KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DC04EK VE DC04ED KALİTE SACLARDA EMAYE KAPLAMA İŞLEMLERİ, EMAYE KALİTE VE PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ

ŞEYDA EFE

KOCAELİ 2025

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DC04EK VE DC04ED KALİTE SACLARDA EMAYE KAPLAMA İŞLEMLERİ, EMAYE KALİTE VE PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ

ŞEYDA EFE

Doç. Dr. Meltem YILDIZ
Danışman, Kocaeli Üniv. .....

Doç. Dr. Murat Efgan KİBAR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Dr. Öğr. Üyesi Engin AÇIKALIN
Jüri Üyesi, İstanbul Gedik Üniv. .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 23/06/2025

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım "DC04EK ve DC04ED Kalite Saclarda Emaye Kaplama İşlemleri, Emaye Kalite ve Performansının İyileştirilmesi" yüksek lisans tez çalışmasında,

- Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler ……. tarafından ……. no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

……...

Şeyda EFE

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan ***"Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"*** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☒ Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

……...

Şeyda EFE

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında bilgi, tecrübe ve rehberliğiyle bana yol gösteren, değerli katkılarıyla çalışmamın her aşamasında destek olan danışmanım Doç. Dr. Meltem Yıldız'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Akademik gelişimime olan katkıları ve sabrı, bu süreci daha verimli ve anlamlı kılmıştır.

Ayrıca, eğitim hayatım boyunca her daim yanımda olan, beni koşulsuz destekleyen sevgili aileme; sabırları, sevgileri ve verdikleri manevi güç için sonsuz teşekkür ederim.

Tezimin uygulama bölümünde her türlü desteği sağlayan çalışmış olduğum firma Yıldız Demir Çelik Sanayi A.Ş' ye, değerli laboratuvar ekibime ve Akcoat A.Ş firması Yücel DAYMAZ ve ekibine teşekkür ederim.

Mayıs – 2025 Şeyda EFE

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
ŞEKİLLER DİZİNİ vii
TABLOLAR DİZİNİ ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ x
ÖZET xi
ABSTRACT xii
1. GİRİŞ 1
2. GENEL BİLGİLER 3
2.1. Emayenin Tanımı ve Tarihçesi 3
2.2. Emaye Hammaddeleri 4
2.3. Emaye Türleri 6
2.3.1. Astar Kat Emayeler 6
2.3.2. Üst Kat Emayeler 7
2.4. Emaye Kaplama Teknolojisinin Gelişimi 7
2.5. Emaye Kaplamada Kullanılan Sac Kaliteleri 9
2.5.1. DC04EK Kalitesi 9
2.5.2. DC04ED Kalitesi 10
2.6. Emaye–Çelik Arayüz Teorileri 10
2.6.1. Kimyasal Bağ Teorisi 11
2.6.2. Mekanik Bağ Teorisi 11
2.6.3. Difüzyon Teorisi 12
2.7. Emaye Kaplama Yöntemleri 13
2.7.1. Daldırma (Dip Coating) Yöntemi 13
2.7.2. Yaş Sprey (Wet Spray) Yöntemi 14
2.7.3. Elektrostatik Toz Kaplama Yöntemi 14
2.7.4. Elektroforez Yöntemi 15
2.7.5. Akıtma (Flow Coating) Yöntemi 16
2.7.6. Plazma Sprey Yöntemi 17
2.8. Balık Pulu ve Diğer Yüzey Hataları 18
2.8.1. Balık Pulu (Fish Scale) 18
2.8.2. Kabarcık (Blistering) 19
2.8.3. Karbon Kaynaması (Carbon Boiling) 19
2.8.4. Portakal Kabuğu Görünümü 19
2.8.5. Zayıf Yapışma ve Delaminasyon 20
2.9. Emaye Kaplama Kalitesine Etki Eden Parametreler 20
2.9.1. Taban Malzemenin Özellikleri 21
2.9.2. Yüzey Pürüzlülüğü ve Ön İşlem 21
2.9.3. Emaye Tozunun Bileşimi 21
2.9.4. Kaplama Yöntemi 22
2.9.5. Pişirme Sıcaklığı ve Süresi 22
2.9.6. Kat Sayısı ve Katman Yapısı 22
2.10. Emaye Kalite Kontrol Testleri 23
2.10.1. Kalınlık Ölçümü 23

2.10.2. Parlaklık ve Renk Ölçümü ... 24
2.10.3. Darbe Testi ... 24
2.10.4. Yapışma Testi ... 24
2.10.5. Görsel Yüzey Kontrolleri ve Hata Tespiti ... 25
2.11. Kullanılan Yüzey ve Malzeme Analiz Yöntemleri ... 25
2.11.1. SEM – Metalografik İnceleme ... 26
2.11.2. Parlaklık ve Renk Ölçümü ... 26
2.11.3. Yapışma ve Darbe Testi Analizleri ... 27
3. LİTERATÜR ÖZETİ ... 28
3.1. Emaye Kalitesine Katkı Oranının Etkisi ... 28
3.2. Emaye Kalitesine Pişirme Sıcaklığı ve Süresinin Etkisi ... 30
3.3. Sıcaklık Değişimini İnceleyen Çalışmalar ... 33
3.4. Farklı Bileşimlerde Emaye Oranlarını İnceleyen Çalışmalar ... 33
3.5. Farklı Çelik Özelliklerinde Emaye Kalitesinin İyileştirilmesi ... 35
3.6. Emaye Kaplama Yöntemlerinin Emaye Kalitesine Etkisi ... 36
3.7. Emaye Kaplamanın Taban Malzeme İle İlişkisi ... 37
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ... 43
4.1. Malzemeler ve Metotlar ... 43
4.1.1. Emaye Kaplama İşleminde Kullanılacak Saclar ve Karakterizasyonları ... 43
4.1.1.1. 0,50mm ve 0,70mm DC04EK ve DC04ED Kalite Sacların Hazırlanması ... 43
4.1.1.2. DC04EK ve DC04ED Kalite Sacların Kimyasal ve Mekanik Özellikleri ... 45
4.1.1.3. DC04EK ve DC04ED Kalite Saclarda Sertlik Ölçümünün Yapılışı ... 55
4.1.1.4. DC04EK ve DC04ED Kalite Saclarda Pürüzlülük Ölçümünün Yapılışı ... 57
4.1.1.5. DC04EK ve DC04ED Kalite Sacların Mikroyapı Analizlerinin Yapılışı ... 58
4.1.2. Emaye Kaplama İşleminde Kullanılacak Emaye Tozunun Karakterizasyonu ... 67
4.1.3. Uygulama Yöntemleri ve Emaye Kaplama Prosesleri ... 68
4.1.3.1. Daldırma Yöntemi İle Kaplama ... 68
4.1.3.2. Püskürtme Yöntemi ile Kaplama ... 72
4.1.4. Emaye Kaplama Sonrası Yapılan Performans Testleri ... 75
4.1.4.1. Emaye Kalınlığı Ölçümü ... 75
4.1.4.2. Renk Ölçümü ... 76
4.1.4.3. Parlaklık Ölçümü ... 76
4.1.4.4. Sitrik Asit Dayanım Testi ... 77
4.1.4.5. Balık Pulu Kontrolü ... 78
4.1.4.6. Darbe ve Yapışma Testi ... 80
5. BULGULAR VE SONUÇLAR ... 84
5.1. Kimyasal Analiz ... 84
5.2. Çekme Testi ... 85
5.3. Sertlik Ölçümü ... 86
5.4. Pürüzlülük Ölçümü ... 87
5.5. Mikroyapı Analizi ... 88

5.6. Emaye Kalınlığı Ölçümü 93
5.7. Renk Ölçümü 93
5.8. Parlaklık Ölçümü 95
5.9. Sitrik Asit Dayanım Testi 97
5.10. Balık Pulu Kontrolü 99
5.11. Darbe ve Yapışma Testi 101
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 105
KAYNAKLAR 106
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 110
ÖZGEÇMİŞ 111

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Zirkonyum silikat katkılı emaye numunesi (SPE Z) yüzeyinin taber aşındırma testi sonrası ESEM görüntüsü 30
Şekil 3.2. Titan beyazı örtü kaplaması emayelerinin eluat kimyasal kompozisyonları (Sitrik asit, 100 °C, 2,5 saat) 31
Şekil 3.3. Yüzey enerjisi – işlem (ısıtılmış ve kaplanmış numuneler) 32
Şekil 3.4. Numunenin yüzeyinde görülen portakal kabuğu hatasının görüntüsü 33
Şekil 3.5. %10 beyaz emaye %90 siyah emayenin arayüzde çizgisel analiz sonucu 34
Şekil 3.6. Erdemir 7514 kalite ıf çeliğinin karbon dağılımı 35
Şekil.3.7. Farklı emaye kaplama türlerinin elektrokimyasal korozyon parametreleri 37
Şekil 3.8. Emaye kaplamaların dielektrik özelliklerinin karşılaştırılması 37
Şekil 3.9. Emaye–çelik arayüz morfolojisi 38
Şekil 3.10. Erimiş Zn–0.2Al alaşımında 460 °C'de aşınma sonrası emaye kaplamanın yüzey morfolojisi (A, C) ve kesitsel mikroyapısı (B, D): (A, B) 6000 döngü ve (C, D) 30.000 döngü 39
Şekil 4.1. Saymak VRGM 2060X4 model giyotin makası 43
Şekil 4.2. Giyotin makasta 10cm×10cm boyutlarında kesilen sac numuneleri 43
Şekil 4.3. Alkali yağ alma kimyasalı ile sac yüzeyinin temizlenmesi 44
Şekil 4.4. Specrolab M12 hybrid marka OES (Optik emüsyon spektroskopi) cihazı 48
Şekil 4.5. Zımparalama İşlemi ve zımpara sonrası sac yüzeyi görüntüsü 48
Şekil 4.6. OES ile kimyasal analiz 49
Şekil 4.7. Kimyasal analiz sonrası numunenin görüntüsü 49
Şekil 5.1. Çelik kalitesi ve sac kalınlığına göre çekme testi sonuçları 86
Şekil 5.2. Sac kalınlığı ve çelik kalitesine göre sertlik ölçüm sonucu (HRB 15T-S) 87
Şekil 5.3. Sac kalınlığı ve çelik kalitesine göre pürüzsüzlük ölçüm sonuçları 88
Şekil 5.4. Sac kalınlığı ve çelik kalitesine göre tane boyutu (ASTM, G) 89
Şekil 5.5. DC04EK ve DC04ED kalite sacların mikroyapı görüntüleri 89
Şekil 5.6. DC04EK ve DC04ED kalite sacların tane boyutu görüntüleri 90
Şekil 5.7. 0,50mm DC04ED ve DC04EK tek ve çift kat daldırma ve püskürtme yöntemiyle kaplanmış emaye kaplama kalınlıkları 91
Şekil 5.8. 0,70mm DC04ED ve DC04EK tek ve çift kat daldırma ve püskürtme yöntemiyle kaplanmış emaye kalınlıkları 91
Şekil 5.9. Emaye kaplama kalınlığı ölçüm sonuçları (µm) 93
Şekil 5.10. Emaye kaplanmış sacların renk ölçüm sonuçları (SCI) 93
Şekil 5.11. Emaye kaplanmış sacların parlaklık ölçüm sonuçları (60^0) 95
Şekil 5.12. 0,50mm DC04ED ve DC04EK kalite saclarda sitrik asit dayanım test sonucu görseli 97
Şekil 5.13. 0,70mm DC04ED ve DC04EK kalite saclarda sitrik asit dayanım test sonucu görseli 97

Şekil 5.14. 1ay süre ile bekletilen emaye kaplanmış sacların yüzey görüntüsü (1)..... 99
Şekil 5.15. 1ay süre ile bekletilen emaye kaplanmış sacların yüzey görüntüsü (2)..... 99
Şekil 5.16. 0,50mm DC04EK ve DC04ED yapışma test görselleri..... 101
Şekil 5.17. 0,70mm DC04EK ve DC04ED yapışma test görselleri..... 101
Şekil 5.18. Emaye kaplanmış sacların yapışma testi sonuçları..... 103

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 4.1. DIN EN 10209 standardına göre emaye çeliklerinin özellikleri 46
Tablo 4.2. Emaye tozunun fiziksel ve kimyasal özellikleri 67
Tablo 4.3. TS EN 10209 kalınlık aralığına göre düşme yüksekliği tablosu 80
Tablo 5.1. 0,50mm ve 0,70mm DC04EK ve DC04ED kalite sacların kimyasal analiz sonuçları..... 84
Tablo 5.3. TS EN 10209 standardının mekanik ve kimyasal özellikler için gereklilikleri..... 85
Tablo 5.4. 0,50mm ve 0,70mm DC04EK ve DC04ED kalite sacların çekme test sonuçları 86
Tablo 5.5. 0,50mm ve 0,70mm DC04EK ve DC04ED kalite sacların sertlik ölçümleri..... 87
Tablo 5.6. EN 10209 standardında yüzey pürüzsüzlük değer aralığı 87
Tablo 5.7. 0,50mm ve 0,70mm kalınlıktaki DC04EK ve DC04ED kalite sacların pürüzlülük ölçüm sonuçları..... 88
Tablo 5.8. Tane boyutu ölçüm sonucu..... 88
Tablo 5.9. Tekdüze, rastgele yönlendirilmiş, eş eksenli tanecikler için hesaplanan tane boyutu ilişkileri 90
Tablo 5.10. Emaye kaplama kalınlığı ölçüm sonuçları 92
Tablo 5.11. Emaye kaplanmış sacların renk ölçüm sonuçları 94
Tablo 5.12. Emaye kaplanmış sacların parlaklık ölçüm sonuçları..... 96
Tablo 5.13. Emaye kaplı sacta sitrik asit dayanım testi sonuçları..... 98
Tablo 5.14. Emaye Kaplı Sacta Balık Pulu Kontrol Sonuçları 100
Tablo 5.15. Emaye kaplanmış sacların yapışma test sınıfları 102

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Ø	: Çap, (mm)
a_0	: İlk kalınlık, (mm)
A_{80}	: Uzama miktarı, (%)
b	: Kemik numunenin kulak genişliği, (mm)
b_0	: Test parçasının ilk genişliği, (mm)
Bayer	: Tane Boyutu, (µm)
L	: Test parçasının toplam uzunluğu, (mm)
L_0	: Test parçasının ilk uzunluğu, (mm)
r20	: Radüs çapı, (mm)
R_a	: Pürüzlülük ölçüm değeri, (µm)
Re	: Akma mukavemeti, (MPa)
ReH	: Üst akma noktası, (MPa)
ReL	: Alt akma noktası, (MPa)
RH	: Nem miktarı, (%)
Rm	: Çekme mukavemeti, (MPa)
Rp 0,2	: % 0,2 Uzama mukavemeti, (MPa)

Kısaltmalar

ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Derneği)
CCD	: Charge Coupled Device (Şarj Bağlantılı Cihaz)
CIE	: International Commission on Lighting (Uluslararası Aydınlatma Komisyonu)
ED	: Direkt Emaye Kaplamaya Uygun Çelik
ED emaye	: Elektrikli Cihazlara Uygun Emaye Kaplama Türü
EK	: Konvansiyonel Emaye Kaplamaya Uygun Çelik
Mesh	: Elek Numarası
n_{90}	: Deformasyon Sertleşmesi
OES	: Optik Emüsyon Spektroskopisi
P_0	: Ön Yük
P_1	: Ana Yük
r_{90}	: Plastik Gerinme Miktarı
RSD	: Rockwell Sertlik Deneyi
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TS	: Türk Standardı
TSE	: Türk Standardları Enstitüsü
XRD	: X-Ray Diffraction (X-Ray Difraksiyonu)

DC04EK VE DC04ED KALİTE SACLARDA EMAYE KAPLAMA İŞLEMLERİ, EMAYE KALİTE VE PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Emaye, inorganik yapıya sahip olup sac yüzeyine tek ya da çift kat uygulanan yüksek sıcaklıklarda pişirildiğinde camsı yapıya dönüşen bir kaplama malzemesidir. Emaye kaplamalar korozyona karşı dayanım, yüksek ısıl direnç, termal şoklara dayanım, renk bakımından kararlılık, dekoratif özellik göstermeleri sebebiyle tercih edilmekte ve sanayide yaygın olarak kullanılmaktadır.

