

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**CIVATALARIN ÇİNKO NİKEL ELEKTROKAPLANMASI SIRASINDA
OLUŞAN HİDROJEN GEVREKLİĞİ VE KAPLAMA
PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU**

HAZIRLAYAN

MEHMET CAN ALTINTAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA - 2024

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

CIVATALARIN ÇİNKO NİKEL ELEKTROKAPLANMASI SIRASINDA
OLUŞAN HİDROJEN GEVREKLİĞİ VE KAPLAMA
PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

HAZIRLAYAN

MEHMET CAN ALTINTAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. EBRU SARALOĞLU GÜLER

ANKARA - 2024

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 16 / 01/ 2024

Tez Adı: Cıvataların Çinko Nikel Elektrokaplanması Sırasında Oluşan Hidrojen Gevrekliği Ve Kaplama Parametrelerinin Optimizasyonu

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)

İmza

Doç. Dr. Ebru SARALOĞLU GÜLER, Başkent Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Batur ERCAN, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Uğur KEMİKLİOĞLU, Başkent Üniversitesi

.....

ONAY

Prof. Dr. Faruk Elaldı

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih : ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS / DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 16 / 01 / 2024

Öğrencinin Adı, Soyadı:Mehmet Can ALTINTAŞ

Öğrencinin Numarası:21820040

Anabilim Dalı:Makine Mühendisliği

Programı:Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı:Doç. Dr. Ebru SARALOĞLU GÜLER

Tez Başlığı: Cıvataların Çinko Nikel Elektrokaplanması Sırasında Oluşan Hidrojen Gevrekliği Ve Kaplama Parametrelerinin Optimizasyonu

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans/Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 80 sayfalık kısmına ilişkin, 08 / 01 / 2024 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2'dir. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

Tarih: ... / ... /

Öğrenci Danışmanı Doç. Dr. Ebru SARALOĞLU GÜLER

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında ve yüksek lisans eğitimim boyunca bana inanan ve değerli bilgilerini benimle paylaşan çok değerli tez danışmanım Doç. Dr. Ebru Saraloğlu Güler'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca benden desteğini esirgemeyen, motivasyonumu yüksek tutan ve bana inanan sevgili eşim Ayşenur Altıntaş'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması boyunca maddi manevi imkanlarını esirgemeyen bu tezi yapmamda destek olan FNSS kalite birimi direktörü İhsan Karaman'a, kimyasal laboratuvar lideri Muzaffer Gökçe'ye, mekanik laboratuvar lideri Buğra Atasoy'a , Şef Mühendis Barış Koç'a , kalite lideri Can Yalçın'a , kalibrasyon lideri Esat Bölükbaşı'na teşekkürlerimi sunarım.

Akademik kariyere sahip olmam için çokça fedakârlık yapan değerli annem Emine Altıntaş, babam Mahmut Naci Altıntaş'a ve abim Tunç Altıntaş'a en derin şükranlarımı sunarım.

ÖZET

Mehmet Can ALTINTAŞ

CIVATALARIN ÇİNKO NİKEL ELEKTROKAPLANMASI SIRASINDA OLUŞAN HİDROJEN GEVREKLİĞİ VE KAPLAMA PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

2024

Günümüz üretim dünyasında parça üretmek kadar parçaların özelliklerini kaybetmeden fonksiyonel olarak çalışması da büyük önem arz etmektedir. Otomotiv ve savunma sanayide dış etkenlerden korunması için parçalara kaplama gibi yüzey iyileştirme işlemleri yapılmaktadır. Özellikle çinko nikel kaplamalar, endüstriyel uygulamalarda geniş bir yelpazede kullanılan koruyucu kaplamalardır. Bu kaplamaların kalitesi ve dayanıklılığı, kaplama sırasında oluşan hidrojen gevrekliği gibi konular mühendislik sorunlarını ele almak açısından büyük önem taşır. Hidrojen gevrekliği, kaplamaların dayanıklılığını etkileyen ve kritik bileşenlerin çatlamasına yol açabilen bir sorundur. Bu tezin konusu, cıvataların çinko nikel elektrokaplanmaları sırasında oluşan hidrojen gevrekliğini incelemek ve kaplama parametrelerinin hidrojen gevrekliği üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Bu tez kapsamında cıvata kaplama düzeneği oluşturulmu ve akım yoğunluğu, sıcaklık, kaplama süresi gibi kaplama parametrelerinin farklı değerleri ile kaplanan numuneler EN ISO 15330 standardına uygun olarak tork testine tabi tutulmuştur. Test sonrası numunelerdeki çatlaklar taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda cıvatalar için en uygun akım yoğunluğu parametresi 2.5 Amp/dm² bulunmuştur. Optimal asitte kalma süresi ise 15 dakika olarak belirlenmiştir. Kaplama sıcaklığının hidrojen gevrekliğine bir etkisi olmadığı tespit edilmesine karşın kaplama kalınlığında önemli bir rol oynadığı sonucuna varılmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Electrokaplama, Hidrojen gevrekliği, Kırılma analizi, Çinko-nikel kaplama

ABSTRACT

Mehmet Can ALTINTAŞ

INVESTIGATION OF HYDROGEN EMBRITTLEMENT IN ZINC NICKEL COATINGS OF BOLTS AND OPTIMIZATION OF COATING PARAMETERS

Baskent University Institute of Science and Engineering

Department of Mechanical Engineering

2024

In today's manufacturing landscape, it is crucial that components operate efficiently while retaining their properties, in addition to the manufacturing. Surface improvement processes such as coating are applied to the parts to protect them from external factors especially in automotive and defense industries,. Zinc-nickel coatings, in particular, are protective coatings used in a wide range of industrial applications. Issues such as the quality and durability of these coatings and hydrogen embrittlement occurring during coating are of great importance in addressing engineering problems. Hydrogen embrittlement is a problem that affects the durability of coatings and can lead to cracking of critical components. The subject of this thesis is to examine the hydrogen embrittlement that occurs during zinc-nickel electroplating of bolts and to investigate the effects of coating parameters on hydrogen embrittlement. Within the scope of this thesis, a bolt coating mechanism was created and the samples coated with different values of coating parameters such as current density, temperature and coating time were subjected to torque testing in accordance with the EN ISO 15330 standard. After the test, cracks in the samples were examined with a scanning electron microscope. As a result of the studies, the most suitable current density parameter for bolts was found to be 2.5 Amp/dm². The optimal acid holding time was determined as 15 minutes. It was concluded that the coating temperature had no effect on hydrogen embrittlement.

KEY WORDS: Electroplating, Hydrogen embrittlement, Fracture analysis, Zinc-nickel plating.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
KISALTMA LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tez Konusu ve Amacı	3
1.2. Genel Bilgiler	4
1.2.1. Kaplama Yöntemleri.....	4
1.2.2. Hidrojen Gevrekliği	11
1.2.3. Elektrokaplama ve Hidrojen Gevrekliği.....	13
1.3. Literatür Özeti.....	15
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	17
2.1. Kaplama Düzeneği	17
2.2. Elektro kaplama işlemi	19
2.2.1. Numune Temizleme İşlemi	19
2.2.2. Elektro Kaplama Banyosu.....	20
2.2.3. Ön Deneyler	22
2.2.4. Kaplama Parametreleri	23
2.2.5. İlave Deneyler	25
2.3. Hidrojen Gevrekliği Testi için Cıvata Numunesi	26
2.4. Çekme Testi	27
2.5. Tork Testi Düzeneği	28
2.6. Taramalı Elektron Mikroskop İncelemeleri.....	32
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	33

3.1. X-Işını Floresans analizi ve sonuçları.....	33
3.1.1. Ön Deneyler	33
3.1.2. Cıvataların XRF sonuçları	35
3.3. Tork Testi.....	36
3.3.1. Deney Planındaki Tork Test Sonuçları	38
3.3.2 İlave Deneyler	42
3.4 Taramalı Elektron Mikroskop Analizi.....	46
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	51
KAYNAKLAR.....	53



EKLER

EK 1: Kaplama İnceleme Raporu

EK 2: Çekme Testi Raporu

EK 3: Kaplama İnceleme Raporu

EK 4: Kaplama İnceleme Raporu

EK 5: Kaplama İnceleme Raporu

EK 6: Kaplama İnceleme Raporu

EK 7: Kaplama İnceleme Raporu

EK 8: Kaplama İnceleme Raporu

EK 9: Kaplama İnceleme Raporu



TABLolar LİSTESİ

	SAYFA
Tablo 1.1 Dış etkenlere bağılı olarak yüzeydeki değışimler [1].....	3
Tablo 1.2 Fonksiyonel yüzeyleri korumak için kullanılan Kaplama İşlemleri [3].....	5
Tablo 2.1 Kaplama banyo elemanları.....	17
Tablo 2.2 Asit banyo içerikleri.....	19
Tablo 2.3 Kaplama banyosunda kullanılan kimyasal oranı	21
Tablo 2.4 Parametreler ve değer aralıkları	24
Tablo 2.5 Kaplama parametreleri farklı 10 adet M10 cıvataların kaplama parametreleri	25
Tablo 2.6 M10 cıvata ölçüleri	27
Tablo 2.7 Iso 898-1 standardı cıvataların mekanik ve fiziksel dayanım tablosu [34].	28
Tablo 3.1 Kaplama işlemi sırasında yaşanılan problemler ve özümleri	33
Tablo 3.2 Uygun olmayan kaplanmış parçanın XRF sonuçları (Bkz.Ek)	35
Tablo 3.3 Uygun kaplamalı plakanın ölçüm sonuçları.....	35
Tablo 3.4 Cıvata numuneleri ve kaplama kalınlıkları	36
Tablo 3.5 ZnNi8 Numaralı numunenin kaplama XRF sonuçları ve kimyasal oranı	36
Tablo 3.6 ekme testi sonuçları	37

Tablo 3.7 Tedarikçilerden kaplı halde elde edilen cıvataların kopma torku.....	37
Tablo 3.8 Çinko Nikel kaplanan cıvataların akma noktasına eş değer tork ile dayanım süreci tablosu.....	38
Tablo 3.9 Numunelerin karşılaştırılma tablosu	39
Tablo 3.10 ZnNi 8 numunelerinin varyant numuneleri.....	26
Tablo 3.11 ZnNi 8 varyant numunelerinin karşılaştırma tablosu.....	42
Tablo 3.12 8 No'lu numune varyantlarının tork testinde dayanım süreleri	43

ŞEKİLLER LİSTESİ

SAYFA

Şekil 1.1.1 Püskürtme yönteminin temsili gösterimi [5].....	7
Şekil 1.2 Tambur ile kaplama havuzuna daldırma işlemi [7].....	9
Şekil 1.3. Bell kaplama banyosu [7]	10
Şekil 1.4. Sürekli kaplama işleminin şematik gösterimi [8]	10
Şekil 1.5. Sürekli kaplama ile fiyat düşümünün grafiği [4]	11
Şekil 2.1 Kurulan kaplama düzeneği gösterimi	18
Şekil 2.2 Asit banyosunda oksit çıkışının gösterimi	20
Şekil 2.3 Kaplama banyosundaki ısıtıcı ve anotların konumlandırılması.....	21
Şekil 2.4 Kaplama Banyosu Akış Şeması	22
Şekil 2.5 Kullanılan pasivasyon kimyasalı	22
Şekil 2.6 Fisher Marka XRF Cihazı	23
Şekil 2.7 M10x45-10.9 cıvata resmi	26
Şekil 2.8 Zwick/Roell çekme testi.....	27
Şekil 2.9 Metrik cıvata ve somunlar için Iso 15330 standardı doğrultusunda belirlenmiş olan test düzeneği [29]	30
Şekil 2.10 15330 Standardına göre oluşturulmuş test düzeneğinin önden görünümü (a) arkadan görünümü (b).....	31
Şekil 2.11 Tork anahtarının test düzeneği üzerinde kullanılması	31
Şekil 2.12 ZEISS Taramalı Elektron Mikroskobu (MERLIN)	32
Şekil 3.1 Kaplama sonucu uygun olmayan plaka	34
Şekil 3.2 Kaplanmış 3 adet numune için çekme test sonuçları	37
Şekil 3.3 0,5 Amp/dm ² ile kaplanan ZnNi10 numunesi	39
Şekil 3.4 ZnNi8 numunesi.....	39

Şekil 3.5 Tork testinden sonra ZnNi1 numunesi	40
Şekil 3.6 Tork testinden sonra ZnNi9, ZnNi6 ve ZnNi4'nin gösterimi.....	41
Şekil 3.7 Sıcaklık kaplama kalınlığı artış oranı grafiği	44
Şekil 3.8 30 dakika asitte bekletilen parçaların sıcaklık kaplama kalınlığı grafiği.....	45
Şekil 3.9 15 dakika asitte bekletilen parçaların sıcaklık kaplama kalınlığı grafiği.....	46
Şekil 3.10 ZnNi 8.1 ve ZnNi8.6 numunelerinin elektro mikroskop analizleri gösterimi 25X.....	47
Şekil 3.11 ZnNi8.1 numunesinin Şekil 3.10'da belirtilen A bölgesinin taramalı elektron mikroskobu ile gösterimi (a) 68X (b) 200X.....	47
Şekil 3.12 ZnNi8.1 numunesinin Şekil 3.10'da belirtilen C bölgesinin taramalı elektron mikroskobu ile gösterimi (a) 68X (b) 200X.....	48
Şekil 3.13 ZnNi8.6 numunesinin Şekil 3.10'da belirtilen C bölgesinin taramalı elektron mikroskobu ile gösterimi (a) 250X (b) 717X.....	48
Şekil 3.14 ZnNi8.6 numunesinin Şekil 3.10'da belirtilen D bölgesinin taramalı elektron mikroskobu ile gösterimi (a) 398X (b) 1200X.....	48
Şekil 3.15 ZnNi8 numunesi mikro çatlak gösterimi 1000 X.....	49
Şekil 3.16 ZnNi8.2 numunesi taramalı elektron mikroskobu çatlak gösterimi 1500X	50

SİMGELER VE KISALTMA LİSTESİ

Amp	Amper
CVD	Kimyasal Buhar Çöktürme
Dk	Dakika
dm ²	Desimetrekaare
EDS	Enerji Dağılımlı Spektroskopi
HE	Hidrojen Gevrekliğı
HVOF	Yüksek Hızlı oksi-yakıt
H	Hidrojen
HCl	Hidroklorik Asit
H ₂ SO ₄	Sülfirik Asit
L	Litre
ml	Mililitre
Mm	Milimetre
Ni	Nikel
OH	Hidroksil Molekülü
PVD	Fiziksel Buhar Çöktürme
Ph	Power of Hydrogen
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Rpm	Rate Per Minute
XRF	X-Işını Floresans
Zn	Çinko
µm	Mikrometre
°C	Santigrat Derece

1.GİRİŞ

Savunma endüstrisi, bir ülkenin savunması için gerekli olan araçları, ekipmanları, silahları ve mühimmatı üretebilen ve sürdürebilen bir sektördür ayrıca ülkelerin savunma bütünlüğünü koruma, ekonomik bağımsızlığı artırma ve dışa bağımlılığı azaltma konularında kritik bir rol oynar. Savunma sanayisi, her türlü araç ve ekipmanı üretebilme yeteneği hem özel hem de kamusal kuruluşlar tarafından şekillendirilir. Savunma endüstrisinin asıl amacı, tehditleri en etkili ve minimum maliyetle en kısa sürede ortadan kaldırmaktır. Bu nedenle, bu sektörde en son teknolojiler en yoğun şekilde kullanılır. Bu dönemdeki teknolojik ilerlemeler ve iç-dış saldırı tehditlerinin çeşitlenmesi, ileri teknolojiye dayalı savunma ürünlerine ve gelişmiş seviyelere odaklanmanın gerekliliğini vurgular. Savunma sanayisi, çok ileri teknolojileri kullandığı için, yoğun bir şekilde araştırma ve geliştirme çalışmalarını sürdürür.

Günümüzün hızla gelişen endüstriyel sektörlerinde, dayanıklılık, korozyon direnci ve mekanik mukavemet gibi malzeme özellikleri, mühendislik uygulamaları için kritik öneme sahiptir. Bu özelliklerin optimize edilmesi, birçok uygulama alanında ürünlerin performansını artırabilir ve uzun ömürlü ürünlerin tasarlanmasına katkı sağlayabilir. Bu bağlamda, yüzey kaplama teknolojileri, malzeme özelliklerini iyileştirmek için sıkça kullanılan bir yöntemdir.

Kaplama uygulamalarına dair ilk kayıtlar, antik Mısır ve Mezopotamya medeniyetlerine dayanmaktadır [1]. Altın ve gümüş kaplamalar, değerli eşyaların ve tapınakların süslenmesi için kullanılmıştır. Orta çağ da kaplama teknolojileri gelişmiş ve özellikle madeni para üretiminde yaygın olarak kullanılmıştır. Altın, gümüş veya bakır kaplamalar, madeni paraların değerini artırmak için uygulanmıştır. Rönesans döneminde, sanatçılar ve zanaatkarlar kaplama tekniklerini daha da geliştirmişlerdir. Altın kullanarak tabloların ve rölyeflerin süslenmesi bu dönemde yaygın bir uygulamaydı. 18. ve 19. yüzyıllarda, kaplama teknolojileri sanayi devrimi ile birlikte büyük bir gelişme gösterdi [2]. Özellikle metal parçaların korozyona karşı korunması ve dayanıklılığının artırılması için kaplama yöntemleri geliştirildi. Bu dönemde galvanizasyon (çinko kaplama), nikel kaplama

ve krom kaplama gibi işlemler yaygınlaştı. 20. yüzyılın başlarında kaplama teknolojileri otomotiv endüstrisi, havacılık, elektronik ve diğer birçok endüstriyel sektörde büyük bir rol oynamaya başladı. Kaplama, metallerin dayanıklılığını, korozyon direncini ve estetik görünümünü artırmak için yaygın olarak kullanıldı.

Günümüzde kaplama teknolojileri oldukça gelişmiştir. Kaplama işlemleri, farklı malzemelerin (metaller, plastikler, seramikler vb.) yüzeylerine uygulanabilir. Elektrokaplama, galvanizasyon, boya kaplama ve seramik kaplama gibi birçok farklı kaplama yöntemi mevcuttur. Bu teknolojiler, savunma sanayi, otomotiv, elektronik, havacılık, tıp, mühendislik ve daha birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çinko nikel elektro kaplama, son yıllarda endüstriyel uygulamalarda giderek daha fazla tercih edilen bir kaplama türü olmuştur. Bu kaplama, çinko ve nikelin birleşimiyle oluşan bir alaşım tabakası ile metal yüzeyleri kaplama işlemidir. Çinko nikel kaplamaların korozyon direnci estetik görünüm ve yüzey sertliği gibi çeşitli avantajları vardır. Ancak, bu kaplama işlemi sırasında hidrojenin malzemeye nüfuz etmesi ve hidrojen gevrekliği oluşumu riski bulunmaktadır.

Hidrojen gevrekliği, bir malzemenin iç yapısındaki hidrojenin birikmesi sonucu meydana gelen ve malzemenin mekanik mukavemetini azaltabilen bir durumdur. Hidrojen gevrekliği, özellikle yüksek gerilimli ve sert uygulamalarda malzeme deformasyonuna veya kırılmasına yol açabilir. Çinko nikel kaplamaların hidrojen gevrekliği üzerindeki etkisi hem endüstriyel hem de bilimsel açıdan büyük önem taşımaktadır. Ancak, bu alandaki araştırmalar sınırlıdır ve çinko nikel kaplama parametrelerinin hidrojen gevrekliği üzerindeki etkileri tam olarak anlaşılmamıştır.

Yüzeylerin çeşitli elementlerle teması sonrasında maruz kalacağı değişimler, etiketler Tablo 1.1 'de özetlenmiştir.

Tablo 1.1 Dış etkenlere bağlı olarak yüzeydeki değişimler [1]

Yüzeyi temas ettiği madde	Maddenin yüzeydeki etkisi
Atmosferik gaz	Kirlenme, Hidrojen gevrekliği
Sıcak Gazlar	Oksidasyon
Akışkan Sıvı	Kavitasyon, Erozyon
Mikro organizma	Mikrobiyolojik hasar
Kimyasal	Kimyasal hasar ve elektrokimyasal korozyon
Mekanik etkileşim	Tribolojik hasar

1.1. Tez Konusu ve Amacı

Bu yüksek lisans tezi, çinko nikel kaplama parametrelerinin hidrojen gevrekliği üzerindeki etkilerini daha ayrıntılı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Bu çalışma, farklı kaplama koşulları altında çinko nikel kaplanmış malzemelerin hidrojen gevrekliği davranışını analiz ederek, endüstriyel uygulamalar için daha güvenilir ve dayanıklı kaplamaların tasarlanmasına katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Günümüzde özellikle savunma sanayi için üretilen parçalar sürtünme, mekanik darbe ekstrem sıcaklıklar ve tuzlu su gibi korozyona sebep verebilecek olan zorlu şartlar altında çalışmaktadır. Ayrıca savunma sanayi için en önemli araçlardan biri olan zırhlı personel taşıyıcıları sınır bölgelerde üretim ve bakım tesislerine uzak bölgelerde görev almaktadır. Bunun sonucu olarak hasarlı parçalar veya arızalar diğer sektörlerdeki gibi hızlı aksiyonlarla çözümlenememektedir. Bu durum parçaların dayanıklılıklarını hiç olmadıkları kadar önemli kılmaktadır. Üretilen parçalara ortam şartlarına uygun, dayanıklılığını arttırmak için kaplama uygulamaları yapılmaktadır. Ancak bu da beraberinde parçaların dayanıklılığı düşüren hidrojen gevrekliği sorununu getirmektedir.

