaffari Adli, R., Mahdavi, S., & Walsh, F. C., (2020). Electrodeposited Ni-Co alloy-particle composite coatings: A comprehensive review, *Surface and Coatings Technology*, 382, 125153.
- Saraç, A. S., (1995). Metal Kaplama ve Elektrokimyasal Teknolojiler, *Çağlayan Kitabevi*, İstanbul.
- Tubun, N. E., (2013). Nano Elmas Takviyeli Akımsız Nikel- Bor Kaplamalar, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- Vaezi, M. R., Sadrnezhaad, S. K. & Nikzad, L., (2008). Electrodeposition of Ni–SiC nano-composite coatings and evaluation of wear and corrosion resistance and electroplating characteristics, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 315(1–3), 176–182.
- Veronique, V., Abdoul-Fatah K. & Delaunois, F., (2012). Evolution of Reactive Concentration during Borohydride-Reduced Electroless Nickel-Boron Plating and Design of a Replenishment Procedure, *American Chemical Society*, USA.
- Walsh, F. C., Wang, S. & Zhou, N., (2020), The Electrodeposition of Composite Coatings: Diversity, Applications and Challenges, *Current Opinion in Electrochemistry*, 20, 8-19.
- Walsh, F.C., (2019), Modern Developments in Electrodes for Electrochemical Technology and the Role of Surface Finishing, *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 97(1), 28-42.
- Yılmaz Y, Akbulut H, Uysal M. Effect of NaBH₄ concentration on hardness and microstructural properties of electroless deposited St-37 steel. *European Journal of Science and Technology (EJOSAT)*, (39), 118–121 (2022). doi:10.31590/ejosat.1140395

Yılmaz Y, Yılmaz Ş, Yılmaz A. Eco-friendly organic inhibitors for enhancing the corrosi

Yılmaz Y. Ni-B akımsız kaplamalarda bor konsantrasyonunun optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya (2019).



EKLER

EK-A. Deney ham verileri ve özet tablolar

Bu ekte, 5/10/15 A/dm² numunelerine ait mikrosertlik ham ölçümleri, sürtünme katsayısı–mesafe (toplam 500 m) verileri ve aşınma hızı hesaplamasında kullanılan ara değerlerin özet tabloları bulunmaktadır. Dosyalar; Hardness_raw_all.xlsx, COF_500m_serileri.csv, WearRate_hesap.xlsx

EK-B. Kaplama banyosu ve proses günlükleri

Elektrolit bileşimi, pH–sıcaklık–süre kayıtları ve ön temizleme adımlarının kısa dökümü. Dosyalar (örnek): Bath_recipe_logbook.pdf, Process_log.xlsx

EK-C. SEM/EDS görselleri ve kalınlık ölçümleri

Farklı büyütmelerde yüzey/ kesit görüntüleri ve birden çok noktadan kalınlık ölçümleri. Dosyalar (örnek): SEM_surface_ek.tif, SEM_cross_section.tif, Thickness_map.xlsx

EK-D. XRD ham dosyaları ve pik listeleri

Ham spektrum dosyaları (.txt/.xy), pik listeleri ve (varsa) Rietveld özet çıktıları. Dosyalar (örnek): XRD_raw_10Adm2.txt, XRD_peaklist.csv, Rietveld_ozet.pdf

EK-E. Cihaz/kalibrasyon ve standartlar (kısa)

Kullanılan cihazların marka-model bilgileri, kalibrasyon sertifikaları ve uygulanan ASTM/ISO adımlarının kısa özeti. Dosyalar (örnek): Equipment_list.pdf, Calibration_sertifikalar.pdf, Standart_akisi.pdf



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Yasin UĞUR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- • 2021-2022 yılları arasında ATEŞ DEMİR VE ÇELİK TİCARET LİMİTED ŞİRKETİ'nde Metalurji ve Malzeme Mühendisi olarak çalıştı.
- • 2022-2023 yılları arasında Erda Bilimsel Araştırma Şirketi firmasında Metalurji ve Malzeme Mühendisi olarak çalıştı.
- • 2025 yılı Ocak ayında Neova Sigorta'da Risk Mühendisi olarak çalışmaya başladı.