Emaye kaplamanın sac yüzeyine yapışma mekanizması; kimyasal, mekanik ve difüzyon teorileriyle açıklanmaktadır. Kimyasal teori; emaye bünyesindeki kobalt oksit ve nikel oksit gibi metal oksitlerin taban malzemeden gelen demir tarafından indirgenmesi ile oluşan reaksiyonlara dayanmaktadır. Oluşan bu reaksiyonlar ile sac ile emaye arasında kimyasal bir bağ oluşmaktadır. Mekanik teori, artan yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak emayenin tutunmasının daha iyi olduğunu açıklamaktadır. Aynı zamanda demir ile kobalt oksit ve nikel oksit arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar ile demirin FeO'ya yükseltgenmesi sonucu viskozitesi daha düşük olan FeO emaye içerisine dentritik yapılar oluşturarak sacın emayeye temas ettiği alanı arttırarak mekanik tutunma sağladığı bilinmektedir. Difüzyon teorisine göre, pişirme sırasında emaye kaplama ve çelik yüzey arasında karşılıklı atom/molekül geçişi gerçekleşir. Bu süreçte, yüksek sıcaklıkta camsı hale gelen frit ile çelik yüzey arasında elementsel geçiş bölgeleri oluşur.

Bu çalışmada emaye çeliği olarak doğrudan kullanılabilen DC04EK ve DC04ED kalite sacların farklı uygulama yöntemleri ve uygulama şekilleri ile performansının test edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla 0,50 mm ve 0,70 mm kalınlığında DC04EK ve DC04ED kalite sac kullanılmış, bu saclar üzerine daldırma ve püskürtme yöntemleri ile tek kat ve çift kat emaye uygulamaları yapılmıştır. Sacların karakteristik özelliklerini belirlemek için Çekme Testi, Kimyasal Analiz, Sertlik Ölçümü, Pürüzlülük Ölçümü, Mikroyapı analizleri yapılmıştır. Emaye uygulanan sacların performansı ve yüzey uygunluğu test etmek için Kalınlık Ölçümü, Parlaklık Ölçümü, Renk Ölçümü, Sitrik Asit Dayanım Testi, Darbe ve Yapışma Testi ve Balık Pulu Kontrolü yapılmıştır.

Emaye kaplanan sacların yapışma sınıfı ve derecesi darbe testi uygulanarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda; en iyi yapışma performansına sahip olan sac ve uygulamaların 0,50mm DC04EK kalite saca ait olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Balık Pulu, Difüzyon, Emaye, Frit, Termal Şok.

ENAMEL COATING PROCESSES ON DC04EK AND DC04ED QUALITY SHEETS, INVESTIGATION OF ENAMEL QUALITY AND PERFORMANCE

ABSTRACT

Enamel is an inorganic coating material that transforms into a glass-like structure when fired at high temperatures and applied in single or double layers to the surface of a sheet. Enamel coatings are preferred and widely used in industry for their corrosion resistance, high heat resistance, resistance to thermal shock, color stability, and decorative properties.

The mechanism by which enamel coating adheres to the sheet metal surface is explained by chemical, mechanical, and diffusion theories. The chemical theory is based on the reactions that occur when metal oxides, such as cobalt and nickel oxide, within the enamel are reduced by iron from the base material. These reactions form a chemical bond between the sheet metal and the enamel. The mechanical theory explains that enamel adhesion improves with increasing surface roughness. It is also known that the chemical reactions between iron and cobalt and nickel oxide, resulting in the oxidation of iron to FeO, cause the lower viscosity FeO to form dendritic structures within the enamel, increasing the area of contact between the sheet metal and the enamel, thus providing mechanical adhesion. According to diffusion theory, during firing, a mutual transfer of atoms/molecules occurs between the enamel coating and the steel surface. During this process, elemental transition zones form between the frit, which becomes glassy at high temperatures, and the steel surface.

This study aimed to test the performance of DC04EK and DC04ED grade sheets, which can be used directly as enamel steel, using various application methods and configurations. For this purpose, 0.50 mm and 0.70 mm thick DC04EK and DC04ED grade sheets were used, and single and double coats of enamel were applied to these sheets using dip and spray methods. Tensile tests, chemical analyses, hardness measurements, roughness measurements, and microstructural analyses were conducted to determine the characteristics of the sheets. Thickness measurements, gloss measurements, color measurements, citric acid resistance tests, impact and adhesion tests, and fish scale tests were conducted to test the performance and surface suitability of the enameled sheets.

The adhesion class and degree of enameled sheets were determined by impact testing. Experimental studies concluded that the sheets and applications with the best adhesion performance belonged to 0.50 mm DC04EK quality sheets.

Keywords: Fish Scale, Diffusion, Enamel, Frit, Thermal Shock.

1. GİRİŞ

Günümüzde endüstriyel üretim süreçlerinde seramik esaslı inorganik bir kaplama yöntemi olan emaye kaplama (vitreous enamel coating), hem işlevsel hem de estetik avantajlarıyla yaygın olarak kullanılan bir yüzey kaplama teknolojisidir. Emaye kaplamalar düşük karbonlu sac yüzeyine uygulandıklarında dekoratif görünüm sağlamakta, kolay temizlenebilir ve hijyenik bir yüzey oluşturmakta, sac yüzeyinin oksidasyon, aşınma ve kimyasal etkilere karşı korunmasını sağlamakta, ısıya dayanımı ve direnci artırmaktadır.

Emaye kaplama beyaz eşya, otomotiv, inşaat ve enerji sektörlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Gıda ile temas eden yüzeylerde hijyenik avantajlar sağlamakta ve estetik bir görünüm yaratmaktadır. Ancak emaye kaplamaların başarıyla uygulanabilmesi için uygun kalitede ve kimyasal kompozisyonda çelik seçimi, uygun bir yüzey hazırlama ve temizleme işlemi, emaye harcının uygun bileşimlerde ve oranlarda hazırlanması, emaye performansını test etmek için uygulanacak kalite kontrol testlerinin sonuçlarının başarılı olması gerekmektedir. Sac yüzeyinin emaye ile kaplanmasında yüzey bütünlüğü ve sacın mikroyapısal uygunluğu da emaye kalite kontrol testleri açısından önem arz etmektedir.

DC04EK ve DC04ED kalite çelikler emaye kaplama işlemlerinde doğrudan kullanılabilecek çelik kaliteleri olup, düşük karbon içerikli olmaları, homojen mikroyapıya ve yüzey bütünlüğüne sahip olmaları nedeniyle tercih edilmektedir. Her iki kalite sacın emaye kaplamaya uygunluğunu test etmek için kullanılan sacın pürüzlüğü, mikroyapı uygunluğu, mekanik ve kimyasal özelliklerinin detaylı incelenmesi, tek kat ve çift kat emaye uygulamaları sonrasında emayenin performansının uygulanan kalite kontrol yöntemleri ile test edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, DC04EK ve DC04ED kalite düşük karbonlu çelikler üzerine uygulanan emaye kaplamaların kalite ve performans özelliklerini kapsamlı şekilde incelemektir. Bu doğrultuda, öncelikle emaye kaplama sürecinde kullanılan astar kat ve üst kat emayelerin yapısı, uygulama koşulları ve pişirme parametreleri açıklanmış; ardından emaye kaplı numuneler üzerinde gerçekleştirilen mikroyapı analizi, yüzey pürüzlülüğü, aderans testleri, yüzey hataları ve diğer kalite kontrol yöntemleriyle elde

edilen bulgular değerlendirilmiştir. Ayrıca, üretim sürecinde sıkça karşılaşılan balık pulu, gözenek, çil, çatlak gibi yüzey hatalarının nedenleri ve bu hataların önlenmesine yönelik öneriler de çalışmada ele alınmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Emayenin Tanımı ve Tarihçesi

Emaye, cam esaslı inorganik bir kaplama malzemesi olup metal yüzeyler üzerine uygulanarak estetik, kimyasal dirençli ve uzun ömürlü bir yüzey oluşturulmasını sağlar (Majumdar ve diğ., 2021). Teknik anlamda emaye, genellikle boraks, kuvars, feldspat, soda, flüorit gibi hammaddelerin yüksek sıcaklıklarda eritilerek frit hâline getirilmesi ve sonrasında öğütülerek toz veya süspansiyon olarak metal yüzeylere uygulanmasıyla elde edilen camsı bir kaplamadır (Çavuşoğlu, 2011; Karasu, Saçkan ve Taplı, 2020). Emaye, 500-900°C arasındaki sıcaklıklarda çeşitli metal ve alaşımlara uygulanan camsı inorganik bir kaplama malzemesidir (Türkel ve diğ., 2024). Pürüzsüzlük, çizilme ve aşınma direnci, kolay temizleme ve kimyasal direnç gibi özellikler sunarak kararlı ve dayanıklı bir bağ sağlar (Karasu ve diğ.,2019). Emaye kaplama hem fonksiyonel hem de dekoratif amaçlarla kullanılmakta olup özellikle korozyon direnci, ısıya dayanıklılık, elektriksel yalıtım ve hijyenik yüzey özellikleri gibi avantajlar sunar (Gouda, El-Sayed ve Ahmed, 2014). Tarihsel olarak dekoratif amaçlarla kullanılan emaye, mutfak eşyaları, gıda endüstrisi, madencilik, makine ve bina cepheleri dahil olmak üzere yaygın endüstriyel uygulamalara sahip olacak şekilde gelişmiştir (Karasu ve diğ.,2019).

Emayenin tarihi, yaklaşık 3500 yıl öncesine, Antik Mısır'a kadar uzanmaktadır. Bu dönemde emaye, altın ve bakır zemin üzerine renkli süslemeler olarak kullanılmış, daha sonra Yunan, Roma ve Bizans uygarlıklarında mücevher ve dekoratif objelerde yaygın biçimde tercih edilmiştir (Türkel, Çalışkan Güneş ve Babayiğit, 2024). Orta Çağ Avrupa'sında ise Cloisonné, Champlevé gibi tekniklerle sanatsal emaye kullanımı zirveye ulaşmıştır. Sanayi Devrimi ile, emaye teknolojisi fonksiyonel özellikleri nedeniyle sanayiye uyarlanmış; 19. yüzyılın sonlarından itibaren mutfak eşyaları, soba parçaları, tabela üretimi gibi alanlarda teknik emaye kaplama yöntemleri gelişmiştir (Maskall ve White,1986).

20.yüzyılın ortalarından itibaren emaye, özellikle metal yüzeylerin kaplanmasında yaygın bir teknik hâline gelmiş; çelik, dökme demir ve alüminyum gibi taban malzemeleri üzerine uygulanarak hem dayanıklılığı artırmış hem de estetik bir görünüm sağlamıştır. Modern emaye kaplamalar, yüksek sıcaklığa dayanıklılıkları nedeniyle fırın iç yüzeyleri,

ısıtıcılar, su ısıtıcı tankları, beyaz eşya gövdeleri gibi alanlarda kullanılmaktadır (Rossi, Russo ve Calovi, 2021).

Teknik emaye uygulamaları sanatsal uygulamalardan farklı olarak belirli kalitelere göre gerçekleştirilir. Sanayide kullanılan emaye türleri genellikle asit dirençli emaye, pişirme emayesi, ısıya dayanıklı emaye ve korozyon koruyucu emaye gibi sınıflara ayrılır (Koç, Gündüz ve Şahintürk, 2020).

Son yıllarda nanoteknoloji ve fonksiyonel katkı maddeleri sayesinde antibakteriyel, fotokatalitik ve kendini temizleyen emaye kaplamalar üzerine de önemli araştırmalar yapılmaktadır (Karagöz, 2009; Gençer, 2006). Bu durum, emaye teknolojisinin yalnızca geleneksel kullanım alanlarıyla sınırlı kalmayıp modern malzeme bilimi içinde de gelişmekte olduğunu göstermektedir.

2.2. Emaye Hammaddeleri

Emaye kaplamalar, yüksek sıcaklıkta metal yüzeylere uygulanan camsı yapılı inorganik kaplama malzemeleridir. Bu kaplamaların temelini oluşturan frit, çeşitli oksit esaslı hammaddelerin ergitilerek camsı bir yapı oluşturacak biçimde karıştırılmasıyla elde edilir. Frit üretimi, genellikle 1100–1250 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmekte, ergitilen karışım şokla soğutulmakta ve ardından öğütülerek kullanılabilir hâle getirilmektedir. Emaye uygulamalarında kullanılan frit bileşimleri, istenen kaplama performansına, uygulanacak yönteme ve alt tabaka özelliklerine göre formüle edilmektedir (Koç, Gündüz ve Şahintürk, 2020).

Emaye hammaddeleri genel olarak cam oluşturucular, akışkanlık ve genleşme düzenleyiciler, opaklaştırıcılar, renklendiriciler, yapışmayı artırıcı bileşenler ve organik katkılar olmak üzere gruplandırılabilir.

Cam yapısının temel taşı olan silisyum dioksit (SiO_2), frit bileşiminin en önemli bileşenidir. Yüksek mekanik dayanım, ısıl stabilite ve kimyasal direnç kazandırmakta; ayrıca camsı matrisin sertliğini ve saydamlığını belirlemektedir. Ancak SiO_2'nin yüksek ergime sıcaklığı (yaklaşık 1700 °C) nedeniyle, tek başına kullanımına pratikte rastlanmaz. Bu nedenle ergime sıcaklığını düşürmek ve camsı fazın viskozitesini kontrol altına almak için borik oksit (B_2O_3) ve alkali oksitler (Na_2O, K_2O) frit bileşimine eklenmektedir.

Özellikle B_2O_3, camın erime davranışını düzenlerken termal şoklara karşı da dayanıklılığı artırmaktadır. Na_2O ve K_2O gibi alkali metaller ise fritin akıcılığını artırarak ince film hâlinde yayılmasını kolaylaştırır (Rossi, Russo ve Calovi, 2021).

Emayenin pişirme sırasında çelikle uyumlu genleşme göstermesi gerekir. Bu nedenle fritin genleşme katsayısı da dikkatle kontrol edilmelidir. Bu dengeyi sağlamak amacıyla kalsiyum oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO) ve zaman zaman lityum oksit (Li_2O) gibi toprak alkali ve alkali metal oksitler kullanılmaktadır. CaO, camsı fazın kimyasal dayanıklılığını artırırken, MgO fritin camsı yapısını stabilize eder. Li_2O ise fritin termal genleşmesini düşürerek çelikle olan uyumu optimize eder ve böylece çatlama riskini azaltır (Gouda, El-Sayed ve Ahmed, 2014).

Görsel özelliklerin kontrolü ve yüzeyin ışık geçirgenliğinin azaltılması için opaklaştırıcı bileşenler kullanılır. Özellikle titanyum dioksit (TiO_2) ve zirkonyum dioksit (ZrO_2), emayeye beyazlık, opaklık ve yansıtıcılık kazandırır. Bu bileşenler ayrıca emayenin çizilme ve aşınma direncini de artırmaktadır. Mat görünüm istenilen ürünlerde bu opaklaştırıcıların oranı arttırılmakta ya da yüzey pürüzlendirilerek matlaştırılmaktadır. Farklı optik etkiler için kalay oksit (SnO_2) ve bazen florür bileşikleri de katkı maddesi olarak tercih edilmektedir.