Bu bağlamda bağlantı elamanlarının hem bir zırhlı araçta kullanılan adet sayısı fazladır hem de standart bir ürün olması gerekmektedir. Yani kaplama firmaları kaplama işlemlerini standardize etmelidir. Ayrıca bağlantı elemanlarının kaplanması sırasında hidrojen gevrekliğinden dolayı kırılan parça sayısı oldukça fazladır.

Bu tez, cıvata gibi düzlemsel olmayan parçaların kaplanma deney düzeneğinin tasarlanmasını ve cıvataların kaplama işlemlerini içermektedir. Ayrıca kaplama parametrelerinin hidrojen gevrekliği üzerindeki etkilerini tartışmaktadır.

Bu kaplama parametrelerinin hidrojen nüfuzunu nasıl etkilediğini değerlendirilmiş ve bu parametrelerin optimizasyon çalışması yapılmıştır.

1.2. Genel Bilgiler

1.2.1. Kaplama Yöntemleri

Organik, inorganik veya metalik bir kaplamanın uygulanmasıyla bir yüzeyin çevresel saldırılardan korunabileceğinin ve böylece sadece yüzeyin değil tüm bileşen veya ekipmanın ömrünün uzatılabileceğinin anlaşılması, tarihindeki en büyük ilerlemelerden biriydi. Bu ilerlemeler malzemelerin daha kullanımı veya daha az maliyetli malzemelerin kullanımının yanı sıra enerji kazancı sayesinde mühendislik çalışmalarının önündeki bazı problemleri ortadan kaldırarak yüzey mühendisliğinin ne denli önemli olduğunu kanıtlamıştır.

Hangi kaplama tekniği kullanılırsa kullanılsın, kaplamanın performansını en üst düzeye çıkarmak için yüzeyin uygun ön işlemlerden geçirilmesi ve temizlenmesi gereklidir.

Literatürde Tablo 1.2 de belirtildiği gibi çok çeşitli kaplama yöntemleri vardır.

Tablo 1.2 Fonksiyonel yüzeyleri korumak için kullanılan Kaplama İşlemleri [3]

Kaplama Yöntemi	Kaplama Yöntemi için Varyantlar
Buhar Çöktürme	Kimyasal Buhar Çöktürme (CVD) Fiziksel Buhar Çöktürme (PVD)
Sıcak Metal İşlemleri	Kaynaklı Yüzey Kaplama Sıcak Dip Galvaniz Daldırma Rulo Kaplama
Boyama	İnorganik Kaplama Organik Kaplama Düşük Sürtünme Kaplama
Termal Püskürtme	Atmosferik Basınç Plazma Püskürtme Düşük Basınç Plazma Püskürtme Alev Püskürtme
Metalleştirme	Akımsız Metal Kaplama Elektro Metal kaplama

1.2.1.1. Buhar Çöktürme

Kimyasal buhar çöktürme (CVD), katı bir malzemenin gaz halindeki bir fazdan (çoğunlukla taşıyıcı gazlarda seyreltilmiş) biriktirilmesini içeren bir işlemdir; bu, Fiziksel buhar çöktürme (PVD) işleminden farklı olarak öncüllerin katı olması ve biriktirilecek malzemenin bir katıdan buharlaştırılmasıyla sağlanır [3] .

Kimyasal buhar çöktürme işlemleriyle genellikle ilave reaktif gazlar kullanılarak kaplayacak metali içeren gaz halindeki parçacıkların biriktirilmesiyle basınç ve ısı etkisi altında sert kaplama oluşturma işlemine denir.

1.2.1.2. Sıcak Metal İşlemleri

Kaynaklı yüzey kaplama ve erimiş metal kaplama işlemleri, kaplanacak parçanın yüzeyine koruyucu veya işlevsel bir metal katmanı uygulamak için kullanılan tekniklerdir. Bu işlemler, temel malzemenin aşınma direncini, korozyon direncini veya diğer özelliklerini geliştirmek için imalat, inşaat dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılır.

Sert kaplama veya kaplama olarak da bilinen kaynaklı yüzey kaplama, özelliklerini geliştirmek için bir malzemenin yüzeyine bir erimiş metal tabakasının bırakılmasını içerir. Bu genellikle kaynak teknikleri kullanılarak yapılır ve kaynak yönteminin seçimi, spesifik uygulamaya ve ilgili malzemelere bağlıdır. Yaygın yöntemlerden bazıları şunlardır

Erimiş metal kaplama işlemleri kaynak yüzey kaplamaya benzer ancak kapsamı daha geniş olabilir. Bu işlemler, metal veya metal olmayan bir malzeme olabilen bir alt tabaka üzerine bir erimiş metal tabakasının uygulanmasını içerir. Savunma sanayide en çok kullanılan kaplama yöntemleri erimiş metal kaplama ile oluşmaktadır. Bu prosesler aşağıdaki gibi listelenmiştir.

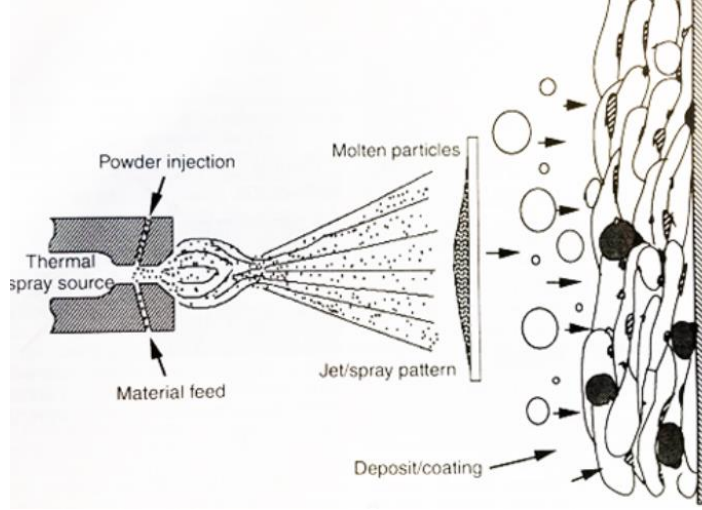
Sıcak Daldırarak Galvanizleme: Bu işlem, korozyona karşı koruma sağlamak için çelik veya demir bir nesnenin erimiş çinko banyosuna daldırılmasını içerir. Erimiş çinko alt tabakaya bağlanarak dayanıklı ve koruyucu bir kaplama oluşturur [4].

1.2.1.3. Boyama

Sıvı inorganik boyalar krom fosfor içeriği ile alüminyum tozunu pigment olarak kullanılması işlemine verilen addır. Uygulanması spreycihazının yüzeye püskürtülmesinden sonra kurumaya bekletilmesi ile olur. [4]

1.2.1.4. Termal Püskürtme

Termal Püskürtme: Bu işlem, bir metalin veya alaşımın eritilmesini ve yüksek hızlı bir gaz veya elektrik arkı kullanılarak alt tabakaya püskürtülmesini içerir. Erimiş metal darbe üzerine katılarak bir kaplama oluşturur. Termal püskürtmenin yaygın çeşitleri arasında alev püskürtme, plazma püskürtme ve yüksek hızlı oksiyakıt (HVOF) püskürtme yer alır [4].



Şekil 1.3 Püskürtme yönteminin temsili gösterimi [5]

Bu işlemler, özellikle zorlu veya aşındırıcı ortamlarda çeşitli bileşenlerin ve yapıların ömrünü uzatmak ve performansını artırmak için gereklidir. Yöntemin seçimi, amaçlanan uygulama, malzeme uyumluluğu ve kaplama veya yüzey kaplama katmanının istenen özellikleri gibi faktörlere bağlıdır [4].

1.2.1.5 Metalleme Prosesleri

Metalleme prosesleri Elektrokaplama ve akımsız kaplama yöntemi ile kaplama olmak üzere ikiye ayrılır [4].

Akımsız kaplama, metalik bir iyonun sulu bir çözeltiden katalitik indirgenmesine ve ardından metalin elektrik enerjisi kullanılmadan biriktirilmesine bağlı kimyasal bir indirgeme işlemidir. Bu kaplama yöntemi, grafitin yanı sıra plastik, kauçuk vb. gibi kumaşlar ve yalıtkanlar da dahil olmak üzere akımsız olarak iletken malzemeleri kaplayabilir [4].

1.2.1.6. Elektro kaplama

Elektrokaplama, bir alt tabaka üzerine ince bir metal tabakası biriktirmek için bir elektrik akımı kullanılır. Bu işlem genellikle mücevher, otomotiv parçaları ve elektrik konnektörleri gibi nesnelere koruyucu bir kaplama sağlamak için kullanılır [6].

Elektro kaplama, elektrik yükü ile bir çözelti içerisinde hareket eden pozitif yüklü metal parçacıklarının biriktirilmesi ve bunları negatif yük verilen bir nesnenin üzerine çekmesidir. Elektro kaplama endüstride büyük havuzlarda yapılabileceği gibi butik olarak

küçük havuzlarda da yapılabilir. Hacimce büyük çok sayıda parça kullanılması endüstri de büyük havuzlar kullanılmasını sağlamaktadır. Büyük havuzlarda filtreleme işlemi kimyasal takviyesi işlemleri daha kontrollü yapılabilmektedir. Ancak büyük kaplama havuzlarında (Sıcaklık, Ph, Kimyasal oran vb.) belirli parametreleri hızlı bir şekilde değiştirmek oldukça zordur. Tez boyunca kaplanması planlanan cıvatalar için de endüstriyel kaplama havuzları çok büyük kalmaktadır. Büyük olması anot ile katot arasındaki mesafeyi etkileyeceğinden dolayı kaplamanın verimsiz olur. [4]

Hem büyük hem de küçük bileşenlerin elektrokaplaması, bazen kütle kaplama olarak da bilinen, özel ekipmanlarla gerçekleştirilir. Kaplanacak bileşenlerin boyutuna ve geometrisine ve kullanılacak kaplama işlemlerine bağlı olarak raf kaplama (rack plating) , kütle kaplama (mass plating) , sürekli (contious plating) kaplama ve hat içi(in-line) kaplama arasında bir ayrım yapılır.

Raf kaplama, kaplamadan önce parçalar raf üzerinde dizilirmiş gibi iletken metal parçaya diğer kaplanacak parçalarla eşit mesafede olacak şekilde bağlanarak kaplama havuzuna daldırılma işlemine verilen addır. Kaplama endüstrisinde delikli veya geometrisinden dolayı askılanarak kaplanmak zorunda olan parçalar için genellikle raf kaplama yöntemi kullanılır.

Raf kaplamanın çeşitli avantajları ve dezavantajları vardır. Zor geometride ve kırılğan yapıda olan parçalar için tercih edilen yöntemdir. Kaplanması istenen parçaların homojen bir şekilde kaplanmasını sağlar aynı zamanda kaplama kalitesi bütün parçalarda aynıdır. Negatif yanlarında ise yüksek işçilik yüksek ekipman maliyeti, kaplanacak hacmi azaltma buna bağlı olarak da total kaplama süresinin uzaması gibi etkenler bulunmaktadır.

Kütle kaplama (Mass Plating) literatürde varil kaplama (barrel plating) ve çan kaplama (bell plating) olarak bilinen kütle ile kaplama yöntemlerine denir. Genellikle askılanma ile uğraşılmayacak küçüklükte, içerisine kaplama girmesi zor olan delikleri barındırmayan kolay kaplama alan parçalar için genellikle kullanılan yöntemdir. Ülkemizde tambur ile kaplama olarak da bilinen kaplama yöntemi ile kaplanan en yaygın parçalar cıvata somun gibi bağlantı elemanlarıdır. Sistem, çamaşır makinasını andıran bir eksen etrafında dairesel dönen tamburu andıran parçanın içerisinde çokça kaplanması istenilen parçaların atılarak kaplanması mantığı ile çalışır (Şekil 1.) . Parça bazlı bakıldığında raf kaplamaya göre birim sürede daha fazla parça kaplanabilir ancak kaplama kalitesi raf kaplamada yapılan

kaplamalar kadar homojen olmayabilir. Bunun için genellikle bağlantı elemanları gibi kolay kaplanan parçalar tercih edilmektedir. Bazı parçalar bulundukları geometri sebebi ile daha az kaplama alabilir bu yüzden tambur ile kaplanan parçalarda uzun süre kaplama havuzunda bekletilmesi tercih edilmektedir. Uzun süre kaplama havuzunda bekletilen parçalar ise sadece düşük akım yoğunluğu ile kaplanmaktadır. Uzun süre kaplama havuzunda bekleyen parçaların hidrojen gevrekliği sebebi olan OH ve H iyonlarına maruz kalması demektir. Ayrıca parçalar kaplanırken birbiri ile temas ettiğinden dolayı bazı parçalarda fiziksel deformasyonlar olabilmektedir.



Şekil 1.4 Tambur ile kaplama havuzuna daldırma işlemi [7]

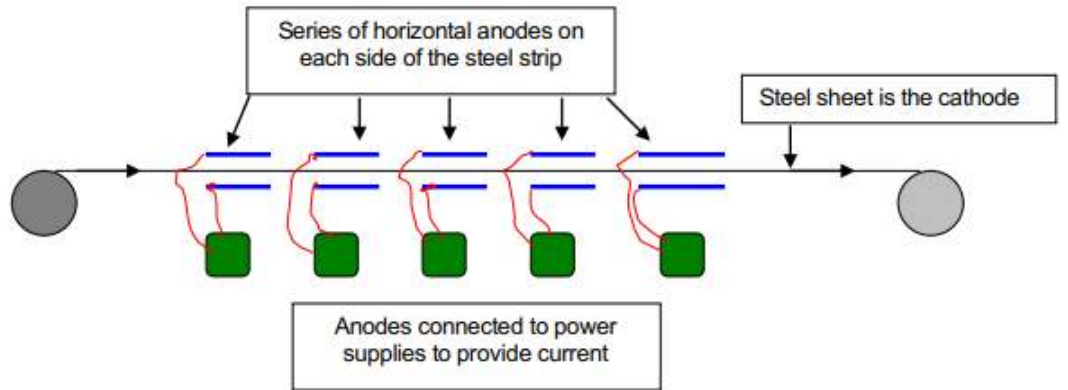
Bell plating, dikey veya dikeye yakın bir eksen etrafında dönen çokgen, çan şeklindeki kaplardır (Şekil). Çevreleri ve zemini deliklidir ve özellikle küçük miktarlardaki işlerin kaplanması için uygundur. Piyasada küçük hacimli olmaları ve tek banyoda kalmaları sebebi ile kullanım alanları oldukça kısıtlıdır.



Şekil 1.5. Bell kaplama banyosu [7]

Sürekli kaplama, teller, tüpler ve şeritler gibi öğelerin birbiri ardına bir kaplama düzeneğinden sürekli olarak geçirilerek kaplandığı bir işlemdir. İşlem, alüminyum, çinko veya kalay gibi yumuşak bir metalin kaplamasının çelik gibi bir metal alt tabaka üzerine düzgün bir şekilde dağıtılmasını sağlar.

Yüzey işlemi genellikle metal bir alt tabakanın görünümünü, aşınmasını, korozyon direncini veya diğer yüzey özelliklerini geliştirmek için gerçekleştirilir.



Şekil 1.6. Sürekli kaplama işleminin şematik gösterimi [8]

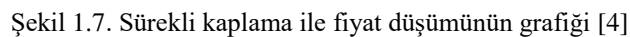
Kaplama proseslerinin ana üretim hattına entegre edilmesi son yıllardaki bir gelişme olmuştur. Bu, çevre dostu olmayan malzemelerin kullanımında önemli bir azalma

Cost

Process

- Machining and deformation
- Protective coating
- Packaging
- Transportation
- Cleaning
- Surface treatment

Bu yaklaşımın kullanılmasıyla depolama ve malzeme taşıma yatırım maliyetlerinin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Ayrıca bir yerden başka bir yere aktarılan bir yüzeyin korunması için gerekli olabilecek maliyetli işlemler de böylece ortadan kaldırılabilir.



Hidrojen destekli çatlama veya hidrojen kaynaklı çatlama (HIC) olarak da bilinen hidrojen gevrekliği (HE), emilen hidrojen nedeniyle bir metalin sünekliğindeki azalmayı meydana getiren bir olaydır. Hidrojen atomları küçüktür ve katı metallere nüfuz edebilir. Hidrojen emildikten sonra metaldeki çatlakların başlaması ve yayılması için gereken gerilimi düşürür ve gevrekleşmeye neden olur. Hidrojen gevrekliği en çok çeliklerde olduğu

kadar demir, nikel, titanyum, kobalt ve bunların alaşımlarında da meydana gelir. Bakır, alüminyum ve paslanmaz çelikler hidrojen gevrekleşmesine karşı daha az hassastır [9] .

Hidrojen gevrekliği doğası hakkındaki temel gerçekler 19. yüzyıldan beri bilinmektedir. Çeliklerde hidrojen gevrekliği yaklaşık oda sıcaklığında maksimuma çıkar ve çoğu metal 150 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda hidrojen gevrekleşmesinin etkilerini görmek daha zordur. Hidrojen gevrekliği, çatlak büyümesini arttırmak için hem atomik hidrojenin hem de mekanik bir stresin varlığını gerektirir. Hidrojen gevrekliği daha düşük gerinim oranlarında artar. Genel olarak, daha yüksek mukavemetli malzemeler hidrojen gevrekliğine karşı daha hassastır [10].

Metaller iki tür kaynaktan hidrojene maruz kalabilir: gaz halindeki hidrojen ve metal yüzeyinde kimyasal olarak üretilen hidrojen. Gaz halindeki hidrojen moleküler hidrojendir ve sıcak hidrojen saldırısına neden olabilmesine rağmen gevrekleşmeye neden olmaz. Atomik hidrojen, oda sıcaklığında metal içinde hızla çözündüğü için, gevrekleşmeye neden olan kimyasal saldırıdan kaynaklanan atomik hidrojendir. Gaz halindeki hidrojen, basınçlı kaplarda ve boru hatlarında bulunur. Hidrojenin elektrokimyasal kaynakları arasında asitler, korozyon (genellikle sulu korozyon veya katodik koruma nedeniyle) ve elektrokaplama yer alır. Hidrojen, imalat sırasında kaynak sırasında veya metal ergimişken nem bulunmasıyla parça yapısına dahil edilebilir. Uygulamadaki en yaygın hata nedeni, kötü kontrol edilen elektrokaplama [10].

Periyodik tablodaki en küçük atom yarıçaplarından birine sahip olan hidrojenin, belirli tip metallerin ve alaşım sistemlerinin mekanik bozulmasına neden olarak sünelik kaybına ve yük taşıma kapasitesinin azalmasına neden olduğu bilinen bir gerçektir. Yüksek mukavemetli çeliklerde hidrojen atomlarının (çevresel veya dahili) varlığı, tipik olarak, servis ortamlarında çalışırken yapısal bileşenlerin kırılmasına veya feci gevrek arızalarına yol açar. Hidrojen gevrekliği olarak adlandırılan bu modda ki kırılma başlangıcı, genellikle hidrojen atomlarının kristal kafes yapılarla sinerjik etkisi ile meydana gelir ve uygulanan gerilim, artık gerilim, sıcaklık, hidrojen kaynağı ve basınç gibi çeşitli faktörlere büyük ölçüde bağlıdır. Hidrojenin zararlı etkileri çeşitli modlarda olabilir ve bunların her biri malzeme tipine, mikro yapıya, hizmet ortamına bağlıdır. Literatürde metalik malzemelerde hidrojen kaynaklı hasarın yaygın olarak bilinen beş farklı türü vardır. Bunlar şu şekilde sınıflandırılır;

- Hidrojen gevrekliği
- Hidrojen saldırısı
- Hidrojen kaynaklı kabarma
- Dahili hidrojenin çökelmesinden kaynaklanan çatlama
- Hidrit oluşumundan çatlama

Hidrojen gevrekliği dışında, yukarıda bahsedilen hidrojen kaynaklı hasar türlerinin doğasını anlamak, bozunma işlemi sırasında bir faz dönüşümü meydana geldiğinden nispeten kolaydır. Örneğın, hidrojen kaynaklı kabarma, iç yapıdaki boşluklarda moleküler hidrojenin oluşumu ve toplanmasıyla meydana gelir. Daha sonra, bu moleküler hidrojenler, hacim genişlemesi nedeniyle yüksek basınç oluşturur ve mikro çatlak oluşumuna yol açar. Atomik hidrojenin malzeme yüzeyinden girişı engellenerek hasar önlenabilir. Bununla birlikte, hidrojen gevrekliği olarak adlandırılan ilk maddenin doğasını anlamak daha karmaşık ve anlaşılması güçtür ve bu nedenle hidrojen gevrekliğinin neden olduğu yıkıcı hasardan kaçınmak oldukça zordur. Hidrojen gevrekliği kristal yapıya atomik hidrojenin katılmasıyla metallerin ve alaşımların mekanik özelliklerinin önemli ölçüde azaldığı bir işlemdir. Bir proton ve bir elektrondan oluşan atomik hidrojenin boyutu oldukça küçük olduğundan, kolayca çözülebilir ve bir kafes yapısına yayılabilir.

1.2.3. Elektrokaplama ve Hidrojen Gevrekliği

Bir alt tabaka malzemesinin yüzeyine bir metal tabakası uygulamak için kullanılan yaygın bir endüstriyel işlem olan elektro kaplama, çeşitli ürünlerin estetiğini, işlevselliğini ve dayanıklılığını attırmakta önemli bir rol oynar. Bununla birlikte, genellikle parlak dış yüzeyin altında gizli bir düşman gizlenir: hidrojen kırılğanlığı. Bu olgu, elektrokaplama ile malzemelerin mekanik bütünlüğü arasındaki karmaşık ve kritik ilişkiyi temsil etmektedir [11].

Hidrojen gevrekliği, elektro kaplama sırasında veya sonrasında hidrojen atomlarının metallerin kafes yapısına emilmesiyle meydana gelen bir malzeme bozunma

sürecidir. Bu hidrojen atomları metali zayıflatabilir, onu kırılgan hale getirebilir ve beklenen mukavemetin çok altındaki seviyelerde bile stres altında ani kırılmaya veya felaketle sonuçlanabilecek arızalara karşı duyarlı hale getirebilir. [10]

Elektro kaplama sıklıkla altlık (substrat) malzemesinin metal iyonları içeren asidik veya alkalın çözeltilerden oluşan bir banyoya daldırılmasını içerir. Bu işlem sırasında, metal birikiminin meydana geldiği katotta hidrojen iyonları üretilebilir ve bu hidrojen iyonlarının bir kısmı metal kafes tarafından emilebilir.

Temizleme ve dekapaj gibi ön kaplama işlemleri metal yüzeye hidrojen katabilir. Kaplamadan önce uygun şekilde çıkarılmazsa bu hidrojen metalin içinde sıkışıp kalabilir.

Mekanik stres, neme maruz kalma veya yüksek sıcaklıklar gibi dış faktörler, metal içindeki hidrojenin hareketini ve birikmesini teşvik ederek kırılganlığı şiddetlendirebilir.

Mekanik yüzey işlemlerinde de özel dikkat gösterilmelidir. Taşlama ve cilalama sıklıkla ince ve kırılgan bir yüzey tabakası oluşmasına neden olur ve bu katman daha sonra asitle temizleme veya elektrolitik yağ giderme sırasında oluşan atomik hidrojen ile giderilebilir. Ancak bu durum başka bir istenmeyen olaya, yani metalde hidrojenin çözünmesine ve bunun sonucunda hidrojenin kırılganlaşmasına yol açabilir. Atomik hidrojen metale yayılır ve burada birleşerek moleküler hidrojen oluşturur, bu da substratta çok yüksek basınç gerilmelerine neden olabilir. Substrat-değişken arayüzde ortaya çıkan kesme kuvvetleri yapışmayı büyük ölçüde azaltabilir ve aslında arayüzde hidrojen gazı basıncının oluşmasına neden olabilir. [12]

Çinko pasivasyonu için de bilindiği üzere, çinko-nikel pasivasyonlarda da demir veya yüksek çinko konsantrasyonu gibi safsızlıklar, pasivasyon katmanı oluşum sürecinde olumsuz etkiye sahiptir ve dar bir aralıkta (iyonik değişim) kontrol edilmelidirler. Homojen bir yüzey görünümü elde etmek için iyi bir durulama tekniğinin yanı sıra parça hareketi veya pasivasyon hareketi gereklidir [13].

Yaygın olarak kullanılan bir metal olan demir, kimyasal reaksiyonlara karşı hassastır ve çeşitli kimyasallara, neme, havadaki oksijene ve asitlere karşı direnci düşüktür. Reaktivitesini azaltmak ve korozyon direncini artırmak için, çinko-nikel kaplı olmasa bile demirin yüzeyini pasifleştirmek önemlidir.

Pasivasyon, koruyucu bir tabaka oluşturmak için demir yüzeyinde kimyasal reaksiyonlar gerçekleştirmeyi içerir. Bu, yüzeyin metalik demir dışında daha pasif bir metal veya diğer metal bileşikleri ile doğrudan kaplanmasıyla elde edilebilir. Amaçlanan uygulamaya bağlı olarak üç tür pasivasyon vardır: sarı, mavi ve siyah. [14]

Pasivasyon katmanlarının oluşumu şeffaf, siyah veya mavi olabilir. Çok agresif pasivasyon ve çinko-nikel tabakasındaki nikel konsantrasyonunun çok yüksek olması, korozyon korumasında (erken kırmızı pas) güçlü bir düşüşe yol açabilir.

1.3. Literatür Özeti

Literatürde kaplamalar ve hidrojen gevrekliği ile ilgili çok sayıda çalışma olmasına rağmen hem kaplama hem de hidrojen gevrekliğini birlikte inceleyen az sayıda çalışma vardır.

Kaplama çalışmaları için yapılan literatür taramalarında kaplama havuzunun karakterizasyonunun çok önemli olduğu gözlemiştir [15]. Paulo Vieira ve arkadaşları çinko nikel banyonun karakterizasyonu üzerine çalışmışlardır [15]. Çalışma içerisinde en önemli çıktılar kaplama parametrelerinin kaplama kalitesi bakımından değerlendirilmesi yönünde olmuştur. Buna göre iyi bir kaplama yapabilmek için %15 oranında nikel ve %85 oranında çinko oranı gerekmektedir [15]. Bu oranların değişmesi parçaların korozyona uğrama olasılığını arttırmaktadır [15]. Bu bilgiler doğrultusunda başarılı kaplanmış bir parçanın XRF cihazından alınacak olan ölçümlerinin bu aralığa yakın olması gerekmektedir. Kaplama konsantrasyonunda bu özelliğin sağlanabilmesi için ise kaplama havuzundaki kimyasal kompozisyonun düzenlenmesi gerekmektedir. Melis Gülümsek'in yaptığı çalışmada ise uygun banyo kompozisyonu belirlenmiştir [14]. Ayrıca tamburlu ve askı yöntemi ile kaplanan parçalardan askı yönteminin daha sağlıklı sonuç verdiği tespit edilmiştir [14]. Kaplama süresince gerekli olan parametrelerden akım yoğunluğunun $2,5 \text{ A/dm}^2$ lik akım yoğunluğunun uygun olduğu tespit edilmiştir [16]. Akım yoğunluğu dışında sıcaklık da önemli bir parametredir. Genel olarak 20-30 °C sıcaklığın çinko nikel kaplama için uygun olduğu tespit edilmiştir [17]. Tüm bunlara rağmen kaplama sırasında en büyük problemlerden biri hidrojen gevrekliğidir. Bu durumu Sandeep K. Dwivedi ve arkadaşlarının çalışmasında incelenmiş olup hidrojen gevrekliğinin mekanizmasının nedenlerini araştırılmış ve hidrojen girişi sebebi ile oluşan çatlakların giderilmesi için gerekli olan yöntemler belirlenmiştir [18]. Çalışmada ayrıca hidrojen gevrekliğini gidermek için ana

malzemeye titanyum, alüminyum gibi bazı alaşımların eklenmesi ile giderileceği çıktısı verilmiştir [18]. Aynı zamanda yapılan çalışmada Çinko ve nikel kaplama gibi kaplama teknikleri, malzeme üzerinde bir katman oluşturmak ve hidrojen difüzyonu için bir bariyer görevi görmek açısından çok etkili olduğu belirlenmiştir [18]. Bir başka çalışmada ise Çinko, Çinko-Nikel ve Kadmiyum kaplı parçaların elektron kaplaması sırasında oluşan hidrojen çıkışından kaynaklı hidrojen gevrekliğinin kanıtlar bulgular ve deneyler yapılmıştır [19]. Çalışmada 2 temel değişken rapor edilmektedir. Bunlar, kaplama esnasında termal desorpsiyon yoluyla emilen hidrojen ve kaplama malzemesinin elektro kimyasal yollarla kaplanan parçaya nüfuz ettiği hidrojendir [19]. Bu çalışmanın sonuçlarında parçaların uzun ömürlü olarak kullanılması için yapılan kaplamaların hidrojen gevrekliği sebebi ile mikro yapıda çatlak oluşturmasını ancak sonrasında fırınlanma işleminin bünyedeki hidrojen miktarındaki azalmayı sağlayacağı anlaşılmıştır [19]. Bir başka çalışma da ise nikel kadmiyum ve bakır elektron kaplama yöntemi ile 4130 çeliğinin hidrojen gevrekliği ve korozyon davranışı incelenmiştir [20]. Açıkta kalan çelik 4130'un mikroyapıları, enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterize edilmiştir [20]. Elde edilen sonuçlar, hidrojenin oda sıcaklığında kaplanmış çelik alaşımı boyunca yayılarak korozyon sebep olduğu gösterilmiştir. [20]. 4130 çelik alaşımındaki hidrojen konsantrasyonu akım yoğunluğuna bağlı olduğu sonucuna varılmış ve akım yoğunluğu arttıkça arttığı belirtilmiştir. Akım yoğunluğu, hidrojen kaynaklı çatlağın oluşmasına bağlı olarak çelik alaşım yüzeyinin zayıflığından sorumludur [20]. Ayrıca hidrojen kaynaklı çatlağın ilk olarak ferritik ve perlitik gruplar arasındaki taneler arası boşluklarda başladığı fark edilmiştir [20]. Ferdi C. Bayram'ın çalışmasında ise zırh çelikleri üzerinde hidrojen gevrekliği konusunu işlemiş olup hidrojen gevrekliği giderme işlemi için optimize fırın sıcaklıkları ve süreleri bulunmuştur [21]. Çalışmada özellikle hidrojen gevrekliği tespiti için önemli rol olan mikro yapı analizi taramalı elektron mikroskop analizi ile yapılmıştır [21]. Ayrıca zırh çeliklerinin işlevi doğrultusunda FNSS bünyesinde balistik testler yapılmış olup bu testlerin değerlendirilmesi ile en uygun sonuç bulunmuştur [21]. M.B. Djukic ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise Hidrojen kaynaklı korozyon sürecinin gelişmesi sonucunda, çalışma sırasında yüksek sıcaklıktaki hidrojen saldırısı nedeniyle hasar gören fosil yakıtlı enerji santralinin kazan borularından kesilen numuneler kimyasal bileşim analizi, çekme testi, sertlik ölçümü darbe dayanım testleri yapılmış sonrasında taramalı elektron mikroskop analizi ile hidrojenle güçlendirilmiş lokalize plastisite ve hidrojenle güçlendirilmiş ayrışma modelleri belirlenmiştir. [22]

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

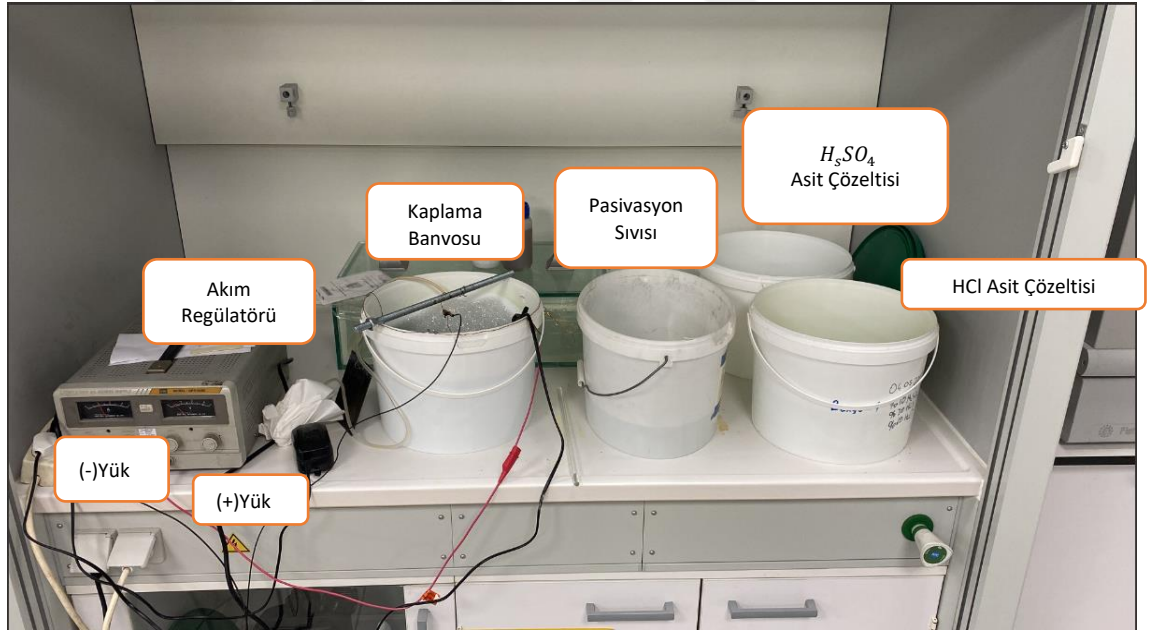
2.1. Kaplama Düzenegi

Kaplama banyo elemanları Tablo 2.1’de listelenmiştir. Kaplama banyosu kurulurken öncelikle kaplama banyosu çevresine elektrik akımını iletmesi ve anot ile katot arasındaki devredeki iletkenlik görevi görmesi için bakır tel ile sarılmıştır. 20-25 cm aralığında titanyum kablolar kesilip anotların içerisinden geçirilmiştir. Titanyum tele bağlanmış anotlar bir ucundan kaplama kabının dışından sarılı şekilde olan bakır sarmala bağlanır ve kabin yukarisından aşağısına doğru sarkıtılmıştır. Kaplanmak istenilen parçalar için kaplama banyosunun üstüne metal elektrik iletkenliği olan bir parça kestirilmiştir. Kaplanmak istenen parça önce bakır tele bağlanır sonra da kap üzerindeki uzun metal parçaya bağlanır ve kaplama banyosuna daldırılır. Bu işlemden sonra devrenin tamamlanması için sisteme akım regülatöründen istenilen akım ayarlanıp devre aktif hale getirilir. Sistem içerisinde ayrıca istenilen sıcaklığın sağlanması amacıyla akvaryum tipi ısıtıcı ve hava filtresi kullanılmıştır. Kurulmuş banyo düzenegi Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Ayrıca kaplama içerisindeki birikmeyi engellemek ve homojeniteyi sağlamak amacıyla manyetik karıştırıcı 600 rpm de çalıştırılmıştır.

Tablo 2.1 Kaplama banyo elemanları

Çinko Nikel Çözeltisi
Alkali Çözücü
Başlatıcı
Parlatıcı
Çinko Klorür
Amonyum Klorür
Polipropilen Tank
Çinko Anot
Nikel Anot

Tank Isıtıcı
Akvaryum Filtresi
Pasivasyon Sıvısı
Akım Regülatörü
Sülfürik asit çözeltisi
Hidroklorik asit çözeltisi
Bakır tel
Titanyum tel
İletken timsah uçlu kablo
Numune askı aparatı



Şekil 2.1 Kurulan kaplama düzeneği gösterimi

2.2. Elektro kaplama işlemi

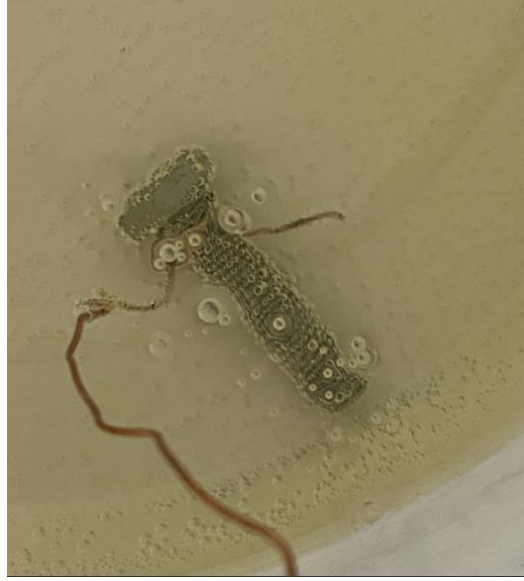
2.2.1. Numune Temizleme İşlemi

Kaplanacak parça kaplama havuzuna daldırılmadan önce parça temizlenmek zorundadır. Literatürde ve endüstri de kaplama asit çözeltisinin içerisinde daldırılması sonrasında da ise saf su ile durulandırılması ile temizlik işlemi tamamlanmaktadır [17] .

Tablo 2.2 Asit banyo içerikleri

Banyo İçeriği	1. Asit Banyosu	2. Asit Banyosu
HCl	%30	%10
H ₂ SO ₄	%10	-
Saf Su	%60	%90

Temizlik işlemi için Tablo 2.2’de içeriği listelenen 2 adet asit banyosu kullanılmıştır. Bu asit banyolarından ilki asit oranı olarak yüksek olması istenirken ikinci banyo ise daha düşük bir asit oranı ile oluşturulması istenmiştir. Bunun en büyük sebebi parçaların yüksek asidin çözülmesi zor kir ve pasları ortadan kaldırırken parça geometrisine zarar verme olasılığıdır. Aynı zamanda parçaların yüksek sürelerde aside daldırılmaması temizlik işleminin uzun süre almaması adına kuvvetli asit kullanmak çok önemlidir. Hidrojen gevrekliği tanımında bahsedildiği gibi asitte bekletilme işlemi hem yüzeyde mikro çatlak oluşumuna hem de OH^- ve H^+ iyonlarının temizlenen parça yüzeyine yapışmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden kaplanacak parçalar asit içerisinde kesinlikle yağlardan ve paslardan temizlendiğinden emin olmak şartı ile olabildiğince minimum süre kalmalı ve durulama işlemi titizlikle yapılmalıdır. Kaplanması istenen parça aside daldırıldıktan sonra Şekil 2.2’de görüleceği üzere OH^- ve H^+ çıkışı gaz baloncuğu galinde gözlemlenmektedir. Minimum kalma süresi gaz çıkışının durduğu zaman olarak belirlenmiştir.

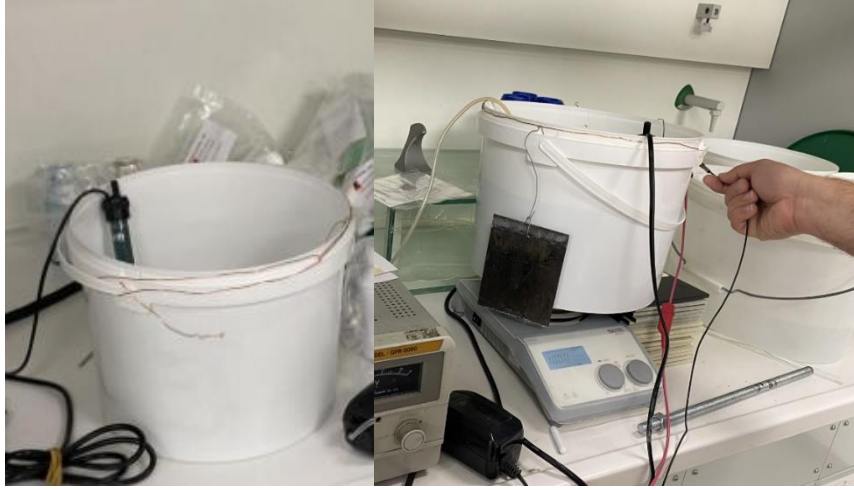


Şekil 2.2 Asit banyosunda oksit çıkışının gösterimi

2.2.2. Elektro Kaplama Banyosu

Kaplama işlemi için öncelikle kaplama kimyasallarının konulması karıştırılması ve beklenmesi gerekmektedir. 10 litrelik kap içerisinde kullanılan malzemeler kısmında belirtilen kimyasallar Tablo 2.3 de belirlenen oranlarda kullanılmıştır.

Başlangıçta Tablo 2.3’de belirtilen oranlarda 5 litrelik elektrolitik banyo sıvısı için kontrollü bir şekilde 225 gr Nikel Klorür (NiCl_2) ve Çinko Klorür (ZnCl_2) eklenmiştir. Ardından 4 litre saf su ilave edilip karıştırıldıktan sonra 450 gr amonyum klorür ilave edilmiştir. Kimyasalların kap içerisine döküldükten sonra homojenite için karıştırma işlemi manyetik karıştırıcı ile 600 rpm’de karıştırılır. Kimyasallar saf su içerisinde çözündükten sonra 175 ml Alekos AZW marka başlatıcı kimyasal ve 10ml Alekos AZW marka parlaticı kullanılmıştır. Sonrasında titanyum tellere bağlı olan çinko ve nikel anotlar kaplama sıvısına daldırılır ardından da manyetik karıştırıcı çalıştırılmaya başlanır. Banyo kimyasalları konulduktan sonra ısıtıcı Şekil 2.3’de belirtildiği gibi yerleştirilir. Bu kaplama banyosunda 2 adet çinko ve nikel anot kullanılmış olup simetrik bir şekilde kaplanacak parçaya eşit uzaklıkta olacak şekilde konumlandırılmıştır.



Şekil 2.3 Kaplama banyosundaki ısıtıcı ve anotların konumlandırılması.

Tablo 2.3 Kaplama banyosunda kullanılan kimyasal oranı

Kullanılan Kimyasal	Kullanılma Oranı
Çinko Klorür	40-60 g/L
Amonyum Klorür	100 g/L
Tepkime başlatıcı	35 ml/L
Parlatıcı	2 ml/L

Şekil 2.4’de belirtildiği gibi kaplama işlemleri için belirli bir iş akışı bulunmaktadır. Bu iş akışı parçaların askılanması ile başlayıp parçaların asit banyolarına daldırılması ile devam etmektedir. Asit banyolarından çıkan parçalar kaplama banyosuna daldırıldıktan sonra pasivasyon sıvısına daldırılıp kaplama işlemi tamamlanır. Kaplama işlemi için dikkat edilmesi gereken noktalardan bir tanesi ise Şekil 2.4’de belirtildiği üzere her bir istasyondan sonra parçalar yüzey kalıntıları ve kimyasal kalıntılardan arındırılması amacı ile saf su ile durulanmasıdır.