Renkli emaye uygulamalarında renklendirici pigmentler, metal oksit formunda doğrudan frite eklenir. Örneğin kobalt oksit (CoO) mavi tonlar, krom oksit (Cr_2O_3) yeşil, demir oksit (Fe_2O_3) kırmızı ve kahverengi tonlar verir. Bakır oksit (CuO) yeşil-mavi renk geçişlerinde, nikel oksit (NiO) ise siyah ve gri renk üretiminde tercih edilir. Bu pigmentlerin miktarı, fritin kimyasal yapısıyla uyumlu olacak şekilde formüle edilmelidir. Aksi hâlde renk sabitliği sağlanamaz ve yüksek sıcaklıkta bozunmalar görülebilir.

Emaye ile metal yüzey arasında güçlü bir bağ kurulması için yapışmayı artırıcı bileşenler gereklidir. Bu amaçla, frite genellikle kobalt oksit (CoO), nikel oksit (NiO), mangan oksit (MnO_2) gibi geçiş metali oksitleri eklenir. Bu oksitler, pişirme sırasında emaye–çelik arayüzünde ara fazlar oluşturarak difüzyon geçişini destekler ve kimyasal bağlanmayı güçlendirir. Özellikle demir esaslı alt tabakalarda Fe–Si, Fe–Al ve Fe–Mn tipi ara fazların oluşumu yapışma kalitesini doğrudan etkiler (Zhao ve diğ., 2021).

Son olarak, özellikle yaş uygulamalarda kullanılan emaye süspansiyonlarının stabilitesini artırmak için çeşitli organik katkı maddeleri kullanılır. Bunlar arasında bentonit gibi kil türleri, dekstrin, selüloz eterleri, karboksimetil selüloz (CMC) gibi kıvam artırıcılar ve elektrolitler (örneğin sodyum heksametafosfat) yer alır. Bu maddeler, süspansiyonun kararlılığını artırarak püskürtme kalitesini iyileştirir, tabaka kalınlığının homojen dağılmasını sağlar ve kurumayı kontrol eder. Emaye hammaddeleri, yalnızca kaplamanın camsı yapısını oluşturmakla kalmaz; aynı zamanda fiziksel dayanıklılık, kimyasal direnç, renk, yapışma ve estetik gibi pek çok kritik özelliği belirler. Bu nedenle kullanılan her bileşen, uygulama yöntemi ve kullanım alanına uygun olacak şekilde dikkatle seçilmelidir (Ezgi Yılmaz, 2014).

2.3. Emaye Türleri

Emaye kaplamalar, genellikle çok katmanlı sistemler hâlinde uygulanmakta olup; her bir katman, belirli bir işlevi yerine getirmek üzere formüle edilmektedir. Bu katmanlar genel olarak astar kat (primer) ve üst kat (kaplama) olarak ikiye ayrılmaktadır. Astar kat, çelik yüzeye tutunmayı artıran ve arayüz bağlanmasını güçlendiren işlevsel bir tabaka oluştururken; üst kat ise renk, parlaklık, kimyasal direnç ve görsel kaliteyi sağlayan nihai yüzey filmidir (Koç, Gündüz ve Şahintürk, 2020). Her iki katman da farklı kimyasal bileşimlere, pişirme koşullarına ve uygulama yöntemlerine sahiptir.

2.3.1. Astar Kat Emayeler

Astar kat emayeler (ground coat), doğrudan çelik yüzey üzerine uygulanan ve emaye sisteminin temel yapısını oluşturan ilk katmandır. Bu emayeler, çelik yüzeyle güçlü kimyasal bağ ve difüzyon geçişi sağlamak amacıyla özel olarak geliştirilmiştir. Genellikle Fe_2O_3, CoO, NiO, MnO gibi oksit bileşikleri içeren ve camsı fazın yanı sıra metal oksitlerle sinterlenebilen yapıya sahip astar fritleri kullanılır (Gouda, El-Sayed ve Ahmed, 2014).

Astar kat emayelerin başlıca işlevleri şunlardır:

- Emayenin çelik yüzeye yapışmasını artırmak,
- Yüzeydeki mikro çatlak ve gözenekleri doldurarak düzgün bir temel oluşturmak,
- Üst kat emayenin renk ve doku performansını artırmak,

- Korozyon direncini desteklemek.

Bu katman çoğunlukla daldırma ya da yaş sprey yöntemiyle uygulanmakta ve 800–850 °C sıcaklıkta pişirilmektedir. Astar emaye uygulanmadan yapılan doğrudan kaplamalarda, yapışma zayıflığı ve yüzey hataları daha sık görülmektedir. Bu nedenle çift kat uygulamalarda astar kat, sistemin en kritik parçasıdır.

2.3.2. Üst Kat Emayeler

Üst kat emayeler (cover coat), astar katın üzerine uygulanan ve son kullanıcıya sunulan görsel ve fonksiyonel kaplama yüzeyini oluşturan katmandır. Bu katman, estetik görünümün yanı sıra ürünün kimyasal dayanımı, temizlik kolaylığı, termal direnç ve ışık yansıtıcılığı gibi özelliklerini belirler (Rossi ve Scrinzi, 2013).

Üst kat fritleri genellikle borosilikat esaslı olup; renklendirici pigmentler (TiO_2, ZrO_2, CuO vb.), akışkanlık düzenleyiciler ve camsı yapıyı geliştiren katkılar içerir. Parlaklık, matlık, opaklık, doku gibi yüzey karakteristikleri bu katmanda belirlenir. Ayrıca üst katın yüzey enerjisi, çizilme direnci ve kimyasal reaksiyonlara dayanımı gibi teknik özellikleri, frit kompozisyonuna ve pişirme koşullarına bağlıdır. Uygulama yöntemleri arasında yaş sprey, elektrostatik toz kaplama ve akıtma yöntemi bulunur. Pişirme sıcaklığı genellikle 790–820 °C arasında değişir. Üst kat, hem astar ile kimyasal uyum göstermeli hem de yüzeyde çatlama, kabarcık, parlaklık farkı gibi kusurları oluşturmamalıdır.

Literatürde, üst kat emayelerin optik özelliklerinin geliştirilmesine yönelik olarak nano katkı maddeleri, antibakteriyel ajanlar ve UV dayanımlı pigmentler gibi ileri fonksiyonel bileşenlerin kullanımı da önerilmektedir (Deng ve diğ., 2023).

2.4. Emaye Kaplama Teknolojisinin Gelişimi

Emaye kaplama teknolojisinin gelişimi, tarihsel süreçte sanat ve zanaat alanlarındaki dekoratif amaçlardan sanayiye yönelik fonksiyonel uygulamalara doğru evrilmiştir. İlk çağlardan itibaren süs eşyası, takı ve dini objelerde kullanılan emaye, 19. yüzyılın sonlarına doğru sanayi üretiminin yaygınlaşmasıyla birlikte teknik anlamda büyük bir dönüşüm geçirmiştir (Karasu, Saçkan ve Taplı, 2020). Bu dönüşümde özellikle çelik ve

dökme demir gibi malzemelerin dayanıklılık, ısıya direnç ve hijyenik yüzey gereksinimleri karşısında emayenin sağladığı avantajlar belirleyici olmuştur.

Sanayi Devrimi sonrasında Avrupa ve Amerika'da teknik emaye üretimi özellikle emaye frit teknolojisinin geliştirilmesiyle birlikte yaygınlaşmış; mutfak eşyaları, soba ve ısıtıcı parçaları, endüstriyel tanklar gibi ürünlerde kullanımı hızla artmıştır. 20. yüzyılın başında kuru ve yaş püskürtme tekniklerinin geliştirilmesi, kaplama proseslerinde süreklilik ve kalite kontrolü sağlamıştır (Koç, Gündüz ve Şahintürk, 2020). 1920'li yıllarda kuru toz kaplama yöntemi (dry electrostatic) ile elektrostatik yükleme yoluyla emaye parçacıkları metal yüzeylere uygulanabilir hâle gelmiştir.

Teknik gelişmelerin önemli bir aşaması da emaye çeliği üretiminde yaşanmıştır. Geleneksel yapıdaki karbonlu çeliklerin emaye ile uyumsuzluğu, 1970'li yıllardan itibaren düşük karbonlu, IF (interstitial free) çeliklerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu yeni nesil çelikler, özellikle hidrojenin neden olduğu "balık pulu" gibi emaye kusurlarının azaltılmasında önemli rol oynamıştır (Koç ve diğ., 2020). TS EN 10209 standardının kabulüyle birlikte, çelik üreticileri emaye kaplamaya uygun sacları düşük yüzey gerilimi ve yüksek yapışma kapasitesiyle geliştirmiştir.

Günümüzde emaye kaplama teknolojisi; sadece yüzeyin korunması değil, aynı zamanda fonksiyonel yüzeyler elde edilmesi amacıyla da geliştirilmektedir. Son yıllarda yapılan araştırmalarda, emaye kaplamalara antibakteriyel özellik kazandırılması (Gençer, 2006), fotokatalitik aktivite eklenmesi (Karagöz, 2009) ve tribolojik performansın artırılması gibi inovatif hedeflere odaklanılmıştır. Ayrıca, plazma sprey kaplama, elektroforetik emaye uygulamaları gibi ileri teknolojiye dayalı yöntemlerle daha ince, düzgün ve kontrollü katmanlar oluşturulabilmektedir (Deng ve diğ., 2023; Rossi ve Scrinzi, 2013).

Yeni nesil emaye teknolojilerinde enerji verimliliği, pişirme süresi ve sıcaklığı gibi parametrelerin optimizasyonu ile hem çevresel hem de ekonomik fayda sağlanması hedeflenmektedir. Özellikle düşük sıcaklıkta pişirilebilen frit sistemlerinin geliştirilmesi, karbon ayak izinin azaltılması açısından önemli görülmektedir. Ayrıca, modern otomasyon sistemleri sayesinde emaye kaplama prosesleri daha tutarlı ve hatasız gerçekleştirilebilmektedir. Sonuç olarak emaye kaplama teknolojisi, klasik cam kaplama sistemlerinden evrilerek bugün hem ağır sanayi hem de tüketici ürünleri sektörlerinde

yüksek performans beklentilerini karşılayan, çevreci ve dayanıklı bir yüzey kaplama çözümüne dönüşmüştür. (Müller ve diğ.,2023; Türkel ve diğ., 2024).

2.5. Emaye Kaplamada Kullanılan Sac Kaliteleri

Emaye kaplamanın başarıyla uygulanabilmesi için, yalnızca emaye frit kompozisyonunun değil, aynı zamanda kullanılan taban metalin (sac malzemenin) kalitesinin de uygun özelliklere sahip olması gerekir. Emaye çeliklerinin özellikleri, kaplama kalitesini doğrudan etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Özellikle düşük karbonlu, iyi şekillenebilirliğe sahip, temiz ve kontrollü yüzey pürüzlülüğü sunan çelik kaliteleri emaye uygulamaları için tercih edilmektedir (Koç, Gündüz ve Şahintürk, 2020).

Emayelenebilirlik açısından sac çeliğin yapısal özellikleri arasında:

- Düşük karbon içeriği (≤ %0.06 C)
- Düşük yüzey kirleticiliği (örneğin kalıntı yağ, oksit tabakası),
- Yüksek form verimi,
- İyi yüzey homojenliği,
- Yüzeye nüfuz eden hidrojenin düşük seviyede tutulması yer almaktadır.

Bu kapsamda geliştirilen DC04EK ve DC04ED gibi sac çelik kaliteleri, sanayi tipi emaye uygulamaları için özel olarak tasarlanmıştır ve TS EN 10209 standardı altında sınıflandırılır.

2.5.1. DC04EK Kalitesi

DC04EK, düşük karbon içeriğine sahip, soğuk haddelenmiş ve açık tavlanmış bir çelik kalitesidir. “EK” ibaresi, “emaye kaplamaya uygun” (email kaplama – kalaylı sac standardı) anlamına gelir. Bu kalite, esas olarak çift kat emaye uygulamaları (primer + kaplama) için kullanılır ve yüzey hazırlığı işlemlerine karşı yüksek tolerans gösterir.

DC04EK çeliklerinin temel özellikleri şunlardır:

- Düşük karbon oranı (%0,04–0,06),
- Maximum %0,50 Mangan, %0,030 Fosfor, %0,050 Kükürt içeriği
- Homojen yüzey yapısı,

- Yüksek soğuk şekillendirme kabiliyeti,
- Emaye altında balık pulu kusuruna karşı direnç.

Koç ve arkadaşlarının (2020) raporunda belirtildiği üzere, bu kalite genellikle emaye alt tabaka olarak hafif pürüzlü ve fosfat kaplı yüzey formunda üretilir. DC04EK'nin özellikle mutfak eşyaları, termosifon gövdeleri, fırın iç yüzeyleri ve beyaz eşya kaplamalarında tercih edildiği belirtilmektedir.

Bu kalite emayenin yapışmasını iyileştirecek şekilde formüle edilmiş olup, hidrojen tutucu element ilavesi (örneğin Ti, Nb) sayesinde pişirme sırasında oluşabilecek balık pulu kusurlarının önüne geçilir (Koç ve diğ., 2020).

2.5.2. DC04ED Kalitesi

DC04ED ise "ED" takısıyla anılan ve doğrudan (primer kullanılmadan) emaye kaplamaya uygun şekilde tasarlanmış daha yüksek nitelikli bir çelik kalitesidir. Bu kalite, çift katlı tek pişirim uygulamaları için optimize edilmiştir ve direkt emaye uygulamalarında ön işlem ihtiyacını azaltmasıyla öne çıkar.

DC04ED çeliğin teknik özellikleri:

- Ultra düşük karbon oranı (≤ %0,03),
- Maximum %0,40 Mangan, %0,030 Fosfor, %0,050 Kükürt içeriği
- Yüzeyde minimum inklüzyon (kalıntı) ve homojenlik,
- Balık pulu oluşumunu engelleyen yüksek hidrojen absorpsiyon kapasitesi,
- TS EN 10209 standardına tam uyum.

Bu kalite genellikle tek kat pişirme yöntemi ile üretim yapan işletmelerde tercih edilmektedir. Özellikle fırın iç hazneleri, ısıtıcı iç tankları, su kazanları gibi yüksek sıcaklıkta çalışacak yapıların üretiminde kullanılır (Koç ve diğ., 2020).

2.6. Emaye–Çelik Arayüz Teorileri

Emaye kaplamanın çelik yüzeyle olan bağ yapısı, kaplamanın kalitesi, uzun ömürlülüğü ve dayanımı açısından belirleyici unsurdur. Kaplama ile alt tabaka arasındaki tutunma mekanizması, genellikle üç temel teori ile açıklanır: kimyasal bağlanma, mekanik

bağlanma ve difüzyon bağlanması (Rossi ve Scrinzi, 2013; Gouda ve diğ., 2014). Gerçekte bu üç mekanizma çoğu zaman birlikte işler; ancak malzeme tipi, uygulama yöntemi ve pişirme parametreleri gibi faktörlere bağlı olarak biri baskın hâle gelebilir. Aşağıda her bir teori detaylı biçimde incelenmektedir.

2.6.1. Kimyasal Bağ Teorisi

Kimyasal bağlanma teorisine göre, emaye friti ile çelik alt tabaka arasındaki bağ, yüksek sıcaklıkta gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşur. Bu reaksiyonlar sırasında frit bileşiminde yer alan alkali ve toprak alkali oksitler (örneğin Na_2O, CaO, B_2O_3, SiO_2) ile çelik yüzeyindeki Fe, Ni, Cr gibi metal elementleri arasında karmaşık oksitler meydana gelir. Bu bileşikler, kaplamanın çelik yüzeye kimyasal olarak bağlanmasını sağlar (Gouda ve diğ., 2014).

Pişirme sıcaklığı arttıkça bu kimyasal reaksiyonlar daha aktif hâle gelir. Emaye–metal sınırında oluşan Fe_2SiO_4 (fayalit) ve $FeAl_2O_4$ (hercinit) gibi bileşikler, arayüz bölgesinde kimyasal köprüleme görevini üstlenir. Bu yapılar aynı zamanda, emayenin korozyona karşı dayanımını artırmakta ve arayüzde gerilme oluşumunu azaltmaktadır (Medvedovski ve Leal Mendoza, 2023).