Şekil 2.4 Kaplama Banyosu Akış Şeması

Kaplama sonrasında ise parçalar hızlı bir şekilde yüzeyinde pasivasyon işlemi uygulanmıştır. Ancak, pasivasyondan önce yeni kaplanan parçaların kaplama sıvısından arındırılması, kaplama işleminden kaynaklanan yüzeydeki yağın temizlenmesi önemlidir. Pasivasyon banyosu %2.2 oranında pasivasyon sıvısı ile oluşturulmuştur. Buna göre, Şekil 2.5’de görüldüğü üzere 4.5 litrelik pasivasyon banyosu için 90 ml pasivasyon sıvısı kullanılmıştır

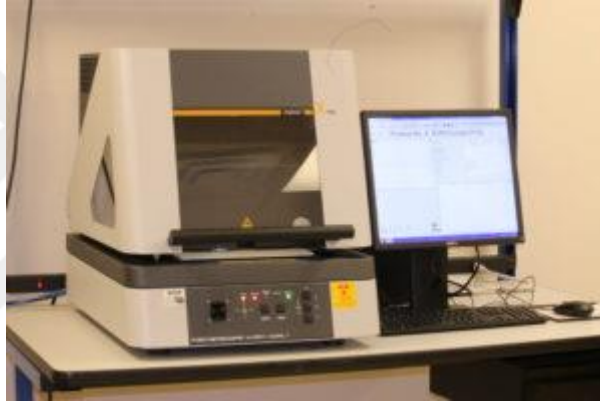


Şekil 2.5 Kullanılan pasivasyon kimyasalı

2.2.3. Ön Deneyler

Kaplama parametreleri değiştirilmeden önce kaplama kimyasallarının optimizasyonu ön deneyler kapsamında yapılmıştır. Bu deneylerde cıvata gibi geometrik olarak girintili çıkıntılı parça yerine 20mm eninde 10mm boyunda ve 0.5 mm kalınlığında 1010 çeliği düz plaka üzerinde çalışılmıştır. Düz bir plakanın kaplanması hem XRF (X-ışınları Floresans) içerisinde daha kolay ölçüm yapılmasına hem de görsel olarak kaplamanın parça üzerindeki etkisinin daha kolay olmasını sağlamıştır.

Kaplanan parçalar Tablo 3.1’de belirtildiği üzere yaşanan problemler ve çözüm önerileri doğrultusunda optimize edilmiştir. Bu optimizasyonda yapılan kimyasal eklemeler doğrultusunda hem numunelerdeki kimyasal oran hem de görsel olarak uygun parçalar elde edilmiştir. Kaplama banyosu optimizasyonu için kullanılan plakalar FISHER XRAY XDAL 237 (Şekil 2.6) cihazında kalınlık ve kimyasal oran kontrolü yapılmaktadır. Kaplama kontrolü ön bölgede 5 arka bölgede 5 adet kontrol noktası olacak şekilde belirlenerek ölçüm alınmıştır. Ölçüm sonucunda FNSS 900122 Çinko Nikel Kaplama Standartları doğrultusunda belirlenmiş olan %12-16 nikel oranı aralığında olması beklenmektedir [23]. Ölçümler sonucu bu nikel oranına sahip olmayan numuneler, kaplama banyosunun uygun olmadığını ve kimyasal oranın değiştirilmesi gerektiğini belirtilmiştir. Ayrıca 900122 standardı doğrultusunda kaplama kalınlığı minimum 5 μm olmalıdır [24].



Şekil 2.6 Fisher Marka XRF Cihazı

Kaplama banyo sıcaklığı 24 C° olarak ayarlanmıştır. Kaplama banyoları kurulduktan sonra kaplamadan önce Ph seviyesi 6.0 olacak şekilde düzenlenmiştir. Banyo pH ı 6.0’dan yüksekse kontrollü hidroklorik asit ile düşürülmüş veya potasyum hidroksit ile yükseltilmiştir.

2.2.4. Kaplama Parametreleri

Elektro kaplama işleminde yapılan literatür araştırmaları doğrultusunda üç ana parametrenin hidrojen gevrekliğine etkisi belirlenmiş olup bu parametreler ve değerleri Tablo 2.4’deki gibi listelenmiştir [25].

Tablo 2.4 Parametreler ve değer aralıkları

Parametreler	Değerler
Akım Yoğunluğu	1-5 Amp/dm ²
Sıcaklık	25 °C – 35 °C
Asitte Kalma Süresi	15 dk – 30 dk

Yapılan araştırmalara göre akım yoğunluğu 1-5 Amp/dm² aralığında belirlenmiştir [17]. Denklem 1’de kaplanacak yüzeyin yüzey alanı formülü verilmiş olup Denklem 2’de yüzey alanı bulunmuştur.

$$\pi d^2 h + \pi S^2 \quad (2.1)$$

$$\pi \times 0,1 \times 0,45 + \pi \times 0,17^2 \times 0,064 = 0,14 + 0,058 = 0,18 \text{ dm}^2 \quad (2.2)$$

Bu durumda minimum akım yoğunluğu 0.18 amper olarak hesaplanmıştır. Ancak akım regülatörü 0.1 amper aralıklarla değeri değiştirilebildiği için hem 0.1 amper hem de 0.2 amper akımları ile kaplama yapılmıştır.

İncelenen alışmalar kapsamında sıcaklık ise 25 °C – 35 °C belirlenmiştir [26]. Belirlenen aralığın üzerinde olması kaplama sırasında nikel parçacıkların numunelere bağlanmamasına düşük sıcaklıkta ise numuneler çok düşük kaplama kalınlığı ile kaplanmaktadır. [26].

Kaplama kompozisyonu son halini aldıktan sonra cıvatalar kaplanmış olup çeşitli kalınlıklarda ve çeşitli parametrelerde cıvatalar kaplandıktan tork testinde yüksek burulma yüküne maruz bırakılmıştır.

Kaplama parametreleri değiştirilerek 10 adet cıvata kaplanmıştır Tablo 2.5’de değiştirilen parametreler ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

Cıvatalar Tablo 2.2’de belirtildiği üzere asit banyosuna daldırılmaktadır. Numuneler daldırıldıktan sonra numune ile asit tepkimeye girerek metal yüzey üzerindeki kirlilikler oksitler gaz halinde yüzeyden çıkma eğilimi göstermektedir. Belirlenen 15 dakikalık asitte kalma süresi gaz çıkışının azaldığı ancak tamamlanmadığı durumu temsil

etmektedir. Asitte kalma süresi 30 dakika olduğunda ise asit içerisindeki numunede herhangi bir gaz çıkışı gözlemlenmemiştir. Aynı oranda parametre değişiminin numunelerdeki mukavemet özelliklerini karşılaştırılması amacı ile akım yoğunluğu ve asitte kalma süresi 2’şer kat arttırılarak değiştirilmiştir. Asitte kalma süresi 30 dakikanın üzerinde olduğunda parçanın ince dış yapısına zarar verdiği tespit edilmiş olup asitte kalma süresi 30 dakika ile sınırlandırılmıştır. Sıcaklık ise oda sıcaklığından başlanılarak 4’er derece arttırılmıştır. Sıcaklığın etkisinin 33 ° C den yüksek olduğu durumlarda kaplama üzerine negatif etkisi olduğu yapılan deneyler sonucunda belirlenmiş olup 33 °C maksimum sıcaklık parametresi olarak belirlenmiştir.

Tablo 2.5’ de deney planı verilmiştir. Daha sonra kaplanmış cıvatalar pasivasyon işlemlerinden sonra bekletilmiştir ve ardından bu kaplanmış parçalar tork tesisi için tork testi düzeneğine bağlanmıştır.

Tablo 2.5 Kaplama parametreleri farklı 10 adet M10 cıvataların kaplama parametreleri

Numune Numarası	Kaplama Süresi (dk)	Akım Yoğunluğu (Amp/dm ²)	Sıcaklık °C	Asitte Kalma Süresi (dk)
ZnNi1	10	25	25	15
ZnNi2	30	5	25	30
ZnNi3	30	5	29	30
ZnNi4	15	10	29	30
ZnNi5	20	10	29	30
ZnNi6	90	1	29	30
ZnNi7	75	1	29	15
ZnNi8	30	2,5	25	15
ZnNi9	45	2,5	32	15
ZnNi10	90	0,5	32	15

2.2.5. İlave Deneyler

Yapılan testler sonucunda ZnNi8 numunesinin sıcaklık ve asitte kalma süresinin detaylı incelenmesi için aynı test, ZnNi8 numunesinin akım yoğunluğu sabit tutularak farklı asitte kalma süresi ve farklı sıcaklıklar için tekrarlanmıştır. Bu durumda 2.5 Amp/dm² akım yoğunluğu en iyi sonuç veren akım yoğunluğu olduğu düşünüldüğünde sıcaklığın ve asitte kalma süresi parametrelerinin değiştiği kaplamalar yapılmıştır. Tablo 3.10’da belirtildiği gibi 3 farklı sıcaklık ve 2 farklı asitte kalma süresi ile toplamda 5 adet numune kaplanmıştır. Bir adet numune ise kaplama kalınlığının etkisinin gösterilmesi amacı ile kaplanmıştır.

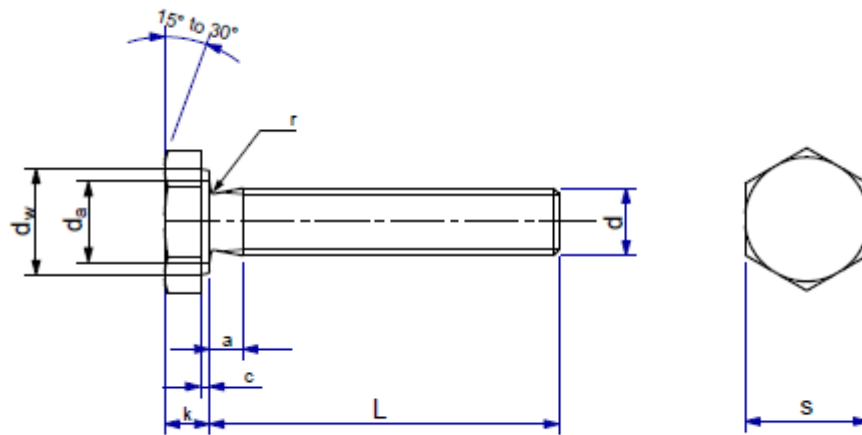
ZnNi8.1, ZnNi8.2, ZnNi8.3, ZnNi8.4, ZnNi8.5, ZnNi8.6 nın kaplama sonrası XRF sonuçları EK kısmında verilmiştir.

Tablo 2.6 ZnNi 8 numunelerinin varyant numuneleri

Numune Numarası	Kaplama Süresi (dk)	Akım Yoğunluğu (Amp/dm ²)	Sıcaklık (°C)	Asitte Kalma Süresi (dk)	Kaplama Kalınlığı (μm)
ZnNi8	30	2,5	25	15	10,98
ZnNi8.1	30	2,5	25	30	15,80
ZnNi8.2	30	2,5	29	15	11,5
ZnNi8.3	30	2,5	29	30	12,55
ZnNi8.4	30	2,5	33	15	10,29
ZnNi8.5	30	2,5	33	30	11,14
ZnNi8.6	75	2,5	25	15	23,55

2.3. Hidrojen Gevrekliği Testi için Cıvata Numunesi

Hidrojen gevrekliği testi için kaplanacak malzeme 10.9 kalite 45 mm boyunda 6 köşe metrik 10 cıvata (Şekil 2.7) seçilmiştir. Detaylı ölçümler Tablo 2.6’da verilmiştir. Hali hazırda zırhlı araçlarda en çok kullanılan cıvata tipi metrik 10 cıvata olduğu için Metrik 10 (M10) cıvata seçilmiştir. Cıvata kalitesi olarak 10.9 kalite cıvata seçilmesinin sebebi ise hidrojen gevrekliği testleri için daha kritik olan sünekliği düşük sertliği yüksek malzeme olmasıdır.



Şekil 2.7 M10x45-10.9 cıvata resmi

Tablo 2.7 M10 cıvata ölçüleri

d (mm)	a (mm)	c (mm)	d _a (mm)	d _w (mm)	k (mm)	r (mm)	s (mm)	L (mm)	P (mm)
10.00	4.50	0.60	11.20	15.60	6.40	0.40	17.00	45.00	1.50

2.4. Çekme Testi

ISO EN 15330 standardında tork değeri kullanılacak malzemenin akma değerinde tork uygulanması gerektiği belirtilmiştir [27]. Akma bölgesi parçaların elastik bölgeden plastik bölgeye geçmeye başladığı bölgedir. Akma değeri çekme testi ile bulunabilir. Çekme testinde akma ve çekme noktaları bulunarak ASTM 898 standardı doğrulaması ile bulunacak oran ile kopma torku ile akma torku arasındaki oran bulunabilir.

Bunun için öncelikle parçaların çekme testinde akma ve çekme noktalarının bulunması gerekmektedir. Üç adet cıvatanın mekanik özellikleri universal test cihazında çekme testi uygulanarak belirlenmiştir. Çekme testi Şekil 2.8 gösterilen Zwick/Roell (Almanya) marka cihazla yapılmış olup sonuçları Şekil 3.2 ve Tablo 3.6’da verilmiştir.



Şekil 2.8 Zwick/Roell çekme testi

Buna göre akma ve çekme noktaları arasında 3 numunede de 0,9 oranında bir oran vardır. Bilgi aynı zamanda ISO 898-1 standardı doğrultusunda 10.9 cıvatalar için çekme dayanımı ve bilgileri ile doğrulanmıştır (Tablo 2.8) [28].

Tablo 2.8 Iso 898-1 standardı cıvataların mekanik ve fiziksel dayanım tablosu [34].

No.	Mechanical or physical property	Property class										
		4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8		9.8	10.9	12.9	
							$d \leq 16$ mm ^a	$d > 16$ mm ^b	$d \leq 16$ mm			
1	Tensile strength, R_m , MPa	nom. c	400			500	600	800		900	1000	1200
		min.	400	420	500	520	600	800	830	900	1040	1220
2	Lower yield strength, R_{eL} ^d , MPa	nom. c	240	—	300	—	—	—	—	—	—	—
		min.	240	—	300	—	—	—	—	—	—	—
3	Stress at 0,2 % non-proportional elongation, $R_{p0.2}$, MPa	nom. c	—	—	—	—	—	640	640	720	900	1080
		min.	—	—	—	—	—	640	660	720	940	1100
4	Stress at 0,0048 d non-proportional elongation for full-size fasteners, $R_{p0.0048}$, MPa	nom. c	—	320	—	400	480	—	—	—	—	—
		min.	—	340 ^e	—	420 ^e	480 ^e	—	—	—	—	—
5	Stress under proof load, S_p ^f , MPa	nom.	225	310	280	380	440	580	600	650	830	970
		Proof strength ratio $\frac{S_{p,nom}/R_{eL, min} \text{ or } S_{p,nom}/R_{p0.2, min} \text{ or } S_{p,nom}/R_{pf, min}}$	0,94	0,91	0,93	0,90	0,92	0,91	0,91	0,90	0,88	0,88
6	Percentage elongation after fracture for machined test pieces, A , %	min.	22	—	20	—	—	12	12	10	9	8
7	Percentage reduction of area after fracture for machined test pieces, Z , %	min.	—					52		48	48	44
8	Elongation after fracture for full-size fasteners, A_f (see also Annex C)	min.	—	0,24	—	0,22	0,20	—	—	—	—	—
9	Head soundness	No fracture										

Buna göre cıvataların kopması için gerekli olan tork belirlendikten sonra torkun 0,9 katı tork cıvatalar için -"akma torku"- olarak belirlenecektir. ISO EN 15330 standardına göre cıvatalar sıkılmadan önce yağlanmalıdır [27]. Bu cıvataların dişleri arasındaki sürtünmeyi azaltmaktadır. Sürtünme kuvvetinin azalması ise cıvatanın daha düşük tork altında deformasyona uğramasını sağlamaktadır.

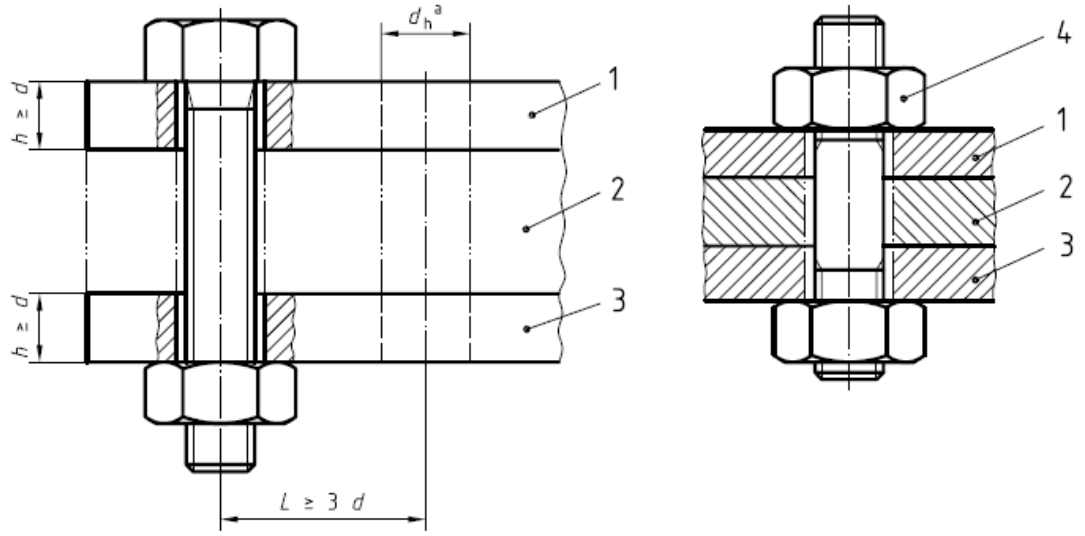
2.5. Tork Testi Düzenegi

Tork testinin belirlenmesi için Astm F519 [29], Astm F1459 [30], Astm F1624 [31], Astm F1940 [32], MIL-PRF-32647 [33] , EN ISO 15330 [27] gibi standartların yanı sıra literatürdeki sadece bu konu ile ilgili yayınlanan çalışmalar da incelenmiştir [11]. Yapılan incelemeler sonucunda cıvatalar için en uygun test mekanizması EN ISO 15330

standardı olarak belirlenmiştir. Bunun en büyük sebebi ise diğer standartlarda standartlarda özel numune üretilmesi zorunluluğudur. EN ISO 15330 standardında ise metrik cıvatalar tork testi için kullanılabilir. Bu durum fazla sayıda cıvata numune kullanılmasını sağlar ayrıca FNSS bünyesinde zırhlı araçlara takılacak olan cıvataların kullanılması gerçekçi bir test ortamı sunmaktadır.

En Iso 15330 standardı, oda sıcaklığında bağlantı elemanlarında hidrojen gevrekliği meydana geldiğini tespit edebilen bir ön yükleme deneyini kapsar. Test, 10°C ila 35°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmelidir. Test yalnızca proses içi kontrol için uygundur ve imalat prosesinin herhangi bir adımından sonra yapılabilir. Test yapılan ortam sıcaklığı 23 °C olarak belirlenmiştir.

Ön yükleme testi uygun test cihazlarında gerçekleştirilmiştir. Bağlantı elemanları, bir eşleşen somun (veya cıvata) ile torklanarak veya önceden kılavuzlu bir plakaya çakılarak akma noktası veya kopma torku aralığında gerilime maruz kalır. Diğer yükleme sistemlerine ve fikstürlere izin verilir, ilgili bağlantı elemanının akma noktası veya kopma torku aralığında gerekli gerilimin elde edilebilmesi şartıyla. Stres veya tork en az 48 saat tutulur. Her 24 saatte bir bağlantı elemanları başlangıç gerilimine veya torka göre yeniden sıkılır ve aynı zamanda hidrojen kırılabilirliğinden kaynaklanan bir arıza olup olmadığı kontrol edilir.



Şekil 2.9 Metrik cıvata ve somunlar için Iso 15330 standardı doğrultusunda belirlenmiş olan test düzeneği [29]

Şekil 2.9’da belirtilmiş olan test düzeneğinde ;

- 1 ve 3 numara sertliği yüksek zırh plakasını temsil eder.
- 2 numara zırh plakaları arasını dolduran plakayı temsil eder
- 4 numara metrik cıvata ile uyumlu somunu temsil eder
- d nominal dış çapını belirler
- L Plaka üzerindeki delikler arasındaki mesafeyi temsil eder.
- h zırh plakalarını temsil eder.

Metrik cıvatalar, vidalar ve saplamalar için aparat, bir üst ve bir alt çelik plakadan oluşur, bkz.Şekil 2.9. Üst plakanın ve alt plakanın sertliği minimum 45 HRC olacaktır. Dayanma yüzeyleri taşlanacak ve pürüzlülük $Ra = 8$ mm'yi aşmayacaktır. Her plakanın kalınlığı minimum $1d$ olacaktır (d , nominal dış çapıdır). Boşluk delikleri, ISO 273 [34], ince seriye uygun olarak d_h çaplarına sahip olacak ve pah kırılmayacaktır. Boşluk deliklerinin (L) birbirinden mesafesi minimum üç çap ($3d$) olacaktır. Testi gerçekleştirirken, en az $1d$ 'lik serbest dış uzunluğu strese maruz bırakılacak ve 5'ten fazla tam dış somunun ötesine uzanmayacaktır. Bu gereklilikleri karşılamak için, paralel ve zemin yüzeyli bir veya daha

fazla elik levha, dolgu levhası/plakası olarak kullanılabilir. Dolgu plakası diğerk elik kalitelerinden ve st ve alt plakaya göre farklı sertlikte üretilir.



Şekil 2.10 15330 Standardına göre oluşturulmuş test düzeneğinin nden görünümü (a) arkadan görünümü (b)

Cıvatalar yağlandıktan sonra Şekil 2.10'daki gibi yerleştirilmiş ve 10 kalite somun ile önce ön gerilme kuvveti uygulanarak sıkılmış sonrada şekil Şekil 2.11'deki kalibrasyonu yeni yapılmış tork anahtarı ile sıkılmıştır. 10 adet cıvata kırıldıktan sonra kırılma değerklerinin ortalaması alınmış olup nihai kırılma tork değeri belirlenmiştir.



Şekil 2.11 Tork anahtarının test dzeneğ üzerinde kullanılması

2.6. Taramalı Elektron Mikroskop İncelemeleri

Tork testi ve çekme testinin yanı sıra kaplama parametrelerinin mikro yapıdaki değişimin incelenmesi için kırılan numenelerde (ZnNi8.1 ve ZnNi8.6) mikroskop analizi yapılmıştır. Bunun için Şekil 2.12’de gösterilen Zeiss marka Merlin model taramalı elektron mikroskop kullanılmıştır. Numunelerden enlemesine kesit alınarak iç yapı analizi yapılmıştır. Ayrıca, kırılmayan cıvatalardan ZnNi8.2 ve ZnNi8.4 numunelerde de boydan kesit alınarak cıvata dişlerinin olduğu yüzeyde mikro çatlak analizi yapılmıştır.



Şekil 2.12 ZEISS Taramalı Elektron Mikroskobu (MERLIN)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. X-Işını Floresans analizi ve sonuçları

3.1.1. Ön Deneyler

Kaplama işlemi öncelikle 1010 çelik plakalar için yapılmıştır. Burada amaç kaplama kimyasallarının optimizasyonudur. Bu ön deney kaplamalarında plakalarda belirli problemler gözlemlenmiştir. Belirlenen problemler ve çözümleri Tablo 3.1’de özetlenmiştir.

Tablo 3.1 Kaplama işlemi sırasında yaşanan problemler ve çözümleri

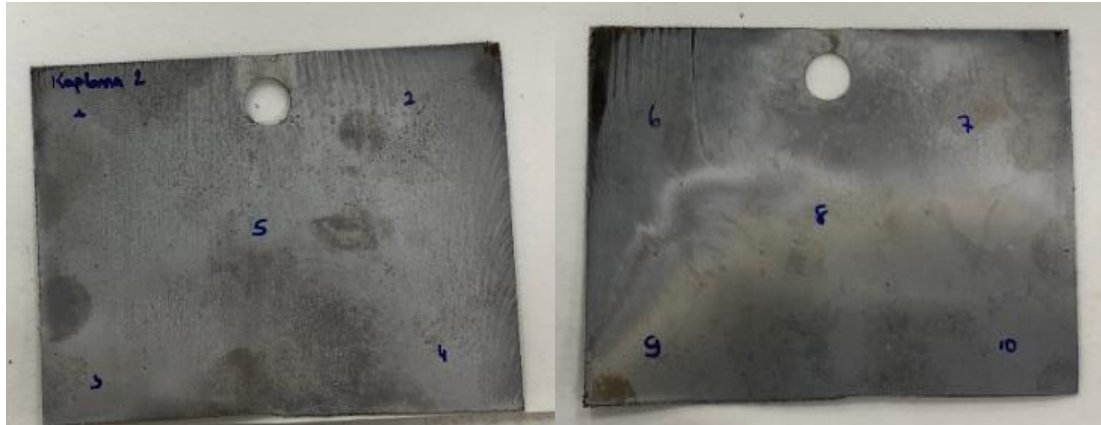
Problem	Sebebi	Çözüm
Yetersiz parlaklık ve renkte bozukluk	Az miktarda parlaticı kullanılması	Parlaticı 2.0 ml/L eklenmiştir.
Düşük akım yoğunluğunda renkte bozukluk	Düşük miktarda tepkime başlatıcı (starter) vardır.	4 ml/L ye kadar tepkime başlatıcı (starter) eklenmiştir.
Yüksek akım yoğunluğunda yanma (düşük çinko miktarı)	Düşük sıcaklıkta kaplanan parçadaki nikel oranının yüksek çinkonun düşük olmasıdır.	Sıcaklık artırılarak kademeli olarak çinko klörür eklenmiştir.
Yüzeyde pürüzlülük ve çukurlaşma	pH çok yüksektir	Sodyum hidro oksit ile pH düşürülmüştür.

Tablo 3.1.’de verilen problemler ile kaplanan ilk plakalarda yine tablodaki çözümler uygulanarak kaplama kimyasalları optimize edilmiştir. İlk denemelerde istenilen

aralıkta olmayan nikel ve çinko oranı yapılan çözüm uygulamaları ile %16 nikel %84 çinko oranı sonraki kaplanan tüm parçalar için sağlanmıştır.

Uygun olmayan kaplama sonuçlarında Şekil 3.1'deki gibi görsel olarak parçalarda yer yer parlaklık bölgesel olarak yüzey pürüzlülüğü göze çarpmaktadır. Bu problemlerin giderilmesi için banyo içerisindeki kimyasal oranı değiştirilmiş olup homojen bir yapı elde edilmiştir.

Kaplama kimyasalı optimize edilmeden önceki örnek numune görüntüsü Şekil 3.1'de verilmiştir. Buna göre numune üzerinden ön tarafta 5 arka tarafta 5 olmak üzere 10 noktadan kaplama kalınlığı ölçümü XRF cihazı ile alınmıştır. Kaplama kalınlığı, teknik resimde belirtilen sınıfın kalınlık toleransları içerisinde olmalıdır [24]. Kaplama kalınlığı 5 µm altında olan parçalar şartsız reddedilme sebebidir [24]. Delikler, oyuklar, dişler, küçük açıklıklar ve normal bir kaplama koşullarında kontrollü bir birikintinin elde edilemeyeceği diğer alanlar da dahil olmak üzere parçanın tüm yüzeyleri belirtilen kaplama kalınlığı sınırlarının altında olabilir [24]. Ancak görsel olarak bakıldığında parça üzerinde kaplamanın görülmesi gerekmektedir, kaplamasız çıplak alan kalmamalıdır. Kaplama kalınlığı, pasivasyon işleminden önce ölçülmelidir. Çinko nikel oranı XRF ile ASTM B568'e göre ölçülmüştür [35].



Şekil 3.1 Kaplama sonucu uygun olmayan plaka

Ön deneylerde kaplama kalınlığından bağımsız olarak kaplamadaki çinko ve nikel oranının Tablo 3.2'deki belirtildiği üzere istenilen seviyede olmadığı saptanmıştır.

Tablo 3.2 Ön deney kaplama XRF sonuçları

Ölçümler	Ölçüm Kalınlığı (µm)	Nikel Oranı %	Çinko Oranı %
1	31,40	16,01	83,99
2	26,65	23,82	76,18
3	29,37	25,79	74,21
4	30,44	21,4	78,96
5	25,28	21,66	78,34
6	34,33	28,66	71,14
7	32,37	17,69	83,31
8	35,41	21,51	78,49
9	36,86	23,44	76,56
10	30,72	15,66	84,34

Tablo 3.1’de uygulanan çözümler ile parçalardaki hatalar giderilmiş olup kimyasal oranı uygun hale gelmiş ve Tablo 3.3’de belirtilen uygun sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 3.3 Uygun kaplamalı plakanın ölçüm sonuçları

Ölçümler	Ölçüm Kalınlığı (µm)	Nikel Oranı %	Çinko Oranı %
1	12,25	14,85	85,15
2	12,17	14,62	85,38
3	8,08	14,66	85,34
4	8,85	14,47	85,53
5	8,83	14,78	85,22
6	8,62	14,51	85,49
7	9,08	14,95	85,05
8	12,57	14,67	85,33
9	12,45	14,53	85,47
10	11,11	14,81	85,09

3.1.2. Cıvataların XRF sonuçları

Deneme plakaları ile Tablo 3.3’de bulunan uygun sonuçlar doğrultusunda kaplama havuzunun uygun kompozisyonda olduğu kanıtlanmış olup nihai ürün olan cıvataların kaplama işlemi başlanmıştır.

10 adet numune cıvata kaplanmıştır. Kaplanan cıvatalar plaka gibi düz bir yüzeye sahip olmadığı ve düz plakaya göre kompleks bir yapıya sahip olduğu için cıvata başlarından ve dış yüzeye yakın yerlerden ASTM B568 standardı doğrultusunda XRF cihazı ile kaplama kalınlığı ve kimyasal oran ölçümü alınmıştır [35] (Tablo 3.4 ve Tablo 3.5) .

Tablo 3.4 Cıvata numuneleri ve kaplama kalınlıkları

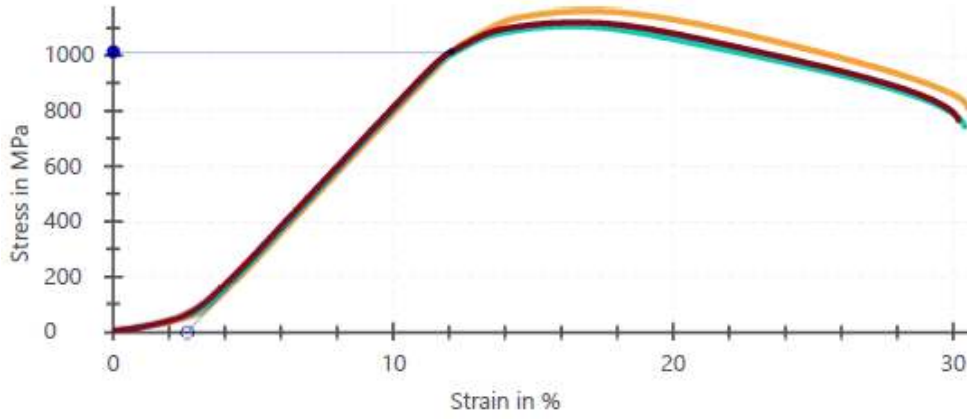
Numune Adı	ZnNi 1	ZnNi 2	ZnNi 3	ZnNi 4	ZnNi 5	ZnNi 6	ZnNi 7	ZnNi 8	ZnNi 9	ZnNi 10
Numune Kalınlığı (μm)	2,99	9,90	8,57	5,83	9,41	24,10	14,80	10,98	23,90	9,67

Tablo 3.5 ZnNi8 Numaralı numunenin kaplama XRF sonuçları ve kimyasal oranı

Ölçümler	Ölçüm Kalınlığı (μm)	Nikel Oranı %	Çinko Oranı %
1	5,46	14,83	85,17
2	7,07	15,29	84,71
3	9,06	15,34	84,66
4	11,06	15,24	84,76
5	8,71	15,73	84,27
6	9,59	15,44	84,56
7	10,45	14,51	85,49
8	13,70	13,81	86,19
9	13,94	13,76	86,24
10	11,63	14,84	85,16
11	12,76	14,34	85,66
12	12,38	14,60	85,40

3.3. Tork Testi

Cıvatalar kaplandıktan sonra tork testi uygulanmıştır. Tork testi için akma noktasına denk gelecek tork değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Akma noktasındaki tork değeri için kopma kuvveti ve kopma torku belirlenmelidir. Kopma kuvveti ZnNiÇN1, ZnNiÇN2 ve ZnNiÇN3 adlı kaplanmış numuneler ile çekme test cihazında belirlenmiş olup Şekil 3.2'deki gibi sonuçlandırılmıştır.



Şekil 3.2 Kaplanmış 3 adet numune için çekme test sonuçları

Şekil 3.2’de ve Tablo 3.6’da görüleceği üzere akma dayanımı ve çekme dayanımı arasında yaklaşık 0.9 luk bir oran vardır. Bu oran cıvataların kopma noktasındaki tork ve akma noktasındaki tork için fikir vermektedir. Kopma noktasındaki tork bulunarak %90 değeri alınarak akma noktasındaki güvenli tork değeri bulunabilir [28].

Tablo 3.6 Çekme testi sonuçları

	Akma Dayanımı (Mpa)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Uygulanan Kuvvet (kN)
ZnNiÇN1	1050	1160	67,20
ZnNiÇN2	1000	1110	64,16
ZnNiÇN3	1010	1120	64,97

Bunun için cıvata tedarikçilerinden temin edilen 10 adet cıvata kırılana kadar torklanmış olup kırılma tork değeri hesaplanmıştır. Kırılma tork değerleri Tablo 3.7’de belirtilmiştir. Bu değerlerin ortalaması alındığında 69,5 gelmektedir. Tork cihazının birer Nm aralıklarla arttırıldığı düşünüldüğünde uygulanması gereken kopma torku 70Nm olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3.7 Tedarikçilerden kaplı halde elde edilen cıvataların kopma torku

	ZnNi T 1	ZnNi T 2	ZnNi T 3	ZnNi T 4	ZnNi T 5	ZnNi T 6	ZnNi 7	ZnNi T 8	ZnNi T 9	ZnNi T 10
Kırılma Torku (Nm)	71	69	68	69	71	70	69	68	69	71

Buna göre akma noktası için uygulanması gereken tork ;

Ortalama Tork x 0.9 = 70 x 0.9 = 63 Nm olarak belirlenmiştir.

Kaplanan cıvatalar 63 Nm torklandıktan sonra EN ISO 15330 standardına göre 24 saat bekletilmiştir 24 saat sonra tekrar 63 Nm torklanmıştır. Tekrar torklama işleminde bazı cıvataların belirlenen tork değerinde tork anahtarı ile sıkıldığında tekrar hareket ettiği bazı cıvataların ise hareket etmediği gözlemlenmiştir. Bu işlem her 24 saatte bir tekrarlanmış olup test süresi toplam 96 saat sürmüştür.

3.3.1. Deney Planındaki Tork Test Sonuçları

Tablo 3.8’de çinko nikel kaplanan cıvataların akma noktasına eş değer tork ile test edildiğinde kırılmadan dayanım süresi tablosu verilmiştir. Bu durumda kırılmayan cıvatalar ZnNi 8 ve ZnNi 10 cıvatalardır. Cıvatalar içerisinde ZnNi1 ve ZnNi5 numaralı numuneler 48 saat içerisinde hidrojen gevrekliği sebebi ile oluşan mikro çatlaklar nedeni ile kırılarak en az dayanıklı numuneler olarak karşımıza çıkmaktadır. ZnNi2, ZnNi4, ZnNi6 numaralı numuneler ise 72. Saat içerisinde kırılmış olup ortalama dayanıklılıkta olmaktadır. ZnNi3, ZnNi7, ZnNi9 numuneleri ise 96.saatte kırılmış olup yüksek dayanıklılıkta olduğu tespit edilmiştir. ZnNi 8 (Şekil 3.4) ve ZnNi 10 (Şekil 3.3) numaralı numuneler ise kırılmayarak kaplanan numuneler arasında en az mikro çatlak barındırdığı bu yüzden de hidrojen gevrekliği sebepli kırılmanın uzun sürdüğü tespit edilmiştir.

Tablo 3.8 Çinko Nikel kaplanan cıvataların kırılmadan dayanma süresi

Numune Numarası	ZnNi 1	ZnNi 2	ZnNi 3	ZnNi 4	ZnNi 5	ZnNi 6	ZnNi 7	ZnNi 8	ZnNi 9	ZnNi 10
Kırılma Süresi (saat)	48	72	96	72	48	72	96	Kırılmadı	72	Kırılmadı

ZnNi10 numunesinin belirlenen akım yoğunluğu kaplama kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır. Kaplama içerisindeki Nikel oranı %12 nin altına düştüğü için kaplama yüzeyinde gözle görülür renk deformasyonu ve yanma şekline benzeyen izler vardır (Şekil 3.3) . Bu izler parçanın iyi bir şekilde kaplanmadığını göstermektedir. Bu durumda bu parçaların tork testinden geçse bile kapsam dışı sayılacaktır.



Şekil 3.3 0,5 Amp/dm² ile kaplanan ZnNi10 numunesi



Şekil 3.4 ZnNi8 numunesi

Bu testler sonucunda, Numuneler Tablo 3.9’da gösterildiği üzere 4 ana parametre ile ikişerli olarak kıyaslanmıştır.

Tablo 3.9 Numunelerin karşılaştırılma tablosu

Kaplama Parametresi	Karşılaştırılan Numuneler
Akım Yoğunluğu	ZnNi3 / ZnNi5
	ZnNi5/ ZnNi6
	ZnNi7/ZnNi8
	ZnNi4/ZnNi6
Asitte Kalma Süresi	ZnNi6/ZnNi7
	ZnNi10/ZnNi11
Kaplama Kalınlığı	ZnNi6/ZnNi7
	ZnNi4/ZnNi5
Sıcaklık	ZnNi8/ZnNi9
	ZnNi2/ZnNi3

ZnNi1 numunesine en yüksek akım yoğunluğu uygulanmış olup beklenildiği üzere hidrojen gevrekliği sebebi ile en hızlı deformasyona uğrayıp kırılan numune olmuştur. Kuntimaddi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda olduğu gibi yüksek akım yoğunluğu

bünyede fazla sayıda OH^- ve H^+ birikmesine ve parçanın yüzeyinde oluşan boşlukların çatlak şeklinde ilerlemesine sebep olmaktadır [36]. Bu yüzden Efdal Çetinkaya'nın çalışmasındaki gibi 2.5 Amp/dm^2 nin çok üzerindeki akım yoğunluğu parçanın üzerinde negatif etkide bulunmasına sebep olmuştur [17]. 48 saat içerisinde kırılan ZnNi5 numunesi ise daha düşük akım yoğunluğu olan 10 Amp/dm^2 ile kaplanmasına rağmen ZnNi1 numunesi (Şekil 3.5) ile aynı sürede kırılma meydana gelmiştir. ZnNi1 ve ZnNi5 numuneleri arasında akım yoğunluğu asitte kalma süresi farklıdır. Hollis in yaptığı çalışmada belirtildiği gibi hidroklorik asitin hidrojen gevrekliği sebebiyle stres çatlağının oluşmasında büyük bir rolü vardır [37]. Bu sebeple düşük akım yoğunluğuna sahip bir numunenin hidrojen gevrekliğine karşı daha dayanımlı olması beklentisine karşın daha yüksek süre asitte tutmak ZnNi5 numunesini en dayanıksız numunelerden biri yapmıştır.



Şekil 3.5 Tork testinden sonra ZnNi1 numunesi

Diğer yandan; ZnNi4, ZnNi6 ZnNi2 numuneleri 72. Saatin sonunda kırılmıştır. Yani akım yoğunluğunun negatif etkisi ZnNi1 ve ZnNi5 numunelerinde görülmüştür. ZnNi4 numunesinin akım yoğunluğu ZnNi2 numunesinin akım yoğunluğuna göre 2 kat daha büyük olmasına karşın dayanım konusunda ZnNi4 numunesi ZnNi2 ile aynı sürede kırılmıştır. Her iki numunede de 900122 Fnss Standardı doğrultusunda minimum $5 \mu\text{m}$ kriterini sağlamaktadır. ZnNi4 numunesi 15 dk boyunca kaplama banyosunda bekletilmiş olup $5,83 \mu\text{m}$ kaplama kalınlığına sahiptir. ZnNi2 ise 30 dk kaplama banyosunda bekletilmiş olup $9,9 \mu\text{m}$ kaplama kalınlığına ulaşmıştır. Bu durumda kaplama kalınlığı ve kaplama süresi düştüğünde hidrojen gevrekliği sebebiyle kırılmaların azalmıştır. Minimum $5 \mu\text{m}$ kaplama kalınlığını sağlayacak şekilde en az süre kaplama havuzunda parçaların tutulması akım

yoğunluğunun getirmiş olduğu negatif etkiyi azaltmaktadır. Diğer bir yandan ZnNi6 numunesinin parametrelerine bakıldığında akım yoğunluğu daha düşük ve sıcaklık daha yüksek olmasına rağmen kaplama süresi fazla olduğu için ZnNi4 numunesi ile aynı zamanda kırılmıştır. Bunun sonucunda kaplama süresinin fazlalığının hidrojen gevrekliğine etkisini arttırıcı bir parametre olduğunu kanısına varılmıştır.



Şekil 3.6 Tork testinden sonra ZnNi9, ZnNi6 ve ZnNi4'nin gösterimi

Sıcaklık parametrelerinin değiştiği ZnNi2 (Şekil 3.5) ve ZnNi3 numunelerinde ZnNi2 25 °C de ZnNi3 numunesi ise 29 °C de kaplanmıştır. Tork testi sonucunda ZnNi2 numunesinin 72. Saatte ZnNi3 numunesinin ise 96. Saatte kırıldığı tespit edilmiştir. Buna göre sıcaklık üzerindeki 4 derecelik artışın hidrojen gevrekliği üzerinde olumlu etkisi olmuştur. Sıcaklık parametreleri ile değerlendirilen diğer numunelerden ZnNi8 25 °C de ZnNi9 (Şekil 3.6) ise 32 °C de kaplanmıştır. ZnNi8 in tork testi boyunca kırılmadığı tespit edilmiştir. ZnNi9 ise 72. Saatte kırılmıştır. Bu durumda ZnNi2 ve ZnNi3 deki sıcaklık artışı hidrojen gevrekliği üzerinde olumlu etki olmasına karşın sıcaklığın 32 ° ye gelmesi negatif etki göstermiştir. Bu durumda 25 ° ye göre 29° de kaplanmış numuneler daha olumlu sonuç verirken 32° de yapılan kaplamaların daha olumsuz sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Akım yoğunluğu için Tablo 3.9'daki gibi 4 adet karşılaştırma yapılmıştır. Buna göre ZnNi 3 ve ZnNi5 numuneleri farklı akım yoğunluğunda olmasına rağmen belirlenen tork altında aynı sürede kırılma gerçekleşmiştir.

3.3.2 İlave Deneyler

Asitte kalma süresi ve sıcaklık parametrelerinin daha detaylı incelemesi amacıyla ZnNi8 numunesi için yapılan kaplama ilave deneyler sonucunda Tablo 3.11'deki gibi karşılaştırma yapılmıştır.

Tablo 3.10 ZnNi 8 varyant numunelerinin karşılaştırma tablosu

Kaplama Parametresi	Karşılaştırılan Numuneler
Asitte Kalma Süresi	ZnNi8.1/ZnNi8.2
	ZnNi8.4/ZnNi8.5
Sıcaklık	ZnNi8.1/ZnNi 8.3/ZnNi8.5
	ZnNi8/ZnNi8.2/ZnNi8.4

Aynı akım yoğunluğuna sahip numuneler farklı sıcaklık altında kaplandığında kaplama kalınlıklarının farklı olduğu tespit edildi. Buna göre 30 dk asit altında beklenen parçaların sıcaklık artışında daha az kaplama kalınlığına sahip olduğu gözlemlendi. Diğer bir yandan 15 dk asit altında beklenen parçaların ise sıcaklık artışı ile kaplama kalınlığında gözle görülür bir artış gerçekleşmemiştir.