Kimyasal bağlanma özellikle aşağıdaki durumlarda belirgin hâle gelir:

- Pişirme sıcaklığı 800 °C'nin üzerindeyse,
- Frit bileşimi yüksek silikat içeriyorsa,
- Çelik yüzey reaktiftir (örneğin Ti veya Nb içeren IF çelikler).

Ayrıca, bazı çalışmalar kimyasal bağların sadece yüzeyde değil, camsı matris içerisinde belirli derinliğe kadar yayılan kompleks fazlar aracılığıyla gerçekleştiğini göstermektedir (Rossi, Russo ve Calovi, 2021).

2.6.2. Mekanik Bağ Teorisi

Mekanik bağ teorisi, emaye kaplamanın çelik yüzeye fiziksel olarak tutunması, yani yüzey pürüzlülüğüne “kilitlenmesi” esasına dayanır. Pişirme sırasında düşük viskoziteli hâle gelen emaye friti, çelik yüzeyindeki mikroskobik girinti ve çıkıntılara nüfuz eder ve burada katılaşarak fiziksel bir bağlantı oluşturur (Koç ve diğ., 2020).

Mekanik bağlanma teorisinin geçerliliği, yüzey hazırlık teknikleriyle doğrudan ilişkilidir. Özellikle:

- Kumlama,
- Asitle dağlama,
- Fosfatlama,
- İnce pürüzlendirici taşlama

gibi ön işlemler yüzey alanını artırarak, camsı fazın tutunabileceği hacimleri ve yüzey enerjisini artırır. Böylece fiziksel bağlanma için daha fazla nokta oluşur (Medvedovski ve Leal Mendoza, 2023).

Bu tür bağlanma, daldırma yöntemi, yaş sprey uygulaması ve flow coating gibi fritin sıvı hâlde uygulandığı tekniklerde oldukça etkilidir. Ancak tek başına yeterli değildir. Mekanik bağlar, termal gerilmelere karşı daha zayıf olduğundan, kimyasal ve difüzyon bağlarıyla desteklenmediğinde soyulma veya balık pulu hatalarına neden olabilir (Rossi ve Scrinzi, 2013).

Mekanik bağlanma ayrıca, kaplamanın soyulma dayanımı ve darbe direnci gibi performans parametrelerinde önemli rol oynar. Bu yönüyle özellikle yapışma testlerinde yüksek değerlere katkı sağlar.

2.6.3. Difüzyon Teorisi

Difüzyon teorisine göre, pişirme sırasında emaye kaplama ve çelik yüzey arasında karşılıklı atom/molekül geçişi gerçekleşir. Bu süreçte, yüksek sıcaklıkta camsı hale gelen frit ile çelik yüzey arasında elementsel geçiş bölgeleri (interdiffusion zones) oluşur. Bu bölgelerdeki atomlar, iki farklı fazın birbiri içine kısmen karışmasını sağlar (Deng ve diğ., 2023). Örneğin: Çelik yüzeyindeki Fe ve Mn gibi elementler camsı matris içerisine difüzlenirken, Fritte bulunan Na^{+}, K^{+}, Ca^{2+} gibi iyonlar çeliğin yüzeyine geçiş yapar. Bu geçiş, SEM–EDS analizleriyle gözlemlenebilir ve genellikle 1–5 mikrometre kalınlığında bir geçiş tabakası oluşturur. Bu tabaka, kimyasal bağların da temelini oluşturur ve arayüz dayanımını artırır (Medvedovski ve Leal Mendoza, 2023).

Difüzyon yoğunluğu:

- Pişirme sıcaklığı ve süresiyle,
- Metal yüzey bileşimiyle,
- Fritin oksit içeriğiyle ilişkilidir.

Yüzeyde oluşan geçiş fazları (örneğin fayalit, spinel, hematit) kaplamanın hem yapışma gücünü hem de kimyasal dayanıklılığını artırır. Ancak fazla difüzyon, bazı durumlarda gevrek arayüz oluşumuna neden olarak yapışma kalitesini de düşürebilir. Bu nedenle, optimum sıcaklık–zaman parametreleri belirlenmelidir (Rossi ve Scrinzi, 2013; Gouda ve diğ., 2014).

2.7. Emaye Kaplama Yöntemleri

Emaye kaplama teknolojisi, uygulama yüzeyinin biçimi, üretim miktarı, hedeflenen yüzey kalitesi ve proses maliyetleri gibi parametrelere bağlı olarak farklı yöntemlerle gerçekleştirilmektedir (Samiee, Sarpoolaky ve Mirhabibi, 2007). Bu yöntemler arasında en çok tercih edilenler; daldırma (dip coating), yaş sprey (wet spray), elektrostatik toz kaplama, elektroforez, akıtma (flow coating) ve plazma sprey uygulamalarıdır. Her bir yöntemin avantajları, sınırlılıkları ve uygulama alanları farklılık göstermektedir. Aşağıda en yaygın yöntemler açıklanmıştır.

2.7.1. Daldırma (Dip Coating) Yöntemi

Daldırma yöntemi, emaye kaplamanın en geleneksel ve yaygın kullanılan tekniklerinden biridir. Bu yöntemde metal yüzey, içerisinde su, frit, kil ve çeşitli katkı maddeleri bulunan viskoz bir emaye süspansiyonuna belirli bir süre daldırılmakta, ardından yüzeyden çıkarılarak süspansiyonun metal üzerinde ince ve homojen bir tabaka oluşturması sağlanmaktadır. Kurutma işlemi sonrasında parça fırınlanarak camsı bir yapı elde edilir (Faust, Andrews ve Pagliuca, 2012).

Bu yöntem özellikle düz, geniş ve basit geometrili parçalarda tercih edilmekte olup düşük ekipman maliyeti ve homojen film kalınlığı avantajları sunmaktadır. Ancak süspansiyonun sürekli karıştırılması ve viskozite kontrolü gerektirmesi, bu yöntemin sürekliliği açısından dikkat edilmesi gereken hususlardandır. Ayrıca, karmaşık yüzeylerde kaplama homojenliği sağlamak zor olabilir ve süspansiyonun parça üzerinde

birikmesi sonucunda kalınlık farkları oluşabilir. Buna rağmen kazan gövdeleri, termosifon iç yüzeyleri ve soba parçalarında halen yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.7.2. Yaş Sprey (Wet Spray) Yöntemi

Yaş sprey yöntemi, su bazlı emaye süspansiyonunun özel tabancalar yardımıyla çelik yüzeye püskürtülmesi esasına dayanan bir kaplama tekniğidir. Uygulama sonrası parça kurutulur ve yüksek sıcaklıkta pişirilerek frit camsı yapıya dönüştürülür. Bu yöntemde püskürtme işlemi basınçlı hava veya elektrostatik sistemlerle sağlanabilir ve püskürtme parametreleri (nozul çapı, uygulama mesafesi, açı ve basınç) kaplama kalitesi üzerinde belirleyici rol oynar (Rossi ve Scrinzi, 2013).

Yaş püskürtme yöntemi, özellikle geometrisi karmaşık veya detaylı olan parçaların kaplanmasında tercih edilmektedir. Düzgün ve ince kaplama sağlayabilmesi sayesinde görsel kalite gerektiren uygulamalarda yaygındır. Ayrıca düşük üretim hacimli ve özel tasarım ürünlerde (örneğin özel fırın iç yüzeyleri, küçük ev aletleri parçaları) oldukça avantajlıdır. Ancak uygulama sırasında operatör becerisine duyarlı olması, püskürtme sırasında oluşabilecek toz yayılması ve yüksek viskozitede nozul tıkanmaları gibi sınırlılıkları da mevcuttur (Paytuncu, 2011).

2.7.3. Elektrostatik Toz Kaplama Yöntemi

Elektrostatik toz kaplama yöntemi, emaye tozlarının elektrostatik yükle yüklenerek topraklanmış metal yüzeye püskürtülmesi esasına dayanmaktadır. Yüzeye yapışan toz partikülleri daha sonra fırınlanarak eritilir ve camsı bir kaplama tabakası hâline getirilir. Bu yöntem özellikle kuru sistemler arasında en kontrollü ve endüstriyel otomasyona en uygun teknik olarak öne çıkmaktadır (Koç ve diğ., 2020).

Elektrostatik yöntemle kaplama, minimum malzeme kaybı, geri kazanılabilir toz, homojen kalınlık dağılımı ve yüksek yüzey kalitesi gibi önemli avantajlara sahiptir. Uygulamada kullanılan tozların partikül boyutu, akışkanlık ve yüklenme kabiliyeti, yüzey kalitesi açısından belirleyicidir. Ayrıca metal yüzeyin temizliği, topraklama seviyesi ve ortam koşulları da kaplamanın kalıcılığı üzerinde doğrudan etkilidir. Bu yöntem, özellikle beyaz eşya, termosifon ve elektrikli ısıtıcı üretim hatlarında tercih edilmektedir. Ancak

ekipman maliyeti yüksektir ve detaylı geometrilerde gölge alanlar oluşabileceğinden dikkatli uygulanmalıdır.

2.7.4. Elektroforez Yöntemi

Elektroforez yöntemi, emaye kaplama teknolojisinde yüksek yüzey homojenliği, ince film kalınlığı ve kompleks geometrilere uygulanabilirlik gibi avantajlarıyla dikkat çeken modern bir uygulama tekniğidir. Bu yöntemde, su bazlı emaye süspansiyonu içeren bir elektrolit ortamında, kaplanacak metal yüzey elektroda bağlanır ve karşısına karşıt yüklü bir anot yerleştirilir. Sisteme doğru elektrik akımı uygulandığında, süspansiyon içerisindeki emaye partikülleri elektrik alan etkisiyle yönlendirilerek katot (veya anot) yüzeyine homojen bir şekilde çökelir (Rossi ve Scrinzi, 2013; Deng ve diğ., 2023).

Bu yöntem, özellikle düşük kalınlıklı ve ince tabakalı kaplama gerektiren hassas uygulamalar için ideal olup, klasik yaş püskürtme veya daldırma yöntemlerine kıyasla daha üstün yüzey düzgünlüğü sağlamaktadır. Elektroforetik çökelme işlemi sonrasında parça kurutulur ve geleneksel fırınlama işlemine tabi tutularak camsı emaye katmanına dönüştürülür.

Elektroforez yöntemiyle elde edilen kaplamalar, yüzeye çok iyi tutunmakta ve yüzeyde mikro düzeyde düzgünlük sağlayarak estetik görünümü artırmaktadır. Bu yönüyle özellikle yüksek kaliteli beyaz eşya iç parçaları, küçük mutfak ekipmanları ve ısıtıcı komponentleri gibi ürünlerde tercih edilmektedir. Aynı zamanda, üretim sırasında malzeme israfını en aza indirmesi ve süspansiyonun geri kazanılabilir olması açısından da sürdürülebilir bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Koç, Gündüz ve Şahintürk, 2020). Ancak bu yöntemin uygulanabilirliği bazı sınırlamalara da sahiptir. Özellikle elektroforetik emaye süspansiyonunun hazırlanması, partikül stabilitesi ve iletkenlik kontrolü açısından hassas süreç gerektirir. Ayrıca sistemin kurulumu için gerekli ekipman maliyeti, diğer geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksektir. Buna rağmen, modern otomasyon sistemlerine kolayca entegre edilebilmesi ve çevre dostu uygulama potansiyeli nedeniyle sanayi ölçeğinde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

Sonuç olarak elektroforez yöntemi, teknik emaye kaplamaların yüksek hassasiyetle uygulanması gereken alanlarda büyük avantajlar sunmakta; özellikle kalite kontrolü ve

ince film teknolojilerinde geleceğe dönük yenilikçi çözümler olarak değerlendirilmektedir.

2.7.5. Akıtma (Flow Coating) Yöntemi

Akıtma yöntemi (flow coating), emaye kaplamanın özellikle geniş, düz ya da kavisli yüzeylere yerçekimi etkisiyle kontrollü şekilde dökülerek uygulanması esasına dayanan bir kaplama tekniğidir. Bu yöntemde, su bazlı emaye süspansiyonu, parçanın üst noktasından başlamak üzere yüzey boyunca yavaşça akıtılır; emaye akış yönünde metal yüzeye yapışarak ince ve homojen bir film tabakası oluşturur. Uygulama sonrası parça kurutulur ve ardından yüksek sıcaklıkta fırınlanarak camsı emaye tabakası elde edilir (Koç, Gündüz ve Şahintürk, 2020).

Akıtma yöntemi, özellikle daldırmanın mümkün olmadığı büyük ebatlı parçalar, kapalı sistemli üretim hatları veya çok sayıda benzer parçanın ardışık biçimde kaplanması gereken durumlarda kullanışlı bir çözümdür. Yöntemin temel avantajı, süspansiyonun çok az miktarda kullanılması ve bu süspansiyonun doğrudan geri toplanarak tekrar kullanılabilmesidir. Böylece hem malzeme israfı önlenmiş olur hem de maliyet etkinliği sağlanır. Bu yöntemde kaplama kalınlığı; akıtılan süspansiyonun viskozitesi, yüzeyin eğimi ve akıtma hızı gibi parametrelere bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Özellikle viskozitenin çok düşük olması durumunda yüzeyde akıntı izleri ve kaplama homojensizliği gibi problemler ortaya çıkabilir. Bu nedenle süspansiyonun kararlılığı ve sürekli karıştırılması hayati önem taşır. Flow coating yöntemi, gıda sanayi ekipmanları, termosifon iç yüzeyleri, emaye kazanlar ve elektrikli ısıtıcı paneller gibi büyük yüzeyli ürünlerde uygulanmaktadır. Ayrıca bu teknik, karmaşık olmayan geometrilerde tek kat astar uygulaması olarak da tercih edilmektedir (Rossi ve Scrinzi, 2013). Ancak yöntemin bazı sınırlılıkları da mevcuttur. Özellikle çok detaylı geometrilere sahip parçalarda yüzeyin her yerine eşit kaplama sağlanması zorlaşabilir. Ayrıca uygulama sırasında akış yönü ile ters kalan bölgelerde film kalınlığı düşebilir ve bu da emaye kusurlarına neden olabilir. Bu nedenle yöntem, düzlem yüzeylerde ve kontrollü akış sistemlerinde optimum verimle çalışmaktadır.

Özetle, akıtma yöntemi; düşük maliyet, geri kazanım imkânı ve basit uygulama prensibi ile emaye kaplama proseslerinde işlevsel bir alternatif sunmakta, ancak uygulama alanı ve parça tasarımı açısından bazı sınırlamalar barındırmaktadır.

2.7.6. Plazma Sprey Yöntemi

Plazma sprey yöntemi, emaye kaplama teknolojisinde yüksek performanslı, teknik açıdan karmaşık ve hassas uygulamalara yönelik olarak geliştirilen ileri düzey bir kaplama tekniğidir. Bu yöntemde, emaye tozları yüksek sıcaklıklı bir plazma arkı içerisine enjekte edilmekte ve burada saniyeler içinde ergitilerek, hızla çelik yüzeye püskürtülmektedir. Yüzeye ulaşan erimiş parçacıklar, alt tabakayla temas ettikleri anda katılaşmakta ve camsı bir kaplama oluşturulmaktadır (Deng ve diğ., 2023; Rossi, Russo ve Calovi, 2021).

Plazma sprey teknolojisi, özellikle yüksek yapışma gücü, yoğun kaplama ve mükemmel mikroyapı kontrolü sağlaması nedeniyle klasik emaye kaplama yöntemlerine göre önemli avantajlar sunmaktadır. Uygulamada kullanılan plazma alevi, genellikle 5000–15000 °C sıcaklık aralığında olup, emaye tozlarının kısa sürede ergimesini ve yüzeye yüksek hızla ulaşmasını sağlar. Bu yüksek enerji seviyesi, camsı fazın çelikle etkin bir bağ kurmasını kolaylaştırmakta ve arayüzde güçlü difüzyon etkisi oluşturabilmektedir (Samiee, Sarpoolaky ve Mirhabibi, 2007).