Yine aynı akım yoğunluğuna sahip eşit sıcaklıkta kaplanan parçalarda farklı asitte kalma süresi ile kaplama kalınlığının değiştiği gözlemlendi. Buna göre 25° C de kaplanan ZnNi8 ve ZnNi8.1 numunelerini 15 ve 30 dk Tablo 2.2'deki asit çözeltisinde bekletilmiş olup farklı kalınlıkta kaplama yüzeyinin oluştuğu belirlenmiştir. Bu durumda asitte fazla kalan parçaların yüzeylerindeki kalıntılardan arındırılması parçalarda çinko ve nikel tanelerinin daha fazla tutunmasına sebep olduğu yorumu yapılmaktadır. Kaplanılan numuneler tork testinde Tablo 3.12' deki gibi sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlara göre ZnNi8.2 numunesi ve ZnNi8.4 numunesi kırılmamış olup hidrojen gevrekliğine karşı en dayanımlı numuneler olarak belirlenmiştir.

ZnNi8.1 ve ZnNi8.3 numuneleri 96 saat içerisinde kırılmış olup ZnNi3 ZnNi7 ve ZnNi9 ile aynı süre dayanım göstermiştir.

ZnNi8.5 ve ZnNi8.6 numuneleri ise 72 saat dayanarak ZnNi6 ve ZnNi4 numuneleri ile aynı dayanıma sahiptir.

Tablo 3.11 8 No'lu numune varyantlarının tork testinde dayanım süreleri

Numune Numarası	ZnNi 8.1	ZnNi 8.2	ZnNi 8.3	ZnNi 8.4	ZnNi 8.5	ZnNi 8.6
Kırılma Süresi (saat)	96	Kırılmadı	96	Kırılmadı	72	72

ZnNi8 ve ZnNi8.1 numunesi kıyaslandığında ZnNi8 in kırılmadığı ZnNi8.1 'in ise 96. Saatte kırıldığı tespit edilmiştir. Her iki numune aynı sıcaklıkta aynı sürede ve aynı akım yoğunluğunda kaplanmasına rağmen aralarında temizlik için asitte kalma süreleri farkı vardır. İki numune kıyaslandığında temizlik için daha fazla kalan parçanın daha fazla hidrojen gevrekliğine maruz kaldığı ve bunun sebebinde burulma kuvvetinin etkisinde kırıldığı bulunmuştur. Her iki numune kaplama kalınlıkları tarafından karşılaştırıldığında ise asitte çok kalan numunenin 25 °C altında %50 daha fazla parçaya yapıştığı belirlenmiştir.

Benzer bir karşılaştırma metodolojisi ZnNi8.2 ve ZnNi8.3 de yapılmıştır. Burada da asitte kalma süresinin değişmesi parçalarda benzer etki göstermiş olup asitte kısa sürede kalan parçanın hidrojen gevrekliğine daha az maruz kalması ve bunun sebebi doğrultusunda daha yüksek dayanım gösterip uygulanan tork kuvveti etkisinde kırılmamaktadır. Kaplama kalınlığına bakıldığında ise 29 °C sıcaklıkta kaplama kalınlığı iki numune arasında %10 a yakın bir kalınlık farkı bulunmaktadır.

Asit süresine göre yapılan son karşılaştırmada 33 °C de kaplanan ZnNi8.4 ve ZnNi8.5 numuneleri karşılaştırılmış olup önceki numunelere benzer bir sonuç elde edilmiştir. Bu doğrultuda asitte uzun süre kalan parçanın hidrojen gevrekliğine göre dayanımının düşük olduğu belirlenmiştir. Kaplama kalınlıkları değerlendirildiğinde ise %8 lik bir artış olduğu belirlenmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda asitte kalma sürecinin hidrojen gevrekliğini artırıcı etkisi gözlemlenmiştir. Ayrıca farklı sıcaklıklarda asitte kalma süresinin kaplama kalınlığında farklı etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.5'de kaplama kalınlığı artış oranı Denklem 3, Denklem 5 ve Denklem 7'de ki hesaplamalarla belirlenmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda asitte kalma süresini ve sıcaklık arttıkça Şekil 3.7'de görüleceği üzere asitte kalma süresinin kaplama kalınlığı artış oranı üzerindeki etkisi azalmaktadır.

$$\frac{\text{ZnNi 8 Kaplama Kalınlığı}}{\text{ZnNi 8.1 Kaplama Kalınlığı}} \% 100 = \text{Kaplama Kalınlığı Artış Oranı} \quad (3.1)$$

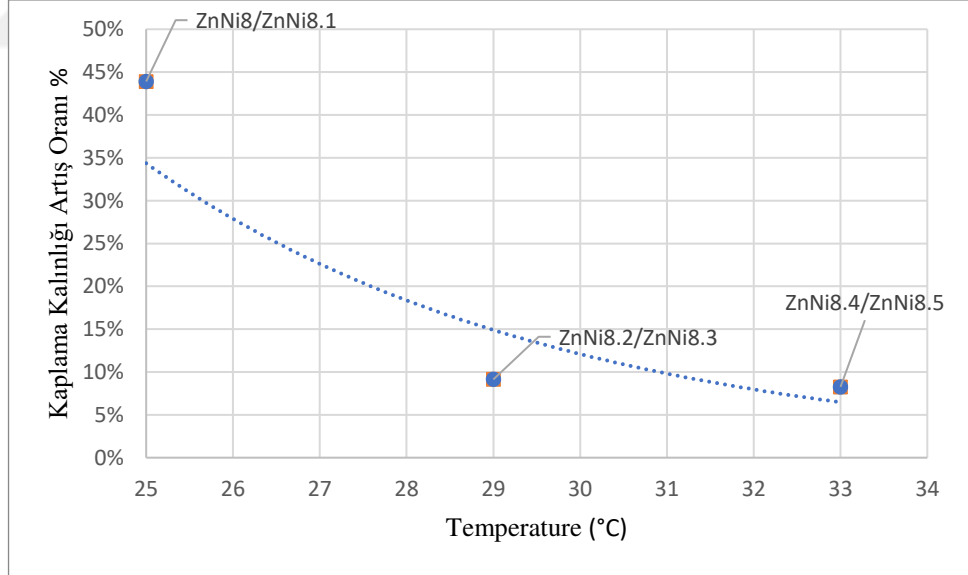
$$\frac{10,98}{15,8} \% 100 = 43,90$$

$$\frac{\text{ZnNi 8.2 Kaplama Kalınlığı}}{\text{ZnNi 8.3 Kaplama Kalınlığı}} \% 100 = \text{Kaplama Kalınlığı Artış Oranı} \quad (3.2)$$

$$\frac{11,5}{12,55} \% 100 = 9,13$$

$$\frac{\text{ZnNi 8.4 Kaplama Kalınlığı}}{\text{ZnNi 8.5 Kaplama Kalınlığı}} \% 100 = \text{Kaplama Kalınlığı Artış Oranı} \quad (3.3)$$

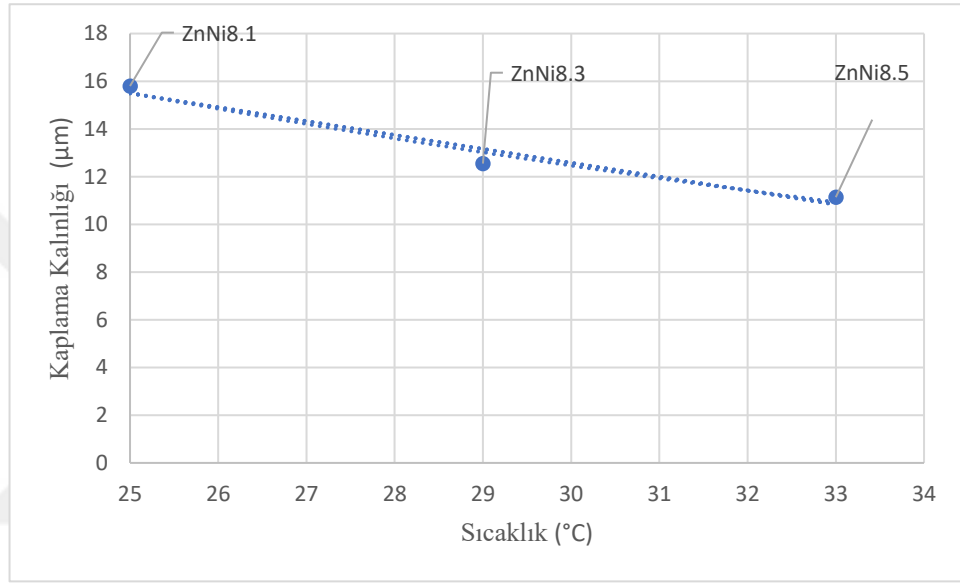
$$\frac{10,29}{11,14} \% 100 = 8,26$$



Şekil 3.7 Sıcaklık kaplama kalınlığı artış oranı grafiği

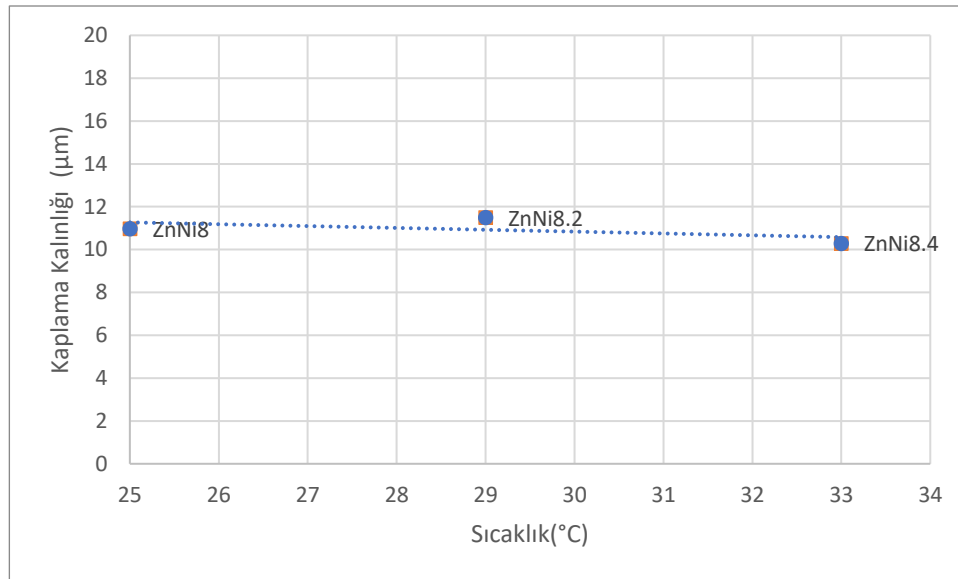
Kaplanma sıcaklıkları farklı olan ZnNi8.1, ZnNi8.3, ZnNi8.5 karşılaştırıldığında farklı sıcaklıklarda kaplanmalarına karşı tork testinde aynı sürede kırılmıştır. Yapılan tork

testinde üç numune de 96. Saatte kırılmıştır. Bu kıyaslama sonucu yapılacak yorum sıcaklığın hidrojen gevrekliği üzerindeki etkisi akım yoğunluğu ve asitte kalma süresi kadar etkili olmadığıdır. Yapılan deneyler sonucunda 30 dk asitte bekletilen numunelerde sıcaklığın kaplama kalınlığı üzerinde etkisi olduğu görülmüştür. Sıcaklığın 25°C den 33 °C ye çıkması Şekil 3.8’de görüleceği üzere kaplama kalınlığının 15,8 µm den 11,14 µm ye düşmesine sebep olmaktadır.



Şekil 3.8 30 dakika asitte bekletilen parçaların sıcaklık kaplama kalınlığı grafiği

15 dakika asitte bekletilen ve sıcaklıkları farklı olan ZnNi8 ZnNi8.2 ve ZnNi8.4 numunelerinde ise sıcaklık değişiminin kaplama kalınlığı üzerinde Şekil 3.9’da görüleceği üzere büyük bir etkisinin bulunmadığını göstermiştir.

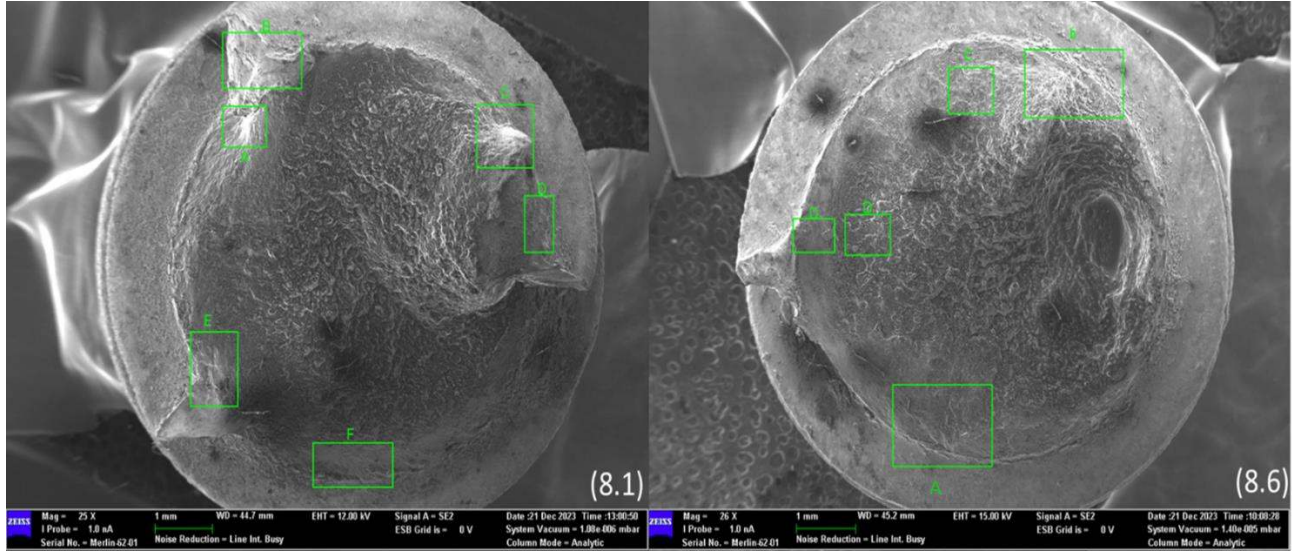


3.4 Taramalı Elektron Mikroskop Analizi

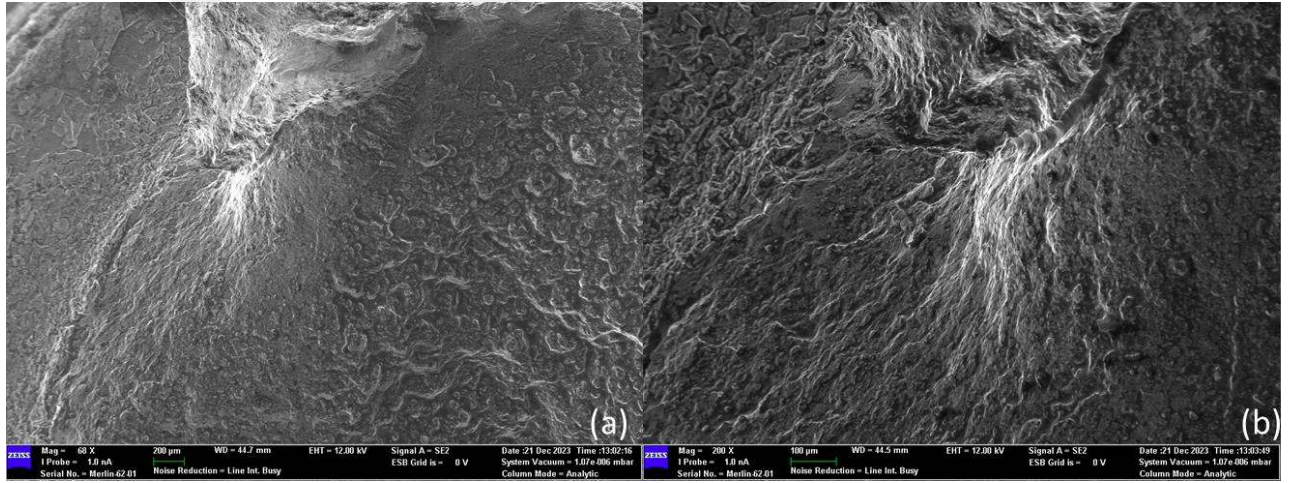
Tork testi sonucunda kırılan ZnNi8.1 ve ZnNi8.6 parçaları taramalı elektron mikroskop analizi ile kesit görüntüleri üzerinden kırılma analizleri yapılmıştır. 96. saatte kırılan ZnNi8.1 ve 72. saatte kırılan ZnNi8.6 numuneleri karşılaştırılmıştır.

Yapılan karşılaştırma sonucunda 72. saatte kırılan ZnNi8.6 numunesi Şekil 3.10’da görüldüğü üzere miktarca daha fazla gevrek kırılma ile kopmuştur. Bu da ZnNi8.1 numunesinin hidrojen gevrekliği sebebi kırılmaya karşı ZnNi8.6 numunesine göre daha dirençli olmasını açıklar niteliktedir. Şekil 3.10’daki C ve D bölgelerine Şekil 3.11’de ve Şekil 3.12’de daha yakından incelenmiştir. Bu şekillerde yarık tipi kırılma (cleavage like brittle failure) da yine hidrojen gevrekliğinin sonucudur. Yine iç yapıda mikro çatlakların olduğu belirlenmiştir.

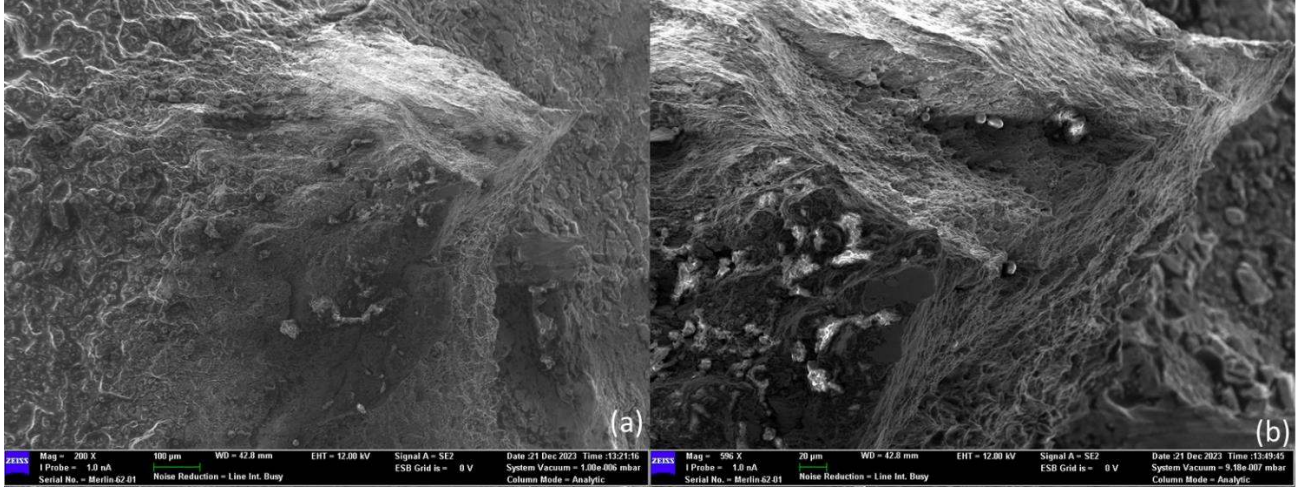
ZnNi8.1 numunesinde yüzeye yakın bölge olan Şekil 3.10’da belirtilen Şekil 3.11’de detaylı gösterilen A bölgesinde ve Şekil 3.12’de detaylı gösterilen C bölgesinde yüksek stres birikmesine bağlı çatlaklar gözlemlenmiştir. Özellikle C bölgesindeki kırılma bölgesinin sivriligi yine numunede gevrek kırılma olduğunu göstermektedir.



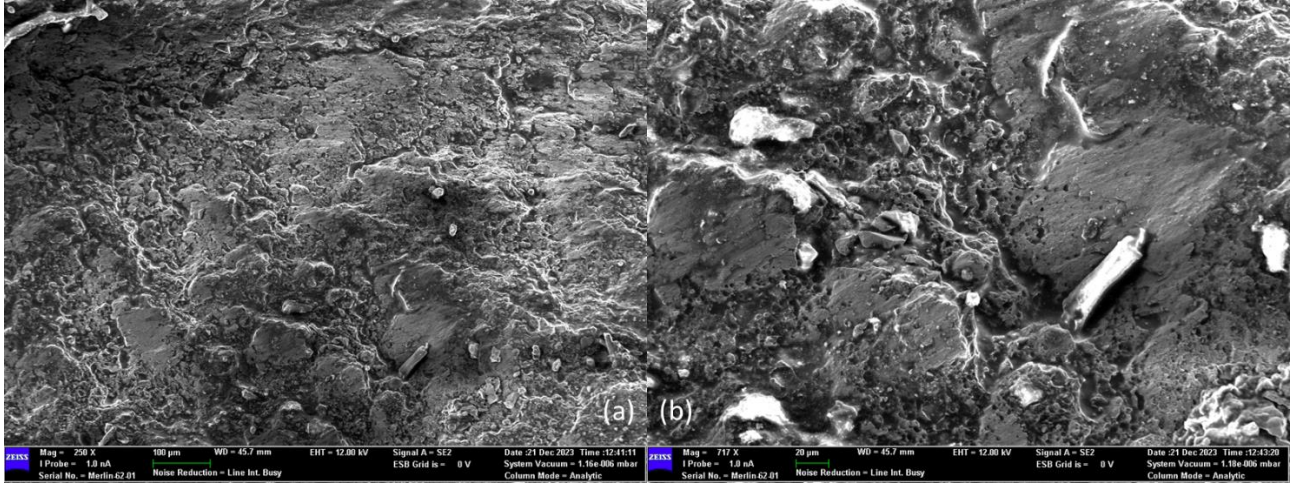
Şekil 3.10 ZnNi 8.1 ve ZnNi8.6 numunelerinin elektro mikroskop analizleri gösterimi 25X



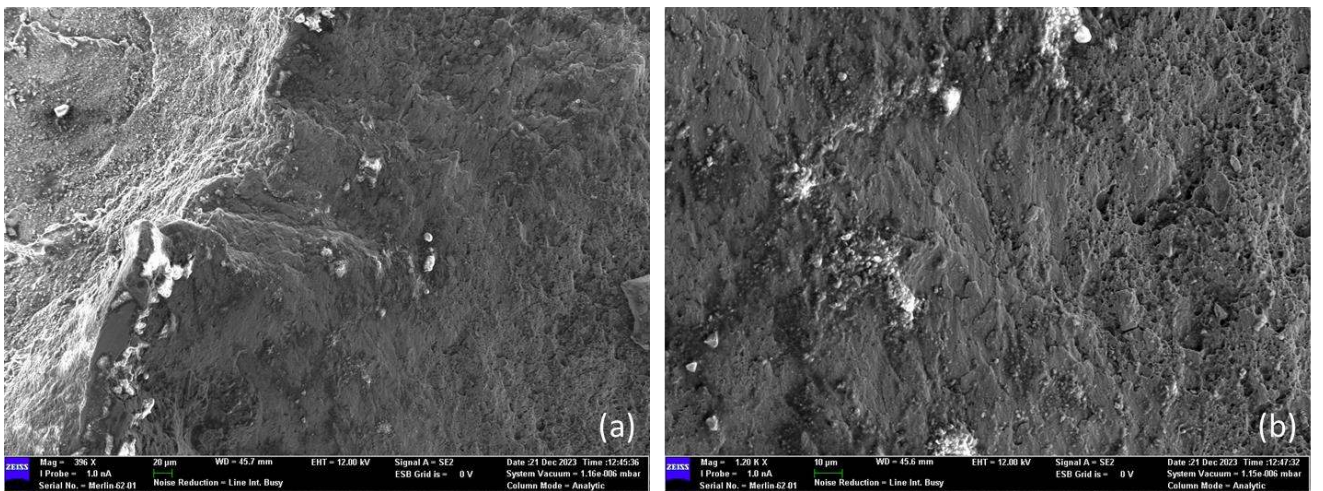
Şekil 3.11 ZnNi8.1 numunesinin Şekil 3.10'da belirtilen A bölgesinin taramalı elektron mikroskobu ile gösterimi (a) 68X (b) 200X



Şekil 3.12 ZnNi8.1 numunesinin Şekil 3.10'da belirtilen C bölgesinin taramalı elektron mikroskobu ile gösterimi (a) 68X (b) 200X



Şekil 3.13 ZnNi8.6 numunesinin Şekil 3.10'da belirtilen C bölgesinin taramalı elektron mikroskobu ile gösterimi (a) 250X (b) 717X

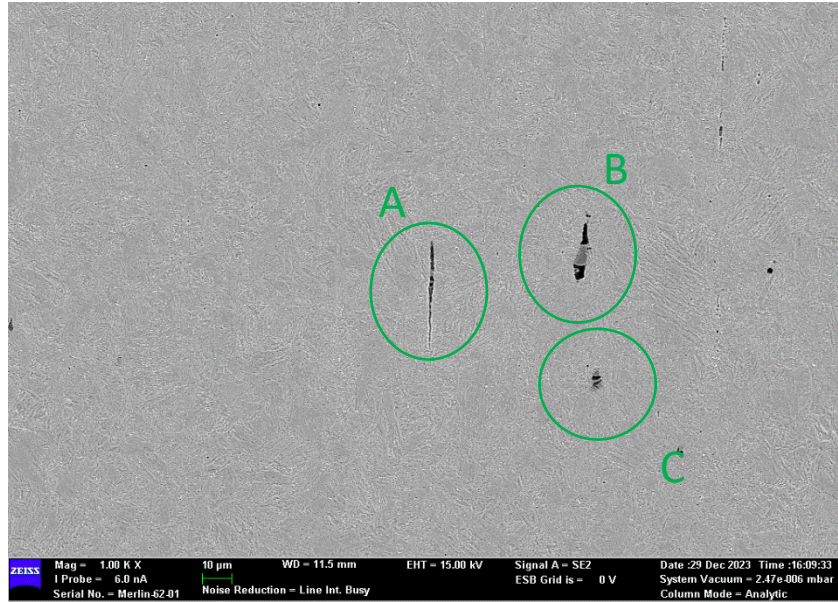


Şekil 3.14 ZnNi8.6 numunesinin Şekil 3.10'da belirtilen D bölgesinin taramalı elektron mikroskobu ile gösterimi (a) 398X (b) 1200X

Çeliklerde hidrojen nedeniyle sünek yapıdan gevrek yapıya geçiş, hala yeterince araştırılmamış ve açıklığa kavuşturulmamış bir olgu olmaya devam etmektedir [38]. Dünya literatüründe, hidrojen gevrekliğinden kaynaklı kırılma bölgelerindeki mikro geçiş yapısı, ve parçaların kırılmasından sorumlu olan ana tetikleme mekanizması ve hidrojen gevrekleşme mekanizmaları hakkında görüşlerde anlaşmazlık ve kutuplaşma vardır [22] .

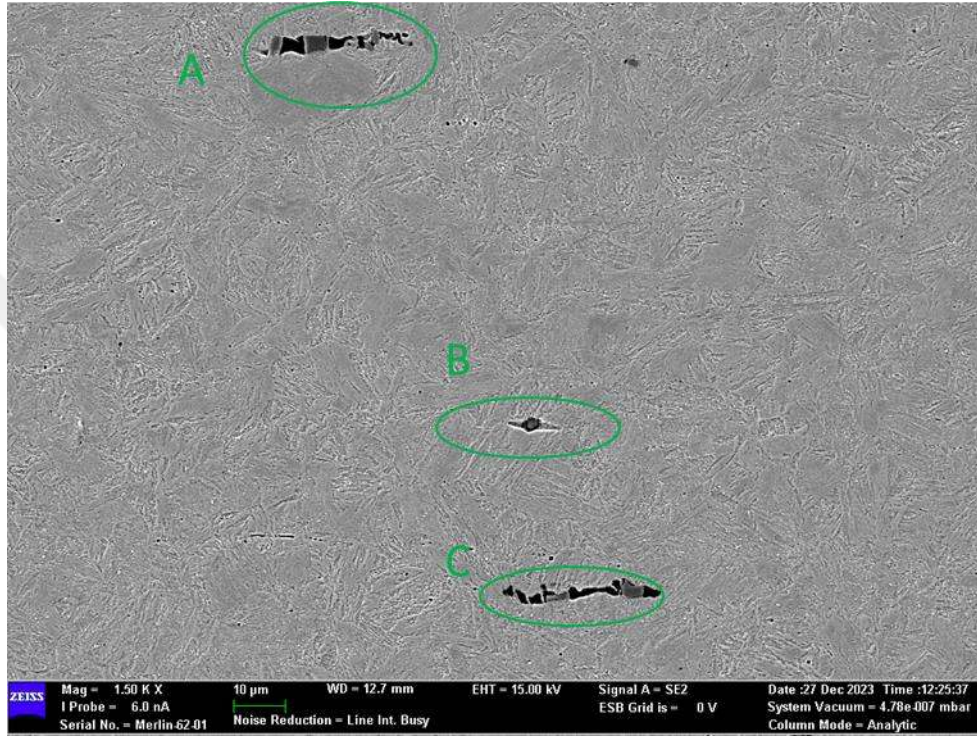
Tork testi sonucunda kırılmayan ZnNi8 ve ZnNi8.2 parçalar, dikey eksenden kesilerek bu kesit görüntüleri üzerinden taramalı elektron mikroskop ile mikro çatlak analizleri yapılmıştır.

Parçaların kesit alanından bakıldığında her iki numune de merkeze yakın bölgelerde mikro çatlaklar tespit edilmiştir. ZNNi8 numunesi için merkeze yakın ve Şekil 3.15’de A, B, C ile gösterilen 3 bölgede mikron düzeyinde çatlaklar meydana gelmiştir . Merkeze yakın bölgelerde boyut olarak en büyük çatlak yaklaşık 40 mikron uzunluğunda A çatlağı olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 3.15 ZnNi8 numunesi mikro çatlak gösterimi 1000 X

ZnNi8.2 numunesinde de ZnNi8 numunesine benzer merkeze yakın 3 bölgede mikron düzeyinde çatlaklar meydana gelmiş olup Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Merkeze yakın bölgelerde boyut olarak en büyük çatlak yaklaşık 20 mikron uzunluğunda ve Şekil 3.16'da gösterilen A ve C çatlakları olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 3.16 ZnNi8.2 numunesi taramalı elektron mikroskobu çatlak gösterimi 1500X

ZnNi8 ve ZnNi812 numunesinde görülen çatlaklar cıvata üretim yöntemi olan soğuk dövme metodu süresinde meydana gelme ihtimali olup tork testi boyunca uygulanan burulma kuvveti süresince çatlak boyutlarında ilerleme mümkün olabilir. Cıvataların özellikle dış çevresinde boylu boyunca ilerleyen bir çatlağın görülmemesi numunelerde kaplama kaynaklı hidrojen gevrekliğinden çok fazla oranda etkilenmediği yorumu yapılabilir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan tez çalışmasında, elde edilen denemeler, testler ve analizler doğrultusunda çinko nikel kaplamalarda hidrojen gevrekliğini etkileyen iki ana parametre olduğu tespit edilmiştir. Bunlardan ilki ve en önemlisi akım yoğunluğu, diğeri ise parçaların temizlik için asitte bekletilme süresi olarak karşımıza çıkmaktadır. 0.5 Amp/dm^2 'de kaplanan civataların kaplama kalitesi ve kaplama oranı açısından uygun olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca parçaların MIL-PRF-32647 standardı doğrultusunda belirli bir kaplama kalınlığı üzerinde olması şartı vardır [33]. Bu yüzden de benzer kaplama kalınlığı için düşük akım yoğunluğu ile kaplanan parçalar daha uzun süre kaplama banyosunda kalmaktadır. Diğer bir yandan yüksek akım yoğunluğunun hidrojen gevrekliğine sebep olduğu anlaşılmıştır. Bu durum parçaların kaplama havuzunda daha az sürede istenilen kalınlıkta kaplanmasını sağlamaktadır. Farklı akım yoğunlukları ile çinko nikel kaplanan parçalar için akım yoğunluğu literatürde $0.5 - 5 \text{ Amp/dm}^2$ verilmesine ilaveten civatalar için en ideal akım yoğunluğu 2.5 Amp/dm^2 olduğu sonucuna varılmıştır. Akım yoğunluğundan sonra hidrojen gevrekliğine etkisi olduğu tespit edilen ikinci parametre asitte kalma süresi olarak belirlenmiştir. Çinko nikel kaplı parçalarda kaplama kalitesinin artırılması amacı ile yapılan aside daldırma işlemini her ne kadar kaplama kalitesini arttırsa da hidrojen gevrekliğine sebep olmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda aside daldırma işleminin çok az yapılması durumunda ise parçaların iyi bir şekilde kaplanmadığı, çinko ve nikel oranının parçanın farklı bölgelerinde farklı sonuç verdiği tespit edilmiştir. Asitte fazla bekletildiğinde ise parçaların farklı bölgelerinde çinko nikel oranının yine aynı olmasına karşın parça üzerindeki hidrojen, hidrit ve hidroksil, bağlanmasının fazlalığından kaynaklı olarak hidrojen gevrekliğine maruz kalma durumunu arttırmaktadır. Asitte kalma süresi için en optimal çözüm kaplanacak parçayı kontrollü olarak asit havuzuna daldırmak ve OH^- ve H^+ iyonlarının baloncuk şeklinde çıkışını gözlemlemektir. Buna göre tepkimenin bittiği sürenin belirlenmesi sağlanmış olacaktır. Sonrasında parçaların tüm yüzeylerinin asit ile temas edeceği şekilde parçalar askılandıktan sonra asitte tepkime süresince bekletilmesi yönünde olacaktır.

Yapılan tez çalışmasında ayrıca kaplama sıcaklığının hidrojen gevrekliği üzerindeki etkisi incelenmiş olup aynı akım yoğunluğu ve aynı asitte kalma süresinde farklı

sıcaklıklarda kaplanan parçalar tork testine tabi tutulmuştur. Sonrasında numuneler üzerinde sıcaklığın bir etkisinin olmadığı numunelerin aynı sürede kırıldığı tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra tez kapsamında belirli şartlar altında kaplama kalınlığının hidrojen gevrekliği üzerinde etkisi gözlemlenmiştir. Özellikle uzun süre asitte bekletilen parçalarda XRF analizleri sonucunda sıcaklık arttıkça kaplama kalınlığının azaldığı tespit edilmiştir. Bu durumda MIL-PRF-32647 standardında belirtilen kaplama kalınlığına ulaşılması için düşük sıcaklıkta parçaların daha kısa kaplama süresine sahip olması anlamına gelmektedir.

Tez kapsamında kırılan ZnNi8.1 ve ZnNi 8.6 numuneleri taramalı elektron mikroskobu yöntemi ile görüntüler alınmış bu görüntüler karşılaştırılarak tork testinde erken kırılan parçalarda daha fazla gevrek kırılmalar olduğu saptanmıştır. Kırılmayan ZnNi8 ve ZnNi8.2 numuneleri ise merkeze yakın bölgelerde üretim yöntemi doğrultusunda başlayan ve tork testi sonucu ilerlediği düşünülen mikro çatlaklar barındırmaktadır.

Sonuç olarak zırhlı araçlarda çok fazla sayıda kullanılan cıvataların çinko nikel kaplama işleminde hidrojen gevrekliği miktarını azaltmak için 2.5 Amp/dm^2 akım yoğunluğu ve 15 dakika asitte bekleme süresinin optimum olduğu sonucu çıkmıştır.

Tez kapsamında parçalar kaplama havuzuna tek seferli askılama yöntemi ile daldırılmıştır. Gelecek çalışmalarda sanayide çokça kullanılan tambur ile kaplama yöntemi ile benzer bir çalışma yapılabilir buna uygun parametreler tespit edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] A. Brenner and S. Senderoff, "Electrodeposition of alloys," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 111, no. 2, p. 34C, Jan. 1964, doi: 10.1149/1.2426105. A. S. H. Makhoulf, "Current and advanced coating technologies for industrial applications," in *Elsevier eBooks*, 2011, pp. 3–23. doi: 10.1533/9780857094902.1.3.
- [2] A. S. H. Makhoulf, "Current and advanced coating technologies for industrial applications," in *Elsevier eBooks*, 2011, pp. 3–23. doi: 10.1533/9780857094902.1.3.
- [3] *Chemical vapor deposition - recent advances and applications in optical, solar cells and solid state devices*. 2016. doi: 10.5772/61559.
- [4] N. Kanani, "Electroplating: basic principles, processes and practice," *ResearchGate*, Jan. 2005, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/289108229_Electroplating_Basic_Principles_Processes_and_Practice
- [5] Empowering Pumps, *Thermal Spraying Coating*. 2018. [Online]. Available: <https://empoweringpumps.com/tstcoatings-microstructures-science-thermal-spray-coatings/>
- [6] D. Ö. Ü. S. Aslan, "Tin partikül takviyeli akımsız nikel bor kompozit kaplamalar," 2019.
- [7] "VK-40 Bell bath for electroplating Buy for 2366 roubles wholesale, cheap - B2BTRADE," *B2BTRADE*. <https://b2b.trade/product/sp-eneksis-vk-40-vanna-kolokolnaya-dlya-galvaniki>
- [8] GalvInfo Center, "The Continuous Electroplating Process for Steel Sheet Products," *Galvinfo*, 2017. https://www.galvinfo.com/wp-content/uploads/sites/8/2017/05/GalvInfoNote_2_2.pdf (accessed Oct. 07, 2023).

- [9] R. Gibala, "Hydrogen embrittlement and stress corrosion cracking," Jan. 01, 1984.
<https://www.osti.gov/biblio/5282330>
- [10] M. Nagumo, *Fundamentals of Hydrogen embrittlement*. 2023. doi: 10.1007/978-981-99-0992-6.
- [11] "Raymond, L. (1988) Hydrogen embrittlement Prevention and Control. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA. - References - Scientific Research Publishing."
<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1841265>
- [12] J.-C. Eun, *Handbook of Engineering Practice of Materials and Corrosion*. 2020. doi: 10.1007/978-3-030-36430-4.
- [13] B. E. Dergisi, "Çinko-Nikel yüzeylerin pasivasyonu."
<https://www.baglantielemanlari.com/?h3505/cinko-nikel-yuzeylerin-pasivasyonu>.
- [14] "Investigation on the effect of the pressing process on the corrosion time of zinc nickel coated steels via the electrolysis method," *Süleyman Demirel Üniversitesi Bilgi Merkezi*, Meli Gülümsek, 2023. Accessed: Nov. 08, 2023. [Online]. Available: <https://tara.sdu.edu.tr/vufind/Record/165058>
- [15] P. De Figueiredo Vieira, B. Van Den Bossche, and A. Rose, "Characterisation of a Zn / Ni Plating Bath," *Plating & Surface Finishing*, Sep. 2009, [Online]. Available: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA636989.pdf>
- [16] E. Yılmaz, "Electroplated coating of cast steel and zamak parts by acidic zinc nickel," *Dergi Park*, Jan. 2013, [Online]. Available: <http://openaccess.marmara.edu.tr/handle/11424/18990>
- [17] Y. Doç. Dr. B. D. Çorbacıoğlu, "Çinko-nikel alaşım kaplamalarının karakteristiklerinin incelenmesi," 2006. <http://dspace.yildiz.edu.tr/xmlui/handle/1/5081>

- [18] S. K. Dwivedi and M. Vishwakarma, "Hydrogen embrittlement in different materials: A review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 46, pp. 21603–21616, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.201.
- [19] K. R. Sriraman, S. Brahimi, J. A. Szpunar, and S. Yue, "Hydrogen embrittlement of Zn-, Zn-Ni-, and Cd-coated high strength steel," *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 43, no. 4, pp. 441–451, Jan. 2013, doi: 10.1007/s10800-013-0529-2.
- [20] Y. Reda, A. M. El-Shamy, and A. K. Eessaa, "Effect of hydrogen embrittlement on the microstructures of electroplated steel alloy 4130," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 2973–2982, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.asej.2018.08.004.
- [21] F.C. Bayram, "THE DETERMINATION OF HYDROGEN EMBRITTLEMENT BEHAVIOR OF ARMOR STEELS BY EXPERIMENTAL METHODS AND THE OPTIMIZATION OF HYDROGEN BACK-DIFFUSION OPERATION," 2021.
<http://acikerisim.agu.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12573/1084?show=full>
- [22] M. B. Djukic, V. S. Zeravcic, G. Bakić, A. Sedmak, and B. Rajičić, "Hydrogen embrittlement of low carbon structural steel," *Procedia Materials Science*, vol. 3, pp. 1167–1172, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.06.190.
- [23] FNSS Defence Systems, "Zinc-Nickel Coating Standard," Standard No. FNSS-900122-D4, 2018.
- [24] FNSS Defence Systems, "Hydrogen Embrittlement Relief," Standard No. FNSS-900113-D4, 2018.
- [25] M. a. V. Devanathan, Z. Stachurski, and W. Beck, "A technique for the evaluation of hydrogen embrittlement characteristics of electroplating baths," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 110, no. 8, p. 886, Jan. 1963, doi: 10.1149/1.2425894.

- [26] D. W. Baudrand, "Do's & don'ts of bright zinc plating part I: Alkaline zinc," *ResearchGate*, Dec. 2009, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/298607579_Do's_don'ts_of_bright_zinc_plating_part_I_Alkaline_zinc
- [27] D. Standard, *DS/EN ISO 15330*. 1999.
- [28] Nsai. N. S. A. O. Ireland, *I.S. EN ISO 898-1:2013. Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel - Part 1: Bolts, screws and studs with specific property classes - coarse thread and fine pitch thread (ISO 898-1: 2013)*. 2013.
- [29] *ASTM F519-06e2 Standard Test Method for Mechanical Hydrogen Embrittlement Evaluation of Plating/coating Processes and Service Environments*. 2006.
- [30] A. S. for T. A. Materials, *Standard Test Method for Determination of susceptibility of Metallic Materials to Hydrogen Gas Embrittlement (HGE)*. 2012.
- [31] "Standard test method for measurement of hydrogen embrittlement threshold in steel by the incremental step loading technique." <https://www.astm.org/f1624-12r18.html>
- [32] D. D. I. F. Normung, *Clearance holes for bolts and screws (ISO 273 : 1979)*. 1979.
- [33] Department of Defense, "MIL-PRF-32647: Performance Specification of Zinc- Nickel Electroplating for Fasteners," [2020].
- [34] International Organization for Standardization, "ISO 273:1979, Fasteners — Clearance holes for bolts and screws," Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 1979.