Plazma sprey yöntemiyle elde edilen kaplamalar, düşük poroziteye sahip, aşınma ve korozyon direnci yüksek, yüzey homojenliği bakımından üstün nitelikte olmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle, söz konusu yöntem yüksek sıcaklık ve agresif kimyasal ortamlara maruz kalan parçalar, ısı değiştiriciler, endüstriyel kazan parçaları ve ağır sanayi ekipmanları gibi özel uygulama alanlarında tercih edilmektedir. Ancak plazma sprey tekniği yüksek teknoloji ve hassas ekipman gerektirdiğinden, kurulum ve işletme maliyeti oldukça yüksektir. Ayrıca kaplama kalitesi, kullanılan tozun tane boyutu dağılımı, taşıyıcı gazın basıncı ve plazma sıcaklığı gibi çok sayıda parametreye bağlıdır. Bu nedenle prosesin optimize edilmesi uzmanlık gerektirir ve seri üretim uygulamaları için uygunluğu sınırlıdır. Yine de gelişmiş kaplama özellikleri, bu yöntemi özellikle emaye kaplamaların yeni nesil fonksiyonel uygulamalarında (örneğin antibakteriyel, kendini temizleyen yüzeyler, yüksek tribolojik direnç) önemli bir seçenek hâline getirmektedir. Son yıllarda yapılan araştırmalar, plazma sprey tekniği ile kaplanan çelik yüzeylerde

emayenin hem mikroyapı bütünlüğünün arttığını hem de arayüzde kimyasal bağlanma ve difüzyonun daha etkin gerçekleştiğini göstermektedir (Deng ve diğ., 2023).

2.8. Balık Pulu ve Diğer Yüzey Hataları

Emaye kaplama işlemi hem estetik hem de teknik işlevleri bir arada gerçekleştiren karmaşık bir yüzey mühendisliği uygulamasıdır. Ancak bu sürecin hassasiyet gerektirmesi, çeşitli üretim aşamalarında hataların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Özellikle pişirme sırasında ortaya çıkan fiziksel, kimyasal ve termal gerilimler, kaplama yüzeyinde yapısal bütünlüğü bozan çeşitli kusurlara yol açmaktadır. Bu hatalar, yalnızca görsel estetik açısından değil, aynı zamanda kaplamanın korozyon direnci, yapışma gücü ve uzun ömürlülüğü bakımından da ciddi problemlere neden olmaktadır (Koç, Gündüz ve Şahintürk, 2020). Literatürde en sık karşılaşılan yüzey hataları arasında balık pulu (fish scale), kabarcık (blister), karbon kaynaması, portakal kabuğu, çatlama, zayıf yapışma ve düşük parlaklık gibi sorunlar yer almaktadır.

2.8.1. Balık Pulu (Fish Scale)

Balık pulu, emaye kaplamanın en karakteristik kusurlarından biridir. Adını, emaye yüzeyinde gözlemlenen pul şeklindeki kabarcıklı kabarma görüntüsünden alır. Bu kusur temel olarak, pişirme sürecinde çelik yüzeyin altından emaye tabakasını deforme edecek şekilde gaz çıkışı gerçekleşmesinden kaynaklanır. Ana etken, hidrojen gazıdır. Emaye öncesinde yüzeye nüfuz eden nem, yağ, asit kalıntısı veya metal yapısında doğal olarak bulunan hidrojen, fırınlama sırasında yüksek sıcaklıkta dışarı çıkmak ister. Ancak camsı tabaka viskozlaştığında bu gazın çıkışı engellenir ve yüzeyde iç basınç oluşur. Sonuçta emaye film yerinden kalkar ve dışarıya doğru yükselerek tipik balık pulu görünümünü oluşturur (Elkoca ve Çimen, 2017).

Bu hatanın önlenebilmesi için önerilen başlıca yöntemler:

- Düşük hidrojen emilimli IF (interstitial free) çeliklerin kullanımı,
- Uygun ön tavlama (650–700 °C'de hidrojenin tahliyesi),
- Asit yıkama ve yüzey nötralizasyonu,
- Kısa pişirme süresi yerine yavaş ısınma ile kontrollü fırınlama.

Literatürde yapılan mikroyapı analizlerinde, balık pulu kusurunun çoğunlukla emaye-metal arayüzünde mikro çatlaklar veya delaminasyon ile görüldüğü, bu da arayüz bağlanmasının zayıflamasına neden olduğu bildirilmiştir (Deng ve diğ., 2023).

2.8.2. Kabarcık (Blistering)

Kabarcık oluşumu, yüzeyde rastgele dağılmış, içi boş veya gazla dolu, genellikle 1–5 mm çapında olan kabarmalardır. Bu hatalar, çoğunlukla kaplama kalınlığının fazla olduğu durumlarda, emaye süspansiyonundaki suyun veya organik bağlayıcıların pişirme sırasında tam olarak buharlaşmamasından kaynaklanır. Aynı zamanda yüzeydeki yağ, deterjan kalıntısı, gres gibi maddeler de ısı etkisiyle gaz hâline geçerek yüzeyi deforme edebilir.

Bu hataların önlenebilmesi için:

- Süspansiyonun standart viskozitede ve homojen karışımda hazırlanması,
- İnce tabaka hâlinde uygulama yapılması,
- Yüzeyin kimyasal ve fiziksel olarak tamamen temizlenmesi gereklidir.

Blister tipi kusurlar, özellikle görsel kalite gerektiren ürünlerde ciddi ret nedeni olabilir. Ayrıca bu boşluklar yüzeyde çatlamaya ve sıvı geçişine neden olarak korozyon direncini ciddi biçimde düşürür (Gouda, El-Sayed ve Ahmed, 2014).

2.8.3. Karbon Kaynaması (Carbon Boiling)

Karbon kaynaması, yüzeydeki görünmeyen organik kalıntıların pişirme sırasında yanarak karbondioksit üretmesi ve bunun camsı faz altında sıkışması sonucunda oluşan kusurdur. Özellikle keçeli kalem, yapışkan etiket, plastik eldiven teması gibi durumlar, karbon içerikli kalıntıların emaye yüzeyinde ısıl bozunmasına yol açar. Bu durum yüzeyde siyah lekeler, opak bölgeler ve çatlaklar oluşturabilir. Bu hatanın en etkili çözüm yolu, üretim alanında temiz çalışma sağlamak, yüzey kontaminasyonunu önlemek ve pişirme öncesi yüzey kontrolü yapmaktır (Koç ve diğ., 2020).

2.8.4. Portakal Kabuğu Görünümü

Portakal kabuğu hatası, yüzeydeki mikro dalgalanmalarla karakterize olan, parlaklığı düşük, pürüzlü görünümdür. Bu kusur genellikle püskürtme uygulamalarında

süspansiyonun viskozitesinin fazla olması, uygulama açısının yanlış seçilmesi veya uygulama sırasında tabanca ile yüzey arasındaki mesafenin değişken olması sonucu meydana gelir. Özellikle yaş sprey yönteminde sık karşılaşılır. Çözüm olarak uygulama parametrelerinin standardize edilmesi, nozul çapı ve püskürtme basıncının kontrol altında tutulması önerilmektedir.

2.8.5. Zayıf Yapışma ve Delaminasyon

Emaye kaplamanın yüzeye tutunmasının yetersiz olması, pişirme sonrası soyulma, dökülme veya çatlama ile kendini gösterir. Bu hata; arayüzde kimyasal bağın, difüzyon geçişinin veya mekanik tutunmanın zayıf kaldığı durumlarda meydana gelir. Özellikle pişirme sıcaklığının yetersiz olması, frit bileşiminin yüzeyle uyumsuzluğu veya uygulama öncesi yüzeyde pas, oksit tabakası gibi engelleyici unsurlar bulunması bu hatayı artırır (Rossi ve Scrinzi, 2013). Uygun frit tasarımı, temiz yüzey, yeterli fırın sıcaklığı ve yavaş soğutma işlemi, bu tür hataların önlenmesinde kritik rol oynar.

Emaye kaplamalarda ortaya çıkan yüzey hataları, üretim verimliliğini, nihai ürün kalitesini ve müşteri memnuniyetini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle yüzey kusurlarının sistematik olarak sınıflandırılması, nedenlerinin analizi, önleyici uygulamaların belirlenmesi ve standardize kalite kontrol testlerinin uygulanması, endüstriyel süreçlerin sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle SEM, optik mikroskopi, EDS gibi ileri analiz yöntemleri, yüzey kusurlarının mikrometrik nedenlerini ortaya koymak açısından kritik araçlardır.

2.9. Emaye Kaplama Kalitesine Etki Eden Parametreler

Emaye kaplama işleminin başarısı, yalnızca kullanılan frit veya çelik kalitesiyle değil; üretim sürecinin tüm aşamalarındaki parametrelerin doğru yönetilmesiyle mümkündür. Kaplamanın yapışma dayanımı, mikroyapı bütünlüğü, parlaklığı, renk homojenliği ve uzun ömürlülüğü, birçok fiziksel, kimyasal ve termal faktöre bağlı olarak şekillenmektedir (Ayyıldız ve diğ., 2021). Bu bölümde, emaye kaplamanın kalitesini doğrudan etkileyen temel parametreler sistematik biçimde ele alınmaktadır.

2.9.1. Taban Malzemenin Özellikleri

Emaye kaplamanın çelik yüzeye tutunmasında, kullanılan alt tabaka malzemenin kimyasal bileşimi, mikroyapısı ve yüzey karakteri kritik rol oynar. Özellikle düşük karbonlu, az alaşımlı ve mümkünse interstisyel elementlerden (C, N) arındırılmış IF (interstitial free) çelikler tercih edilmektedir. Bu tür çelikler, pişirme sırasında hidrojen gazı çıkışını minimize ederek balık pulu kusurlarını önlemekte, arayüzde kimyasal ve difüzyon bağlarının oluşmasını kolaylaştırmaktadır (Deng ve diğ., 2023). Ayrıca yüzeyin pürüzsüzlüğü, kalıntı seviyesi ve oksit tabakası kalınlığı da kaplama kalitesini doğrudan etkiler. Yüzeydeki mikro çatlaklar veya oksit kalıntıları, emaye yapışmasını zayıflatabilir. Bu nedenle taban malzeme üretimi sırasında uygun tavlama, asitle yıkama, fosfatlama ve yüzey temizliği işlemleri zorunludur.

2.9.2. Yüzey Pürüzlülüğü ve Ön İşlem

Kaplama öncesi çelik yüzeyin hazırlanması, emayenin yüzeye tutunabilmesi açısından vazgeçilmezdir. Yüzeyin belirli bir pürüzlülük seviyesinde olması, camsı fazın fiziksel olarak yüzeye tutunmasını sağlayan mekanik bağlanma mekanizmasını destekler. Ancak aşırı pürüzlü yüzeylerde, emaye süspansiyonunun dolgun olarak tutunamaması, yüzeyde baloncuk ve gözenek oluşumuna neden olabilir (Gouda, El-Sayed ve Ahmed, 2014). Ön işlem olarak en sık uygulanan yöntemler; asit yıkama (fosforik, sülfürik asit), kumlama, ultrasonik temizleme ve nötralizasyon işlemleridir. Bu işlemler yüzeydeki yağ, oksit ve yabancı partiküllerin giderilmesini sağlar ve kaplama için uygun bir temel hazırlar.

2.9.3. Emaye Tozunun Bileşimi

Emaye tozlarının bileşimi; SiO_2, B_2O_3, Na_2O, K_2O, Al_2O_3, TiO_2 gibi ana cam oluşturan oksitlerin yanı sıra, bağlayıcı, renklendirici ve akışkanlık düzenleyici katkı maddelerini içerir. Bileşimin doğru seçimi, camsı fazın ıslanabilirliği, viskozitesi, pişirme davranışı ve yapışma kabiliyeti üzerinde doğrudan etkilidir (Rossi, Russo ve Calovi, 2021). Örneğin borik oksit (B_2O_3), fritin ergime sıcaklığını düşürürken; titanyum dioksit (TiO_2), opaklık ve beyazlık sağlar. Frit bileşimindeki Na^+ ve K^+ iyonlarının oranı ise camsı fazın termal genleşme katsayısını ve arayüz gerilimini belirleyerek yapışmayı etkiler.

2.9.4. Kaplama Yöntemi

Uygulanan kaplama yöntemi, kaplamanın homojenliği, kalınlığı, yüzey düzgünlüğü ve uygulama tekrarlanabilirliği açısından belirleyici faktördür. Daldırma, yaş püskürtme, elektrostatik toz kaplama, elektroforez ve plazma sprey gibi yöntemlerin her biri; kaplama süspansiyonunun formu, yüzeyin geometrisi ve üretim hacmine göre farklı avantajlar sunar (Koç ve diğ., 2020). Örneğin elektrostatik toz kaplama, seri üretime uygundur ve geri kazanım avantajı sunar. Ancak gölge alanlarda uygulama zorluğu yaşanabilir. Yaş sprey yöntemi, özel formlu parçalarda iyi sonuçlar verir; fakat uygulayıcı becerisi kaliteyi doğrudan etkiler.

2.9.5. Pişirme Sıcaklığı ve Süresi

Pişirme işlemi, emaye fritin camsı hâle geçmesini ve çelik yüzeye kimyasal olarak bağlanmasını sağlayan kritik bir aşamadır. Pişirme sıcaklığı genellikle 800–860 °C arasında değişmekte, süre ise 2 ila 5 dakika arasında tutulmaktadır. Sıcaklık çok düşük olduğunda frit tam olarak ergimez, yüzey mat kalır veya yapışma zayıflar. Çok yüksek sıcaklık ise camsı yapının kristalleşmesine, yüzeyde matlaşmaya ve termal genleşme farkından kaynaklı çatlamalara neden olabilir (Deng ve diğ., 2023). Pişirme süresi de benzer şekilde denge gerektirir. Yetersiz süre, suyun buharlaşmasını tamamlayamazken; fazla süre yüzeyin aşırı ısıya maruz kalarak gerilme çatlaklarına neden olabilir. Bu nedenle fırın tipi (gazlı, elektrikli, konveyör), hava dolaşımı ve parça kalınlığı göz önünde bulundurularak optimizasyon yapılmalıdır.

2.9.6. Kat Sayısı ve Katman Yapısı

Kaplama sistemleri genellikle tek kat, çift kat tek pişirim veya çift kat çift pişirim olarak uygulanır. Alt kat (primer) ve üst kat (kaplama) arasında uygun ıslatma, yapışma ve termal uyum sağlanmazsa yüzeyde kabarma, soyulma ve renk farkları ortaya çıkabilir. Özellikle çift kat uygulamalarda, ilk katın tam kürlenmeden ikinci katın uygulanması, arayüzde gaz birikimine neden olabilir (Rossi ve Scrinzi, 2013).

Katmanlar arası yapışma; uygulama yöntemi, arayüzdeki pH dengesi, süspansiyonun viskozitesi ve pişirme parametreleri ile doğrudan ilişkilidir. Katman kalınlığı ise görsel kalite, kimyasal dayanıklılık ve mekanik mukavemet gibi faktörleri etkiler.

2.10. Emaye Kalite Kontrol Testleri

Emaye kaplamaların teknik geçerliliği ve endüstriyel uygunluğu, yalnızca uygulama süreciyle değil; aynı zamanda son ürün üzerinde yapılan sistematik kalite kontrol testleriyle de değerlendirilir (Edige, 2011). Bu testler, kaplamanın mekanik dayanımı, kimyasal direnç seviyesi, görsel kalitesi ve yapışma kabiliyetine dair ölçülebilir veriler sunar. Kalite kontrol süreçleri aynı zamanda, üretim parametrelerinin doğruluğunu denetlemekte, süreç hatalarının izlenebilirliğini sağlamaktadır (Koç, Gündüz ve Şahintürk, 2020; Deng ve diğ., 2023).

Bu bölümde emaye kaplamalarda en yaygın şekilde uygulanan kalite kontrol testleri; kaplama kalınlığı ölçümü, parlaklık ve renk tayini, darbe testi, yapışma testi ve optik yüzey kontrolü olmak üzere ele alınmaktadır.

2.10.1. Kalınlık Ölçümü

Emaye tabakasının kalınlığı, kaplamanın koruyucu etkisini, mekanik dayanımını ve termal performansını doğrudan etkileyen temel parametrelerden biridir. Çok ince kaplamalar, yeterli koruma sağlayamazken; aşırı kalın kaplamalar ise pişirme sırasında kabarcık, çatlama ve soyulma gibi hatalara yol açabilir. Bu nedenle emaye kaplama kalınlığının hem homojen hem de optimum aralıkta olması gereklidir.

Kaplama kalınlığı genellikle ≤ indüksiyon yöntemi ile ölçülür. Bu yöntemde, kaplama altındaki demir veya çelik gibi manyetik iletken yüzeyin oluşturduğu manyetik alan, cihaz tarafından algılanarak aradaki camsı tabaka kalınlığı hesaplanır. Bu yöntem cihazın probu ile manyetik yüzey arasında oluşan manyetik alanın değişimine dayanır. Prob manyetik metal yüzeye yaklaştırıldığında cihaz bir manyetik akı oluşturur. Bu alan kaplamanın kalınlığına göre değişir. Kaplama miktarı ne kadar fazla ise manyetik alan o kadar zayıflar. Cihaz bu zayıflamayı ölçerek kaplama kalınlığını mikron (µm) cinsinden verir. Alternatif olarak mikro kesit yöntemi kullanılarak metalografik inceleme yapılabilir; bu yöntemde kesit alınarak optik mikroskop altında ölçüm gerçekleştirilir (Rossi ve Scrinzi, 2013). Emaye kalınlığı uygulama yöntemine bağlı olarak genellikle 80–200 µm aralığında değişmektedir.

2.10.2. Parlaklık ve Renk Ölçümü

Emaye kaplamaların görsel kalitesi, parlaklık ve renk homojenliği ile doğrudan ilişkilidir. Parlaklık, yüzeyin ışığı yansıtma kabiliyeti ile belirlenir ve 60° açılı glossmetre cihazı kullanılarak ölçülür. Değerler genellikle GU (Gloss Unit) cinsinden ifade edilir. Kaplamada opaklık, portakal kabuğu görünümü ya da yüzeydeki mikropürüzlülük, parlaklık değerini düşürmektedir (Moss, 1984).

Renk ölçümleri ise spektrofotometrik cihazlar ile CIE L*, a*, b* renk uzayı üzerinden değerlendirilir. Renk farkı (ΔE) değeri, farklı üretim partileri arasında veya referans numuneyle karşılaştırmalı analizlerde kullanılır. ΔE değeri 1.0'ın altında ise fark genellikle insan gözüyle algılanamaz düzeydedir (Deng ve diğ., 2023). Parlaklık ve renk analizleri, özellikle estetik ürünlerde (beyaz eşya gövdeleri, fırın iç yüzeyleri) kalite kontrol süreçlerinin vazgeçilmez testleri arasındadır.

2.10.3. Darbe Testi

Emaye kaplamanın dış darbelere karşı direnci, özellikle montaj sırasında oluşabilecek hasarları ve kullanım ömrünü belirleyen önemli bir parametredir. Bu testte belirli bir yükseklikten bırakılan standart ağırlıklı çekiç, kaplama yüzeyine etki ettirilir. Uygulanan enerji sonucu kaplama yüzeyinde çatlama, kırılma, soyulma olup olmadığı gözlenir (Moss, 1984).

Darbe testi hem gözle değerlendirme hem de mikroskobik inceleme ile yapılabilir. Emaye kalınlığı, pişirme sıcaklığı, yüzey hazırlığı ve kullanılan çelik kalitesi darbe direncini etkileyen başlıca faktörlerdir. Özellikle sert fakat gevrek yapıya sahip emayeler, yüksek darbe karşısında kırılganlık gösterebilir. Bu nedenle darbe dayanımı, estetik görünümün korunması kadar yapışma kalitesi hakkında da dolaylı bilgi verir (Danesh ve diğ., 2020; Asaad ve diğ., 2024).

2.10.4. Yapışma Testi

Kaplamanın çelik yüzeyle olan bağlanma kalitesini değerlendiren yapışma testi, emaye–metal arayüzündeki bağ gücünü doğrudan ölçer. Yapışma testleri için en yaygın yöntemlerden biri çapraz kesim (cross-hatch) testi olup, bu yöntemde, yüzey üzerine 1

mm aralıklarla dikey ve yatay çizikler atılır, ardından yüzey yapışkan bant ile kaplanarak hızla sökülür. Kopan parça oranı, yapışmanın kalitesini belirler. Alternatif olarak pull-off yapışma testi ile kaplamaya dik yönde mekanik kuvvet uygulanarak ayrılma mukavemeti ölçülebilir. Güçlü yapışma, emaye tabakasının uzun vadede yüzeyde kalıcılığını garanti altına alır. Özellikle düşük pişirme sıcaklığı veya yetersiz ön işlem yapılmış yüzeylerde yapışma başarısızlıkla sonuçlanabilir (Rossi ve Scrinzi, 2013).

2.10.5. Görsel Yüzey Kontrolleri ve Hata Tespiti

Kalite kontrol sürecinin en temel aşamalarından biri, fırınlama sonrası yüzeyin gözle veya büyütme altında incelenmesidir. Bu aşamada balık pulu, blister, çatlak, soyulma, renk farklılığı, portakal kabuğu görünümü gibi kusurlar aranır. Görsel kontrollerden balık pulu hatası TS EN 10209 standardında tanımlanan kriterlere göre yapılır. Kritik uygulamalarda optik mikroskop veya SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) kullanılarak detaylı yüzey analizi yapılabilir. Yüzey hatalarının sistematik olarak kayıt altına alınması, üretim hatalarının izlenebilirliğini sağlar ve sürecin optimizasyonu için geri bildirim sağlar (Gouda, El-Sayed ve Ahmed, 2014).

Emaye kalite kontrol testleri hem ürün standardizasyonu hem de müşteri memnuniyeti açısından büyük önem taşır. Bu testler sayesinde yalnızca ürün kalitesi değil, aynı zamanda üretim süreci hataları da tespit edilebilir. Bu sayede; kullanılan çeliğin uygunluğu, kaplama yöntemi, frit bileşimi ve pişirme parametrelerinin doğruluğu doğrulanabilir. Modern üretim tesislerinde kalite kontrol, yalnızca nihai ürün değil, üretim hattının tüm aşamalarına entegre edilen önleyici kalite sistemleri ile desteklenmektedir. Böylece hem kusurların tekrar etmesi önlenir hem de sürdürülebilir kalite politikası sağlanmış olur.

2.11. Kullanılan Yüzey ve Malzeme Analiz Yöntemleri

Emaye kaplamaların performansını ve kalitesini belirlemede yalnızca makro düzeyde yapılan testler yeterli değildir; aynı zamanda mikroyapısal ve yüzey morfolojisine ilişkin analizler de gereklidir. Emaye kaplama ile çelik yüzey arasındaki etkileşimin mekanizması, kaplama tabakasının yapısal homojenliği, gözenek dağılımı, arayüzdeki kimyasal geçiş bölgeleri ve yüzeydeki hataların mikroskobik karakterizasyonu bu analiz

yöntemleri sayesinde ortaya konulmaktadır (Moss, 1984). Bu amaçla hem geleneksel hem de ileri düzey analiz teknikleri kullanılmaktadır. Aşağıda emaye kaplamalarda yaygın şekilde kullanılan temel analiz yöntemleri açıklanmıştır.

2.11.1. SEM – Metalografik İnceleme

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), emaye kaplamaların mikroyapı karakterizasyonunda ve yüzey–alt tabaka arayüzünün analizinde yaygın biçimde kullanılan ileri düzey bir görüntüleme tekniğidir. SEM cihazı, yüzeye elektron demeti göndererek yüksek çözünürlüklü görüntü elde eder; aynı zamanda enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ile yüzey bileşimini de analiz edebilir (Șerbănoiu, ve diğ., 2024).

Emaye kaplamalarda SEM kullanımı şu analizleri mümkün kılar:

- Emaye tabakasının kalınlık ölçümü (mikron düzeyinde),
- Yüzey pürüzlülüğü ve gözenek yapısı,
- Kaplamadaki çatlak ve delaminasyon analizleri,
- Emaye–çelik arayüzünde oluşan geçiş fazlarının (örneğin Fe_2SiO_4, $FeAl_2O_4$) incelenmesi.

Özellikle balık pulu, blister ve çatlama gibi kusurların mikro yapısal nedenleri SEM görüntüleriyle net biçimde analiz edilebilmektedir. Metalografik inceleme ise, hazırlanan numunenin kalıplama, zımparalama, parlatma ve etching (asidik daldırma) işlemlerinden geçirilerek ışık mikroskobu altında incelenmesidir. Bu teknikle hem çelik altyapının tane yapısı hem de emaye katmanının yapışma durumu gözlemlenir (Koç, Gündüz ve Şahintürk, 2020).

2.11.2. Parlaklık ve Renk Ölçümü

Emaye kaplamaların görsel kalite değerlendirmesi, özellikle parlaklık ve renk tutarlılığı bakımından sayısal olarak analiz edilebilir. Bu ölçümler, üretim partileri arasında kalite standardizasyonu sağlamak açısından büyük önem taşır. Parlaklık ölçümleri, CIE standartlarına uygun olarak 60° açılı glossmetre cihazları kullanılarak gerçekleştirilir. Parlaklık değerleri, özellikle pişirme sıcaklığı, frit bileşimi, uygulama kalınlığı ve yüzey düzlüğü gibi parametrelerle doğrudan ilişkilidir. Homojen yüzeylerde parlaklık 80 GU ve

üzerindeyken, pürüzlü ve portakal kabuğu görünümüne sahip yüzeylerde bu değer belirgin şekilde düşmektedir (Rossi ve Scrinzi, 2013).

Renk ölçümleri ise spektrofotometrik cihazlarla yapılır ve L*, a*, b* renk uzayı kullanılarak değerlendirilir. Bu uzayda:

L* değeri açıklık–koyuluk,
a* değeri kırmızı–yeşil,
b* değeri sarı–mavi tonunu ifade eder.

Renk farklılıkları, ΔE aşağıda belirtilen (2.1) formülü ile hesaplanır ve genellikle $\Delta E \leq 1.0$ olduğunda renk farkı çıplak gözle algılanamaz.

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(L^*_2 - L^*_1)^2 + (a^*_2 - a^*_1)^2 + (b^*_2 - b^*_1)^2} \tag{2.1}$$

Emaye kaplamada renk tutarlılığı, özellikle estetik ürünlerde kalite kontrol açısından kritik bir parametredir (Koç ve diğ., 2020).

2.11.3. Yapışma ve Darbe Testi Analizleri

Kaplamanın mekanik dayanıklılığı ve taban malzemeye tutunma kalitesi, çeşitli mekanik testler ve bu testlerin sonucunda yapılan mikro analizlerle değerlendirilir. Yapışma testleri sonrasında SEM–EDS analizi kullanılarak arayüzde oluşan difüzyon tabakaları ve bu tabakalardaki element geçişleri incelenebilir (Hellak ve diğ., 2016). Örneğin, Fe atomlarının emaye matrisine geçtiği ya da Na, K gibi iyonların çelik yüzeye doğru hareket ettiği EDS haritalarıyla ortaya konulabilir. Bu analizler, yapışmanın yalnızca mekanik değil, kimyasal ve difüzyonel bileşenlerinin olduğunu da doğrular (Gouda, El-Sayed ve Ahmed, 2014).

Darbe testi sonrası oluşan çatlaklar ise hem SEM görüntüleri hem de ışık mikroskobu ile detaylandırılır. Çatlak boyu, genişliği, kaplama boyunca ilerleme eğilimi, alt tabakaya ulaşıp ulaşmadığı gibi parametreler analiz edilerek darbe dayanımı yorumlanır. Bu tür ileri analiz yöntemleri yalnızca kalite kontrol değil, aynı zamanda yeni ürün geliştirme ve hata kök neden analizi süreçlerinde de vazgeçilmezdir.

3. LİTERATÜR ÖZETİ

3.1. Emaye Kalitesine Katkı Oranının Etkisi

Gençer (2006) tarafından gerçekleştirilen yüksek lisans çalışması, emaye kaplamaların antibakteriyel özellik kazandırılarak fonksiyonel hale getirilmesi amacıyla yürütülmüştür. Çalışmanın temel hedefi, özellikle sağlık sektöründe ve gıda ile temas eden yüzeylerde kullanılmak üzere, mikroorganizmalara karşı dirençli emaye kaplamaların geliştirilmesidir. Bu amaçla, yaş kimyasal çöktürme yöntemi ile kalsiyum fosfat esaslı antibakteriyel seramik tozu sentezlenmiştir. Hazırlanan bu toz, emaye tozu matrisine belirli oranlarda eklenerek karıştırılmış ve cam esaslı emaye haline getirilmiştir. Üretilen numuneler çelik yüzeylere uygulanmış, ardından yüksek sıcaklıkta pişirme ile sabitlenmiştir. Numunelerin yüzey karakterizasyonları XRD, SEM ve optik mikroskopi ile yapılmış; ayrıca antibakteriyel etkinlik, Escherichia coli bakterisi ile gerçekleştirilen agar difüzyon testleriyle analiz edilmiştir. Araştırma sonucunda, antibakteriyel katkı içeren emaye kaplamaların geleneksel emayelere kıyasla bakteriyel büyümeyi anlamlı şekilde azalttığı belirlenmiştir. Özellikle gümüş katkılı seramiklerin, bakteriyel kolonizasyonu önleyici etkisinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgular, antibakteriyel emaye kaplamaların, hijyen gerektiren endüstriyel alanlarda ve kamuya açık yüzeylerde kullanım potansiyelini destekler niteliktedir.