- [35] ASTM International, "ASTM B568-98(2019), Standard Test Method for Measurement of Coating Thickness by X-Ray Spectrometry," West Conshohocken, PA, Standard, 2019. [Online]. Available: <https://www.astm.org/Standards/B568.htm>. Accessed on: 1 Apr. 2023.
- [36] K. Sadananda, J. H. Yang, N. Iyyer, N. Phan, and A. Rahman, "Sacrificial Zn–Ni coatings by electroplating and hydrogen embrittlement of high-strength steels," *Corrosion Reviews*, vol. 39, no. 6, pp. 487–517, Oct. 2021, doi: 10.1515/corrrev-2021-0038.
- [37] A. C. Hollis and J. C. Scully, "The stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement of titanium in methanol-hydrochloric acid solutions," *Corrosion Science*, vol. 34, no. 5, pp. 821–835, May 1993, doi: 10.1016/0010-938x(93)90102-m.
- [38] M. B. Djukic, V. S. Zeravcic, G. Bakić, A. Sedmak, and B. Rajičić, "Hydrogen damage of steels: A case study and hydrogen embrittlement model," *Engineering Failure Analysis*, vol. 58, pp. 485–498, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.05.017.

EK-1



FNSS Savunma Sistemleri A.Ş. Kaplama İnceleme Raporu

Ürün: 2804001 / NiZn/Fe
Uygulama: 2804001 / NiZn/Fe

Dir.: Fischer
Not:

Blok: 3397

Talep No :

Firma:

Parça No :

Not :

Operatör : BERİL

Ölçüm Tarihi: 04/08/2023 Saat: 11:49:07

Değerler

	NiZn1 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 $\%$	Zn 1 $\%$
Ortalama	31.28	21.55	78.45
Standart Sapma	3.664	4.225	4.225
En küçük Değer	25.28	15.66	71.14
En büyük Değer	36.86	28.86	84.34
Ölçüm Aralığı	11.59	13.20	13.20
Ölçüm Sayısı	10	10	10
Ölçüm Süresi	10 sec		
Kolimatör	2 = 0.30 Dm.		

Ölçümler

n=	1	NiZn1=	31.40 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	16.01 %	Zn 1 =	83.99 %
n=	2	NiZn1=	26.65 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	23.82 %	Zn 1 =	76.18 %
n=	3	NiZn1=	29.37 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	25.79 %	Zn 1 =	74.21 %
n=	4	NiZn1=	30.44 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	21.04 %	Zn 1 =	78.96 %
n=	5	NiZn1=	25.28 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	21.66 %	Zn 1 =	78.34 %
n=	6	NiZn1=	34.33 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	28.86 %	Zn 1 =	71.14 %
n=	7	NiZn1=	32.37 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	17.69 %	Zn 1 =	82.31 %
n=	8	NiZn1=	35.41 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	21.51 %	Zn 1 =	78.49 %
n=	9	NiZn1=	36.86 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	23.44 %	Zn 1 =	76.56 %
n=	10	NiZn1=	30.72 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	15.66 %	Zn 1 =	84.34 %

HELMUT FISCHER GmbH

Fischerscope®

XRAY XDAL 237 SDD



Rapor Tarihi: 04/08/2023 Saat: 11:49:31

EK-2

Test report

Customer : CAN ALTINTAŞ

ID No : M10x45-10.9

Tester : RBATASOY

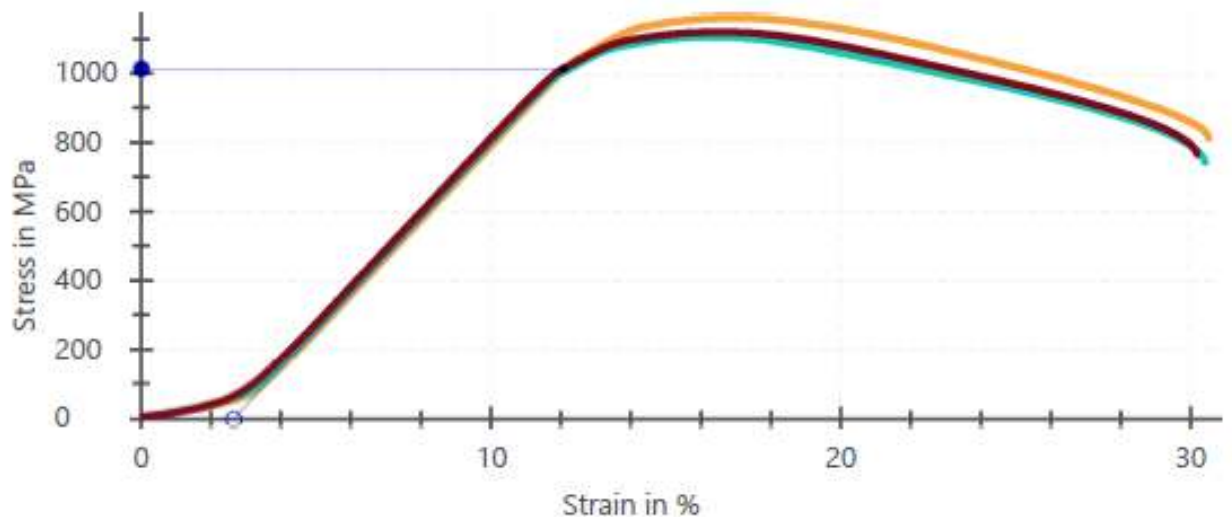
Pre-load : 5 MPa Speed, yield point : 15 MPa/s

Speed, Young's modulus : 30 MPa/s Test speed : 25 %/min

Test results:

Legend	No.	S0 mm ²	Lc mm	Lu mm	R _{p0.2} MPa	R _{eH} MPa	R _m MPa	F _M kN	A _{manual} %
	1	58	13,00	16,5	1050	-	1160	67,29	26,9
	3	58	13,00	16,7	1000	-	1110	64,16	28,5
	4	58	13,00	17	1010	-	1120	64,97	24,1

Series graph:



Statistics:

Series	S0 mm ²	Lc mm	Lu mm	R _{p0.2} MPa	R _{eH} MPa	R _m MPa	F _M kN	A _{manual} %
n = 3	58	13,00	16,73	1020	-	1130	65,47	26,5
$\bar{x}$	0,000	0,00	0,2517	26,2	-	28,1	1,63	2,2
s	0,00	0,00	1,50	2,56	-	2,49	2,49	8,38
v [%]	0,00	0,00	1,50	2,56	-	2,49	2,49	8,38

EK-3



FNSS Savunma Sistemleri A.Ş Kaplama İnceleme Raporu

Ürün: **2804001 / NiZn/Fe**
3484

Dir.: Fischer

Blok:

Uygulama: 2804001 / NiZn/Fe

Not:

Talep No :
Firma: CAN ALTINTAS
Parça No : ZINi-T25-MIN30-AY2.5=ASIT short ZnNi8
Not :
Operatör : IABAK
Ölçüm Tarihi: 16/11/2023 Saat: 15:03:04

Değerler

	NiZn1 Å, Åµm	Ni 1 %	Zn 1 %
Ortalama	10.98	13.36	86.64
Standart Sapma	1.759	0.568	0.568
En küçük Değer	10.33	12.71	85.55
En büyük Değer	15.37	14.45	87.29
Ölçüm Aralığı	5.045	1.735	1.735
Ölçüm Sayısı	10	10	10
Ölçüm Süresi	10 sec		
Kolimatör	2 = 0.30 Dm.		

Ölçümler

n=	1	NiZn1=	10.38 Åµm	Ni 1 =	14.45 %	Zn 1 =	85.55 %
n=	2	NiZn1=	10.33 Åµm	Ni 1 =	14.26 %	Zn 1 =	85.74 %
n=	3	NiZn1=	11.43 Åµm	Ni 1 =	13.28 %	Zn 1 =	86.72 %
n=	4	NiZn1=	13.69 Åµm	Ni 1 =	12.80 %	Zn 1 =	87.20 %
n=	5	NiZn1=	11.37 Åµm	Ni 1 =	13.03 %	Zn 1 =	86.97 %
n=	6	NiZn1=	13.46 Åµm	Ni 1 =	13.39 %	Zn 1 =	86.61 %
n=	7	NiZn1=	13.43 Åµm	Ni 1 =	13.24 %	Zn 1 =	86.76 %
n=	8	NiZn1=	10.80 Åµm	Ni 1 =	13.29 %	Zn 1 =	86.71 %
n=	9	NiZn1=	12.28 Åµm	Ni 1 =	13.15 %	Zn 1 =	86.85 %
n=	10	NiZn1=	12.37 Åµm	Ni 1 =	12.71 %	Zn 1 =	87.29 %

HELMUT FISCHER GmbH

Rapor Tarihi: 16/11/2023 Saat:

EK-4



FNSS Savunma Sistemleri A.Ş Kaplama İnceleme Raporu

Ürün: 2804001 / NiZn/Fe
3484

Dir.: Fischer

Blok:

Uygulama: 2804001 / NiZn/Fe

Not:

Talep No :
Firma: CAN ALTINTAS
Parça No : ZINi-T29-MIN30-AY2.5=ASIT Long ZnNi8.3
Not :
Operatör : IABAK
Ölçüm Tarihi: 16/11/2023 Saat: 15:03:04

Değerler

	NiZn1 Å, Åµm	Ni 1 %	Zn 1 %
Ortalama	12.55	13.36	86.64
Standart Sapma	1.759	0.568	0.568
En küçük Değer	10.33	12.71	85.55
En büyük Değer	15.37	14.45	87.29
Ölçüm Aralığı	5.045	1.735	1.735
Ölçüm Sayısı	10	10	10
Ölçüm Süresi	10 sec		
Kolimatör	2 = 0.30 Dm.		

Ölçümler

n=	1	NiZn1=	10.38 Åµm	Ni 1 =	14.45 %	Zn 1 =	85.55 %
n=	2	NiZn1=	10.33 Åµm	Ni 1 =	14.26 %	Zn 1 =	85.74 %
n=	3	NiZn1=	11.43 Åµm	Ni 1 =	13.28 %	Zn 1 =	86.72 %
n=	4	NiZn1=	13.69 Åµm	Ni 1 =	12.80 %	Zn 1 =	87.20 %
n=	5	NiZn1=	15.37 Åµm	Ni 1 =	13.03 %	Zn 1 =	86.97 %
n=	6	NiZn1=	13.46 Åµm	Ni 1 =	13.39 %	Zn 1 =	86.61 %
n=	7	NiZn1=	13.43 Åµm	Ni 1 =	13.24 %	Zn 1 =	86.76 %
n=	8	NiZn1=	10.80 Åµm	Ni 1 =	13.29 %	Zn 1 =	86.71 %
n=	9	NiZn1=	14.28 Åµm	Ni 1 =	13.15 %	Zn 1 =	86.85 %
n=	10	NiZn1=	12.37 Åµm	Ni 1 =	12.71 %	Zn 1 =	87.29 %

HELMUT FISCHER GmbH

Rapor Tarihi: 16/11/2023 Saat:

EK-5



FNSS Savunma Sistemleri A.Ş Kaplama İnceleme Raporu

Ürün: 2804001 / NiZn/Fe
3483

Dir.: Fischer

Blok:

Uygulama: 2804001 / NiZn/Fe

Not:

Talep No :
Firma: CAN ALTINTAS
Parça No : ZINi-T29-MIN30-AY2.5- Asit Short ZnNi8.2
Not :
Operatör : IABAK
Ölçüm Tarihi: 16/11/2023 Saat: 13:54:30

Değerler

	NiZn1 $\text{\AA}$, $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 %	Zn 1 %
Ortalama	11.50	13.82	86.18
Standart Sapma	1.615	0.307	0.307
En küçük Değer	9.201	13.30	85.81
En büyük Değer	13.67	14.19	86.70
Ölçüm Aralığı	4.472	0.893	0.893
Ölçüm Sayısı	10	10	10
Ölçüm Süresi	10 sec		
Kolimatör	2 = 0.30 Dm.		

Ölçümler

n=	1	NiZn1=	9.201 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	14.19 %	Zn 1 =	85.81 %
n=	2	NiZn1=	9.366 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	14.06 %	Zn 1 =	85.94 %
n=	3	NiZn1=	12.95 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	13.69 %	Zn 1 =	86.31 %
n=	4	NiZn1=	12.40 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	13.30 %	Zn 1 =	86.70 %
n=	5	NiZn1=	12.07 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	13.85 %	Zn 1 =	86.15 %
n=	6	NiZn1=	11.28 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	13.81 %	Zn 1 =	86.19 %
n=	7	NiZn1=	10.66 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	13.35 %	Zn 1 =	86.65 %
n=	8	NiZn1=	10.15 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	13.89 %	Zn 1 =	86.11 %
n=	9	NiZn1=	13.67 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	14.17 %	Zn 1 =	85.83 %
n=	10	NiZn1=	13.26 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	13.93 %	Zn 1 =	86.07 %

EK-6



FNSS Savunma Sistemleri A.Ş. Kaplama İnceleme Raporu

Ürün: **2804001 / NiZn/Fe**
3485

Dir.: Fischer

Blok:

Uygulama: 2804001 / NiZn/Fe

Not:

Talep No :
Firma: CAN ALTINTAS
Parça No : ZINi-T32-MIN30-AY2.5=ASITSHORT ZnNi8.4
Not :
Operatör : IABAK
Ölçüm Tarihi: 16/11/2023 Saat: 15:47:31

Değerler

	NiZn1 $\text{\AA}$, $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 %	Zn 1 %
Ortalama	11.14	14.56	85.44
Standart Sapma	1.093	0.375	0.375
En küçük Değer	9.275	13.58	85.08
En büyük Değer	13.13	14.92	86.42
Ölçüm Aralığı	3.854	1.338	1.338
Ölçüm Sayısı	10	10	10
Ölçüm Süresi	10 sec		
Kolimatör	2 = 0.30 Dm.		

Ölçümler

n=	1	NiZn1=	9.275 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	14.37 %	Zn 1 =	85.63 %
n=	2	NiZn1=	11.24 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	14.61 %	Zn 1 =	85.39 %
n=	3	NiZn1=	11.31 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	14.92 %	Zn 1 =	85.08 %
n=	4	NiZn1=	10.24 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	14.74 %	Zn 1 =	85.26 %
n=	5	NiZn1=	12.49 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	13.58 %	Zn 1 =	86.42 %
n=	6	NiZn1=	11.23 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	14.54 %	Zn 1 =	85.46 %
n=	7	NiZn1=	10.68 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	14.60 %	Zn 1 =	85.40 %
n=	8	NiZn1=	10.51 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	14.69 %	Zn 1 =	85.31 %
n=	9	NiZn1=	11.34 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	14.76 %	Zn 1 =	85.24 %
n=	10	NiZn1=	13.13 $\text{\AA}\mu\text{m}$	Ni 1 =	14.78 %	Zn 1 =	85.22 %

EK-7



FNSS Savunma Sistemleri A.Ş. Kaplama İnceleme Raporu

Ürün: **2804001 / NiZn/Fe**
3486

Dir.: Fischer

Blok:

Uygulama: 2804001 / NiZn/Fe

Not:

Talep No :
Firma: CAN ALTINTAS
Parça No : ZINi-T32-MIN30-AY2.5=ASITSHORT ZnNi8.5
Not :
Operatör : CALTINTAS
Ölçüm Tarihi: 16/11/2023 Saat: 16:28:40

Değerler

	NiZn1	Å, Åµm	Ni 1 %	Zn 1 %
Ortalama	10.29		13.01	86.99
Standart Sapma	2.565		0.396	0.396
En küçük Değer	5.407		12.35	86.34
En büyük Değer	13.21		13.66	87.65
Ölçüm Aralığı	7.803		1.304	1.304
Ölçüm Sayısı	11		11	11
Ölçüm Süresi	10	sec		
Kolimatör	2	=	0.30	Dm.

Ölçümler

n=	1	NiZn1=	5.657	Åµm	Ni 1 =	13.66 %	Zn 1 =	86.34 %
n=	2	NiZn1=	5.407	Åµm	Ni 1 =	13.56 %	Zn 1 =	86.44 %
n=	3	NiZn1=	9.322	Åµm	Ni 1 =	12.35 %	Zn 1 =	87.65 %
n=	4	NiZn1=	10.29	Åµm	Ni 1 =	12.65 %	Zn 1 =	87.35 %
n=	5	NiZn1=	11.45	Åµm	Ni 1 =	13.07 %	Zn 1 =	86.93 %
n=	6	NiZn1=	10.67	Åµm	Ni 1 =	12.67 %	Zn 1 =	87.33 %
n=	7	NiZn1=	11.47	Åµm	Ni 1 =	12.84 %	Zn 1 =	87.16 %
n=	8	NiZn1=	11.50	Åµm	Ni 1 =	12.82 %	Zn 1 =	87.18 %
n=	9	NiZn1=	11.88	Åµm	Ni 1 =	13.08 %	Zn 1 =	86.92 %
n=	10	NiZn1=	12.33	Åµm	Ni 1 =	13.07 %	Zn 1 =	86.93 %
n=	11	NiZn1=	13.21	Åµm	Ni 1 =	13.30 %	Zn 1 =	86.70 %

EK-8



FNSS Savunma Sistemleri A.Ş Kaplama İnceleme Raporu

Ürün: **2804001 / NiZn/Fe**
3480

Dir.: Fischer

Blok:

Uygulama: 2804001 / NiZn/Fe

Not:

Talep No :
Firma: CAN ALTINTAS
Parça No : ZINi-T25-MIN30-AY2.5 ZnNi8.1
Not :
Operatör : IABAK
Ölçüm Tarihi: 15/11/2023 Saat: 19:29:47

Değerler

	NiZn1 Å, Åµm	Ni 1 %	Zn 1 %
Ortalama	15.80	13.08	86.92
Standart Sapma	3.750	0.849	0.849
En küçük Değer	7.811	12.52	84.88
En büyük Değer	20.88	15.12	87.48
Ölçüm Aralığı	13.07	2.596	2.596
Ölçüm Sayısı	11	11	11
Ölçüm Süresi	10 sec		
Kolimatör	2 = 0.30 Dm.		

Ölçümler

n=	1	NiZn1=	7.811 Åµm	Ni 1 =	14.34 %	Zn 1 =	85.66 %
n=	2	NiZn1=	11.63 Åµm	Ni 1 =	13.11 %	Zn 1 =	86.89 %
n=	3	NiZn1=	13.38 Åµm	Ni 1 =	12.62 %	Zn 1 =	87.38 %
n=	4	NiZn1=	15.07 Åµm	Ni 1 =	12.83 %	Zn 1 =	87.17 %
n=	5	NiZn1=	16.43 Åµm	Ni 1 =	12.80 %	Zn 1 =	87.20 %
n=	6	NiZn1=	15.63 Åµm	Ni 1 =	12.58 %	Zn 1 =	87.42 %
n=	7	NiZn1=	17.41 Åµm	Ni 1 =	12.52 %	Zn 1 =	87.48 %
n=	8	NiZn1=	17.27 Åµm	Ni 1 =	12.60 %	Zn 1 =	87.40 %
n=	9	NiZn1=	19.16 Åµm	Ni 1 =	12.74 %	Zn 1 =	87.26 %
n=	10	NiZn1=	20.88 Åµm	Ni 1 =	12.61 %	Zn 1 =	87.39 %
n=	11	NiZn1=	19.08 Åµm	Ni 1 =	15.12 %	Zn 1 =	84.88 %

EK-9



FNSS Savunma Sistemleri A.Ş Kaplama İnceleme Raporu

Ürün: **2804001 / NiZn/Fe**
3479

Dir.: Fischer

Blok:

Uygulama: 2804001 / NiZn/Fe

Not:

Talep No :

Firma: CAN ALTINTAS

Parça No : ZINi-T25-MIN75-AY2.5 ZnNi8.6

Not :

Operatör : IABAK

Ölçüm Tarihi: 15/11/2023 Saat: 19:22:08

Değerler

	NiZn1 $\tilde{A}$, $\tilde{A}\mu m$	Ni 1 %	Zn 1 %
Ortalama	23.55	13.80	86.20
Standart Sapma	9.825	0.580	0.580
En küçük Değer	7.674	12.75	85.16
En büyük Değer	32.61	14.84	87.25
Ölçüm Aralığı	24.94	2.090	2.090
Ölçüm Sayısı	14	14	14
Ölçüm Süresi	10 sec		
Kolimatör	2 = 0.30 Dm.		

Ölçümler

n=	1	NiZn1=	25.35 $\tilde{A}\mu m$	Ni 1 =	14.84 %	Zn 1 =	85.16 %
n=	2	NiZn1=	25.98 $\tilde{A}\mu m$	Ni 1 =	14.75 %	Zn 1 =	85.25 %
n=	3	NiZn1=	32.61 $\tilde{A}\mu m$	Ni 1 =	14.18 %	Zn 1 =	85.82 %
n=	4	NiZn1=	31.22 $\tilde{A}\mu m$	Ni 1 =	13.73 %	Zn 1 =	86.27 %
n=	5	NiZn1=	30.48 $\tilde{A}\mu m$	Ni 1 =	13.88 %	Zn 1 =	86.12 %
n=	6	NiZn1=	24.06 $\tilde{A}\mu m$	Ni 1 =	13.78 %	Zn 1 =	86.22 %
n=	7	NiZn1=	30.25 $\tilde{A}\mu m$	Ni 1 =	13.74 %	Zn 1 =	86.26 %
n=	8	NiZn1=	30.69 $\tilde{A}\mu m$	Ni 1 =	13.66 %	Zn 1 =	86.34 %
n=	9	NiZn1=	31.03 $\tilde{A}\mu m$	Ni 1 =	13.65 %	Zn 1 =	86.35 %
n=	10	NiZn1=	31.61 $\tilde{A}\mu m$	Ni 1 =	13.65 %	Zn 1 =	86.35 %
n=	11	NiZn1=	7.978 $\tilde{A}\mu m$	Ni 1 =	13.92 %	Zn 1 =	86.08 %
n=	12	NiZn1=	7.674 $\tilde{A}\mu m$	Ni 1 =	13.86 %	Zn 1 =	86.14 %
n=	13	NiZn1=	10.27 $\tilde{A}\mu m$	Ni 1 =	12.78 %	Zn 1 =	87.22 %
n=	14	NiZn1=	10.55 $\tilde{A}\mu m$	Ni 1 =	12.75 %	Zn 1 =	87.25 %