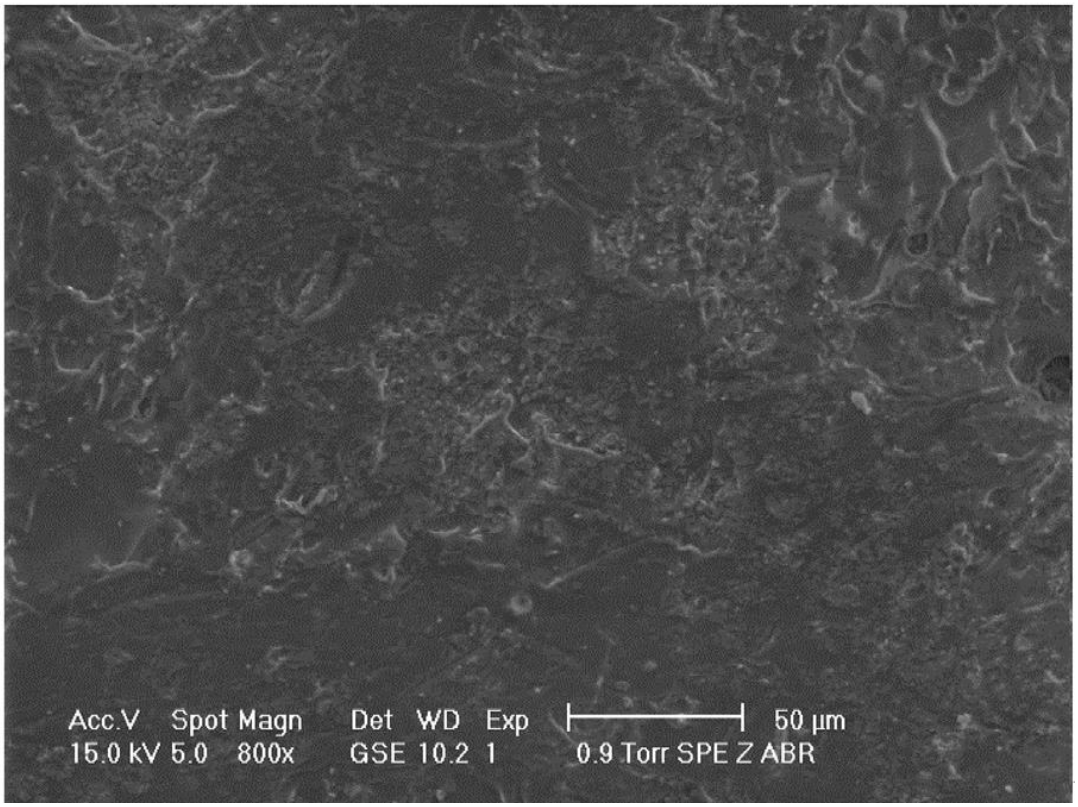
Karagöz (2009) tarafından yapılan yüksek lisans çalışması, emaye kaplamaların fonksiyonel özelliklerini geliştirmek amacıyla fotokatalitik özelliklerin kazandırılmasını hedeflemiştir. Çalışma, özellikle hijyenik yüzey ihtiyacı duyulan sektörlerde, emaye kaplamaların yüzeylerine TiO_2 katkısı ile fotokatalitik aktivite kazandırılmasını amaçlamıştır. Çalışmada, emaye kaplamalar üzerine hava basınçlı püskürtme yöntemiyle TiO_2 katkılı yüzey kaplamaları uygulanmış, ardından sinterleme işlemi 550–820 °C aralığında gerçekleştirilmiştir. Numuneler üzerinde SEM, EDS ve XRD analizleri ile mikroyapı ve faz incelemesi yapılmış; ayrıca yüzey özellikleri ışık geçirgenliği ve renk ölçümleriyle değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, uygulanan TiO_2 katkısının belirli oranlarda yüzeye başarılı bir şekilde tutunduğu ve ışık ile temas hâlinde fotokatalitik etki gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, emaye kaplamaların sadece dekoratif ve koruyucu değil, aynı zamanda antibakteriyel yüzey fonksiyonu taşıyabileceğini göstermiştir.

Böylece özellikle mutfak ekipmanları ve medikal yüzeylerde kullanılabilirliğine dikkat çekilmiştir.

Türkel, Çalışkan Güneş ve Babayiğit (2024) tarafından yürütülen bir diğer araştırma, emayenin tarihsel gelişimi, içerik bileşimi ve uygulanabilirliğine odaklanarak, özellikle bakır yüzeyler üzerinde renkli emaye uygulamalarını incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışma, sanatsal ve teknik emaye kaplama yöntemlerinin hem tarihsel boyutunu hem de çağdaş uygulama süreçlerini ortaya koymaktadır. Araştırmada öncelikle emayenin tarihsel gelişimi ve teknik özelliklerine dair kapsamlı bir literatür taraması yapılmış, ardından deneysel yöntemle 750°C'de eriyen alkali frit, boraks, borik asit gibi eriticiler ile çeşitli pigmentler karıştırılarak 11 farklı emaye reçetesi hazırlanmıştır. Bu reçeteler, bakır plakalara eleme yöntemiyle uygulanmış, ardından özel olarak tasarlanan küçük fırında şalama ateşiyle pişirilmiştir. Uygulamalarda eriticilerin oranı, katman kalınlığı ve pigment çeşitliliği gibi değişkenler esas alınarak karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yüzey temizliği, tavlama, nötralizasyon ve parlatma işlemleri titizlikle yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlar, boraks miktarının arttırılmasının fritin erimesini kolaylaştırarak camsı parlaklık ve pürüzsüzlük sağladığını ortaya koymuştur. Kalınlık farklarına bağlı olarak renk tonlarında değişiklikler gözlemlenmiş; üç kat uygulanan emayelerin daha doygun ve derin tonlar verdiği tespit edilmiştir. Farklı pigment ve oksit katkılarının ise yüzeyde farklı dokular ve estetik görünümler oluşturduğu belirlenmiştir. Uygulama sonunda ortaya çıkan emayelerden kolye ucu, küpe, yüzük ve bileklik gibi takılar üretilmiş ve sanatsal tasarımlarda kullanılabilirliği test edilmiştir.

Rossi ve Scrinzi (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışma, emaye kaplamaların aşınma dayanımı üzerine katkı maddelerinin etkilerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın temel hedefi, potasyum feldspat ve zirkonyum silikat gibi katkı maddelerinin emaye yüzey ve yüzey altı aşınma davranışı üzerindeki etkilerini deneysel olarak ortaya koymaktır. Çalışmada üç farklı bileşime sahip emaye karışımları hazırlanmış; bunlar yaş daldırma ve elektrostatik püskürtme teknikleri ile metal yüzeylere uygulanmıştır. Numunelere Yüzey Aşınması ve Taber Aşınması testleri uygulanmıştır. Ayrıca SEM, optik mikroskop, parlaklık ölçümleri ve kütle kaybı analizleri ile yapısal değişimler değerlendirilmiştir. Sonuçlar, katkı içeren emaye karışımlarının, saf

bileşimlere göre daha düşük aşınma dayanımı gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle katkı maddeleri camsı matris içerisinde çözünmeden kaldığında mikro çatlak oluşumuna zemin hazırlamış ve yüzeyde matlaşma, parlaklık kaybı gibi estetik kusurlar meydana gelmiştir. Çalışma, katkı maddelerinin miktar ve dağılımının dikkatli optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.



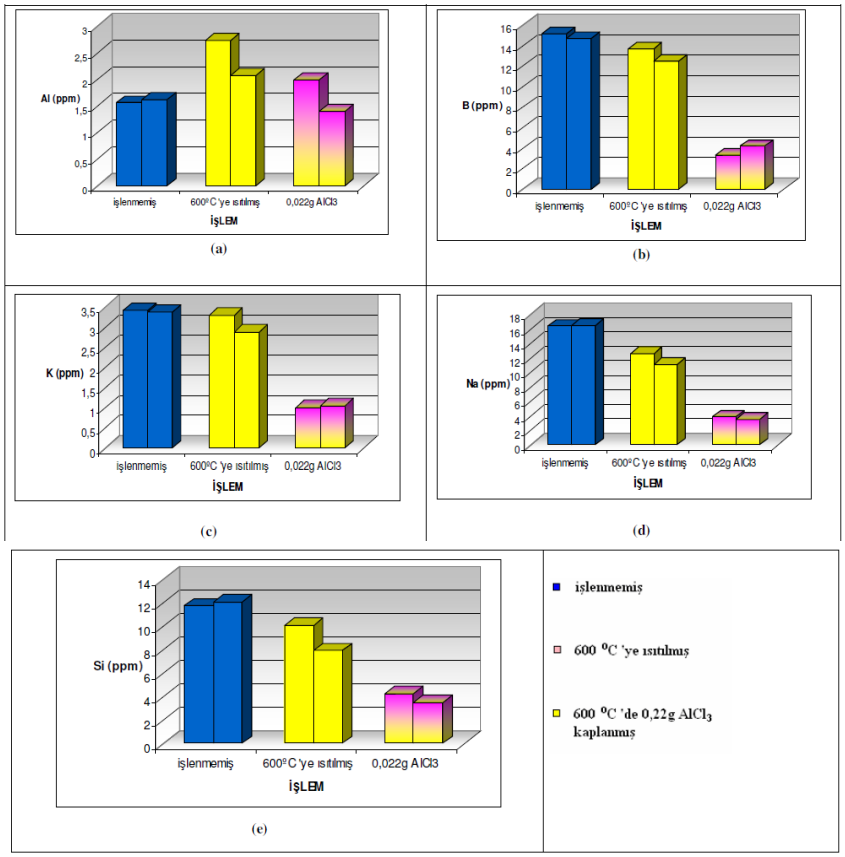
Şekil 3.1. Zirkonyum silikat katkılı emaye numunesi (SPE Z) yüzeyinin taber aşındırma testi sonrası ESEM görüntüsü (Rossi ve Scrinzi, 2013)

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi Yüzeyde katkı maddesinin camsı faz içinde çözünmeden kalması sonucu oluşan mikro çatlaklar ve bozulmalar görülmektedir (Rossi ve Scrinzi, 2013).

3.2. Emaye Kalitesine Pişirme Sıcaklığı ve Süresinin Etkisi

Altınbay (2007) tarafından yapılan çalışma, titanyum beyazı emayelerin kimyasal dayanımını iyileştirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Özellikle asidik ve bazik ortamlarda kaplama stabilitesini artırmak için farklı kimyasal katkı maddeleriyle emaye kaplamaların modifiye edilmesi hedeflenmiştir. Araştırmada, ticari emaye örneklerine $AlCl_3$, $ZrCl_4$ ve $(NH_4)_2SO_4$ gibi tuzlar farklı oranlarda uygulanmış ve ardından numuneler

değişik sıcaklıklarda pişirilmiştir. Kaplamalar, çelik levhalar üzerine yaş kaplama yöntemi ile uygulanmış, ardından 500–700 °C arasında değişen sıcaklıklarda fırınlanmıştır. Ayrıca yüzeydeki değişiklikler optik mikroskop ve SEM analizleriyle gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, özellikle 600 °C pişirme sıcaklığında ve uygun katkı oranlarında işlem gören numunelerin, kimyasal saldırılara karşı yüksek direnç gösterdiği belirlenmiştir. Zirkonyum katkısının, emayenin camsı fazında ağ yapı oluşturulmasına yardımcı olarak kimyasal dayanımı olumlu yönde etkilediği saptanmıştır. Bu bulgular, özellikle endüstriyel kaplama sistemlerinde emayenin daha geniş kimyasal ortamlarda kullanılabilirliğini artırmaktadır.

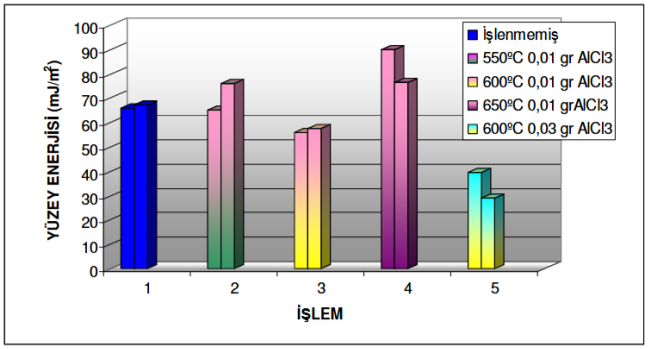


(a) Al içerigi (ppm), (b) B içerigi (ppm), (c) Na içerigi (ppm), (d) K içerigi (ppm), (e) Si içerigi (ppm)

Şekil 3.2. Titan beyazı örtü kaplaması emayelerinin eluat kimyasal kompozisyonları (Sitrik asit, 100 °C, 2,5 saat) (Altınbay, 2007)

Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi, 600 °C'de pişirilen ve $AlCl_3$ ile kaplanmış numunelerde, sitrik asit çözeltisine geçen element miktarlarında önemli bir azalma gözlenmiş; bu da katkı maddesinin kimyasal dayanımı artırıcı etkisini doğrulamaktadır.

Evcimen (2007) tarafından yürütülen bu tez çalışması, emaye kaplamaların çeşitli pişirme parametreleri ve reçete varyasyonlarına bağlı olarak gösterdiği mekanik, görsel ve yapısal performansını değerlendirmeye odaklanmaktadır. Araştırmada, farklı oranlarda siyah ve beyaz emaye karışımları kullanılarak tek kat ve çift kat kaplama işlemleri yapılmıştır. Uygulamalar yaş sprey yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve numuneler çeşitli sıcaklık (790 °C–850 °C) ve süre (1–5 dakika) kombinasyonlarıyla fırınlanmıştır. Deneysel karakterizasyon yöntemleri arasında parlaklık ölçümleri, darbe dayanımı testi, yapışma testleri ve SEM ile yüzey incelemeleri yer almaktadır. Çalışmada, siyah emaye içeriği artırıldığında genel olarak yapışma dayanımının iyileştiği, beyaz emaye oranı yükseldikçe ise mekanik ve görsel kalite üzerinde olumsuzlukların artabildiği belirlenmiştir. Ayrıca pişirme süresi ve sıcaklığının kaplamanın parlaklık ve renk değerleri üzerinde belirgin etkiler yarattığı gözlemlenmiştir. Daha kısa süreli ve düşük sıcaklıkta pişirilen numunelerde matlaşma ve düşük yapışma performansı görülmüştür. Çalışmanın genel bulguları, emaye kaplama işlemlerinde uygun reçete–süre–sıcaklık kombinasyonunun belirlenmesinin, kaplama kalitesi ve endüstriyel verimlilik açısından kritik önemde olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 3.3. Yüzey enerjisi – işlem (ısıtılmış ve kaplanmış numuneler) (Evcimen, 2007)

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi, özellikle 600 °C'de 0,01 g $AlCl_3$ katkısıyla işlem gören numunelerde yüzey enerjisinin maksimum düzeye ulaştığı tespit edilmiştir. Bu durum, katkı maddesinin camsı matris içerisinde uygun sıcaklıkta daha etkin bir ağ yapı oluşturarak yüzey bütünlüğünü ve tutunma performansını artırdığını göstermektedir. Buna karşın, katkı oranının artırıldığı (0,03 g $AlCl_3$) ya da pişirme sıcaklığının yetersiz kaldığı (550 °C) örneklerde yüzey enerjisi düşmüş; bu da yüzeyin daha heterojen hâle geldiğine ve yapışma performansının zayıfladığına işaret etmektedir.

3.3. Sıcaklık Değişimini İnceleyen Çalışmalar

Durmuşoğlu (2009) tarafından yapılan çalışma, emayeleme sürecinde ortaya çıkan yüzey hatalarının sınıflandırılması ve bu hataların oluşum nedenlerinin analiz edilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Araştırma, üretim süreçlerinde kalite kontrol açısından karşılaşılan sorunları çözümlemeyi ve hatalı üretimin önüne geçilmesini amaçlamaktadır. Çalışmada farklı yüzey hazırlıkları ile emaye kaplama işlemleri uygulanmış ve ardından pişirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Numuneler üzerinde görsel inceleme, optik mikroskopi, profilometre analizleri ve hataların sayısal değerlendirmesi yapılmıştır. Ayrıca farklı pişirme sıcaklıkları (790–850 °C) ve süreleri (1–5 dk) denenerek hataların bu değişkenlere duyarlılığı incelenmiştir. Elde edilen bulgular, yüzeyde sıklıkla karşılaşılan balık pulu, kabarcık (blister), karbon kaynaması, zayıf yapışma, portakal kabuğu gibi hataların oluşumunda başlıca etkenlerin sac yüzeyindeki artık hidrojen, kaplama kalınlığı, pişirme sıcaklık ve süresi olduğunu göstermiştir. Özellikle yüksek sıcaklıkta ve kalın kaplama yapılan örneklerde balık pulu kusuru ve kabarcık oluşumu sıklıkla gözlenmiştir. Bu çalışma, üretim parametrelerinin hassas şekilde kontrol edilmesinin kaplama kalitesine doğrudan etkili olduğunu ortaya koymuştur.



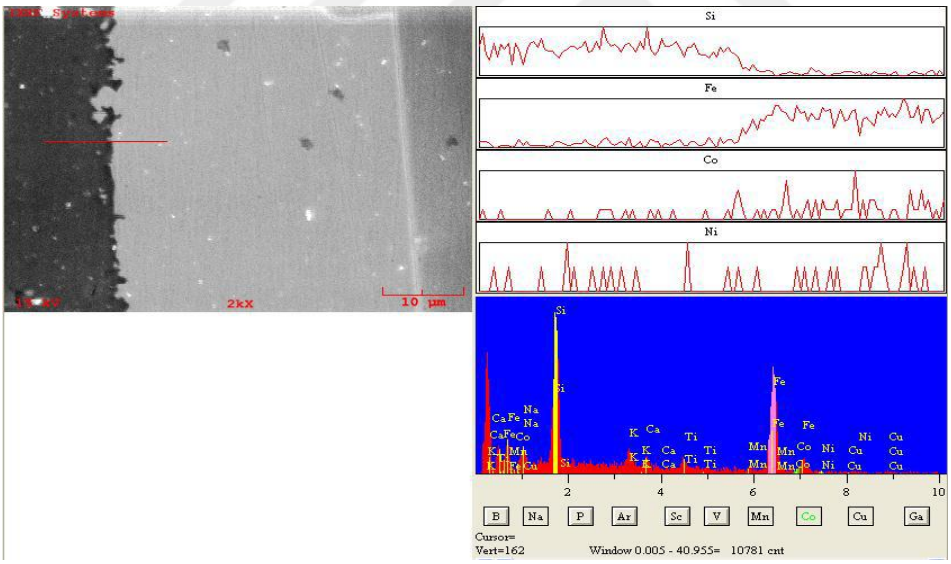
Şekil 3.4. Numunenin yüzeyinde görülen portakal kabuğu hatasının görüntüsü (Durmuşoğlu, 2009)

Şekil 3.4'te görüldüğü gibi, numune yüzeyinde düzensiz dalgalanmalar ve yüzey pürüzleri dikkat çekmektedir. Bu tür yapısal bozukluklar, pişirme parametrelerinin kontrolsüz uygulanmasından kaynaklanmakta; kaplamanın estetik kalitesini ve yüzey homojenliğini doğrudan olumsuz etkilemektedir.

3.4. Farklı Bileşimlerde Emaye Oranlarını İnceleyen Çalışmalar

Yılmaz (2014) tarafından gerçekleştirilen yüksek lisans tezi, emaye kaplamaların çelik taban malzeme ile olan arayüz ilişkisini ve bu ilişkinin kaplama kalitesine etkisini detaylı

olarak incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, araştırmada farklı oranlarda siyah ve beyaz emaye karışımlarının hem mekanik tutunma kabiliyeti hem de estetik görünüm üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada, belirli oranlarda (%10, %30, %50) beyaz emaye karışımları yaş sprey yöntemiyle çelik yüzeylere uygulanmış ve ardından belirli pişirme parametreleri altında kaplamalar elde edilmiştir. Deneysel süreçte parlaklık ve renk ölçümü, darbe testi, yapışma testi, SEM ve EDS analizleri ile emaye tabakasının morfolojisi ve arayüz yapısı incelenmiştir. Araştırma sonucunda, emaye bileşiminde yapılan değişikliklerin yüzey kalitesi üzerinde doğrudan etkili olduğu belirlenmiş; özellikle düşük orandaki beyaz emaye katkısının yüzey düzgünlüğünü artırdığı, yüksek oranların ise çatlak ve yapışma sorunlarına yol açtığı gözlenmiştir. SEM analizlerinde dentritik yapılar tespit edilmiş, EDS analizlerinde ise demir ve geçiş metal oksitlerinin karşılıklı difüzyonu izlenmiştir. Şekil 1, %10 beyaz ve %90 siyah emaye içeren karışımda elde edilen arayüzün çizgisel EDS analiz sonuçlarını sunmakta ve difüzyon geçiş bölgesinin karakteristiğini ortaya koymaktadır.

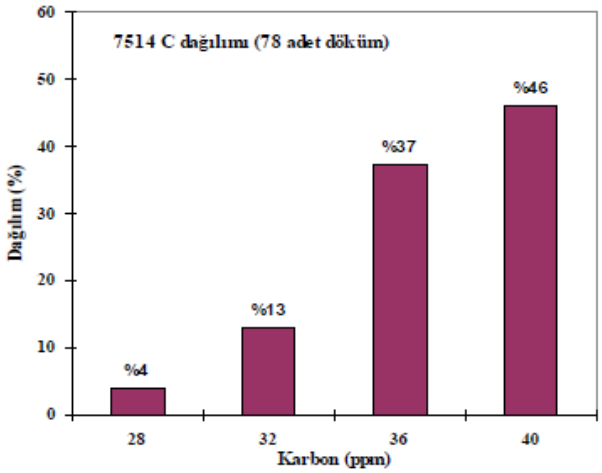


Şekil 3.5. %10 beyaz emaye %90 siyah emayenin arayüzde çizgisel analiz sonucu (Yılmaz, 2014)

Şekil 3.5'teki çizgisel analiz verileri, çelik taban malzeme ile emaye kaplama arasındaki elementel geçişi (özellikle demir ve silisyum difüzyonu) net bir biçimde göstermektedir. Bu durum, araştırma sonucunda vurgulanan düşük oranlı beyaz emaye katkısının hem yapışma kabiliyeti hem de yapısal stabilite üzerindeki olumlu etkilerini destekler niteliktedir.

3.5. Farklı Çelik Özelliklerinde Emaye Kalitesinin İncelenmesi

Koç, Gündüz ve Şahintürk (2020) tarafından hazırlanan teknik rapor niteliğindeki bu çalışma, emaye kaplama teknolojilerinde kullanılan çeliklerin kimyasal ve fiziksel nitelikleri, standartlara uygunlukları ve Erdemir'de gerçekleştirilen üretim süreçleri hakkında sistematik ve uygulamaya dönük bilgiler sunmayı amaçlamaktadır. Çalışma aynı zamanda, üretimden son ürüne kadar olan zincirde, çeliğin emaye ile olan etkileşimini açıklamakta ve kaplama kalitesine etki eden temel parametreleri teknik düzlemde değerlendirmektedir. Yöntemsel olarak, çalışma TS EN 10209 standardına göre emaye çelik kalitelerini sınıflandırmakta ve Erdemir tarafından geliştirilen 7512, 7513 ve 7514 kalite kodlu çeliklerin içerik dağılımlarını, çekme ve akma dayanımlarını, uzama oranlarını karşılaştırmalı tablolarla sunmaktadır. Aynı zamanda bu çeliklerin karbon ve titanyum gibi elementler açısından optimize edilmesi için kullanılan vakum prosesleri, açık bobin tavlaması, stabilize edici element ilavesi gibi metalürjik işlemler ayrıntılı olarak tanımlanmıştır. Sonuçlar, emaye kaplamaya uygunluk açısından çeliklerin düşük karbon içeriği, iyi soğuk şekillenebilirlik, yapışma kabiliyeti, hidrojen tutuculuğu ve balık pulu gibi kusurlara karşı dirençli yapı özelliklerine sahip olması gerektiğini ortaya koymuştur. Erdemir tarafından üretilen çeliklerin bu kriterleri sağladığı, özellikle 7514 kalite IF (Interstitial Free) çeliğin, çok düşük karbon ve kontrollü titanyum içeriği sayesinde direkt emaye kaplamaya son derece uygun olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, 7512 ve 7513 kalite çeliklerin iki kat emaye ve desen uygulamalı kaplamalar için optimize edildiği belirtilmiştir.



Şekil 3.6. Erdemir 7514 kalite ıf çeliğinin karbon dağılımı (Koç ve diğ., 2020).

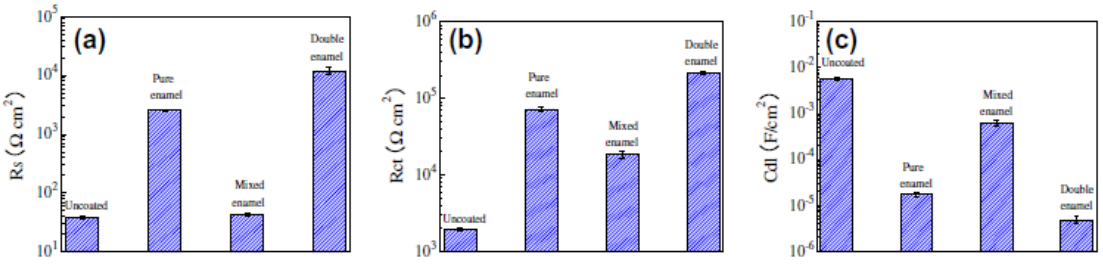
Şekil 3.6'da görüldüğü üzere direkt emaye kaplama uygulamaları için optimize edilmiş çok düşük karbon içeriği, yüzey kusurlarının önlenmesinde avantaj sağlamaktadır. 7514 kalite IF çelik, direkt emaye kaplama için son derece uygun bir alt tabaka malzemesi olarak öne çıkmaktadır.

3.6. Emaye Kaplama Yöntemlerinin Emaye Kalitesine Etkisi

Karasu, Saçkan ve Taplı (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışma, emaye teknolojisinin tarihsel gelişimini, üretim süreçlerini ve günümüzdeki kullanım alanlarını derinlemesine ele alan bir derleme makalesidir. Çalışmanın amacı, emayenin geleneksel uygulamalarından sanayiye kadar olan geniş yelpazesini teknik ve tarihsel bir bakış açısıyla sunmaktır. Çalışmada, emayenin kimyasal bileşimi, üretim aşamaları, uygulama teknikleri ve farklı sektörlerdeki kullanımı sistematik bir şekilde sunulmuştur. Emaye kaplama yöntemleri olarak daldırma, yaş püskürtme, kuru püskürtme ve sürme gibi çeşitli uygulama biçimleri karşılaştırılmış; bu yöntemlerin avantajları ve sınırlılıkları değerlendirilmiştir. Ayrıca endüstride karşılaşılan balık pulu, kalınlık dengesizliği, pişirme hataları gibi kalite problemlerine de değinilmiştir. Sonuç olarak, emaye kaplamaların kimyasal dayanıklılığı, estetik görünüm sunması, hijyenik özellikleri ve yüksek ısı toleransları sayesinde birçok sektörde önemli yer tuttuğu vurgulanmıştır. Bu çalışma, emaye teknolojisinin geçmişten günümüze evrimini özetleyen temel bir kaynak niteliği taşımaktadır.

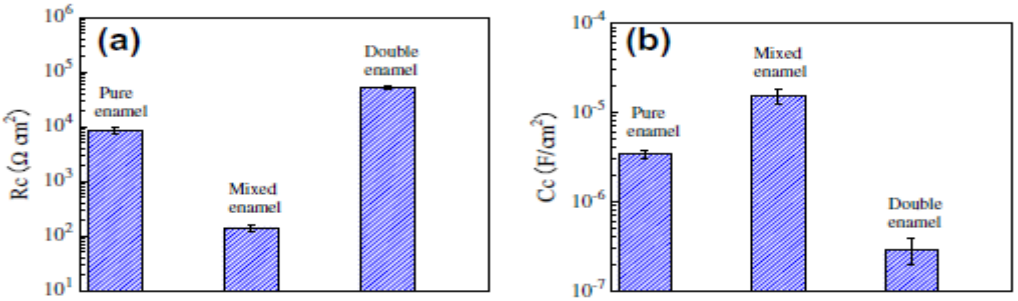
Tang ve arkadaşları (2012) tarafından yapılan araştırma, emaye kaplamaların betonarme donatı çeliği üzerindeki korozyon dayanımını artırma potansiyelini test etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma, özellikle altyapı inşaatlarında kullanılan çeliklerin uzun ömürlü korumasına yönelik alternatif bir yüzey kaplama çözümü sunmayı hedeflemiştir. Çalışmada saf emaye, karışık emaye ve çift kat emaye kaplamalar, donatı çeliği üzerine uygulanmış; numuneler 3,5% NaCl çözeltisinde tuz püskürtme testine tabi tutulmuştur. Ardından kaplamaların korozyon dayanımı elektrokimyasal testlerle ve mikroskobik analizlerle değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, çift kat emaye kaplamanın tek katlılara göre çok daha yüksek korozyon direnci sağladığı, ayrıca gözenek yapısının ve yüzey bütünlüğünün performansta belirleyici olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, yapı mühendisliği alanında emayenin etkin bir kaplama alternatifi olabileceğini göstermektedir. Çift kat emaye kaplamalar hem yük aktarım direnci (Rct) hem de

kaplama direnci (Rc) açısından saf ve karışık emaye kaplamalara kıyasla çok daha üstün performans göstermiştir (Tang, 2012). Bu durum, kaplamanın daha az gözenekli yapısıyla oksijen difüzyonunu engelleyerek korozyon sürecini yavaşlattığını göstermektedir (bkz. Şekil 2.7 ve Şekil 2.8).



(a) çözeltinin direnci (Rs) (b) yük aktarım direnci (Rct) (c) çift katmanlı kapasitans (Cdl)

Şekil.3.7. Farklı emaye kaplama türlerinin elektrokimyasal korozyon parametreleri (Tang, 2012).



(a) kaplama direnci (Rc) (b) kaplama kapasitansı (Cc)

Şekil 3.8. Emaye kaplamaların dielektrik özelliklerinin karşılaştırılması (Tang, 2012).

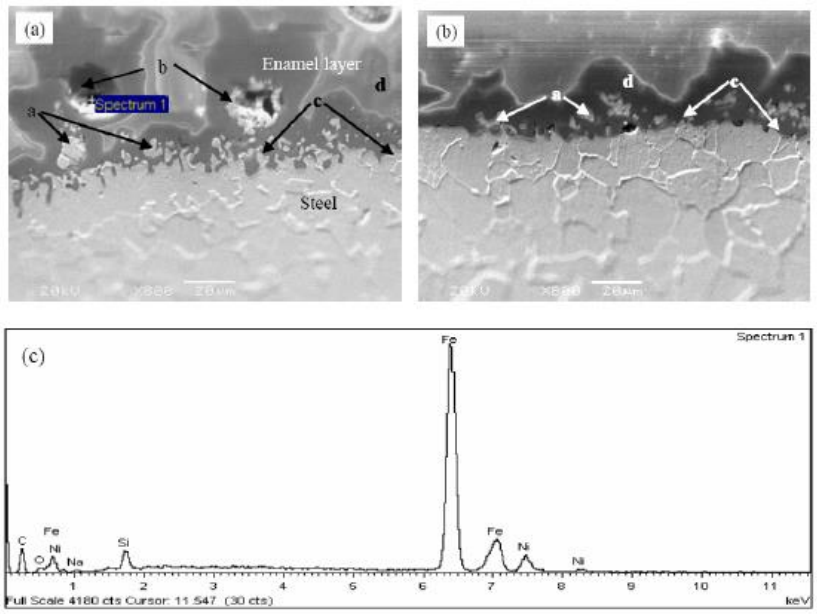
Şekil 3.7 ve 3.8'de sunulan verilere göre, çift emaye kaplamaların çözeltiden kaynaklanan elektriksel geçişlere karşı daha yüksek direnç sunduğu ve daha düşük kapasitans değerleriyle pasif koruma davranışı sergilediği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, altyapı uygulamalarında çift kat emayenin etkin bir bariyer sistemi olarak kullanılabileceğini güçlü biçimde desteklemektedir.

3.7. Emaye Kaplamanın Taban Malzeme ile İlişkisi

Işıksaçan (2020) tarafından yapılan tez çalışması, emaye kaplamaların taban malzeme ile olan difüzyon mekanizmalarını inceleyerek, düşük metal migrasyonuna sahip emaye formülasyonları geliştirmeyi hedeflemektedir. Çalışmada, farklı emaye formülasyonları hazırlanarak çelik yüzeylere uygulanmış ve pişirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Elde

edilen kaplamalar, mikroyapı analizleri ve difüzyon testleri ile değerlendirilmiştir. Ayrıca, metal migrasyonu ölçümleri yapılarak emaye kaplamaların performansı analiz edilmiştir. Araştırma sonucunda, belirli emaye formülasyonlarının çelik yüzeylerle daha iyi bir difüzyon uyumu gösterdiği ve metal migrasyonunun minimize edildiği tespit edilmiştir. Bu bulgular, özellikle gıda ile temas eden ürünlerde kullanılacak emaye kaplamaların geliştirilmesi açısından önemlidir.

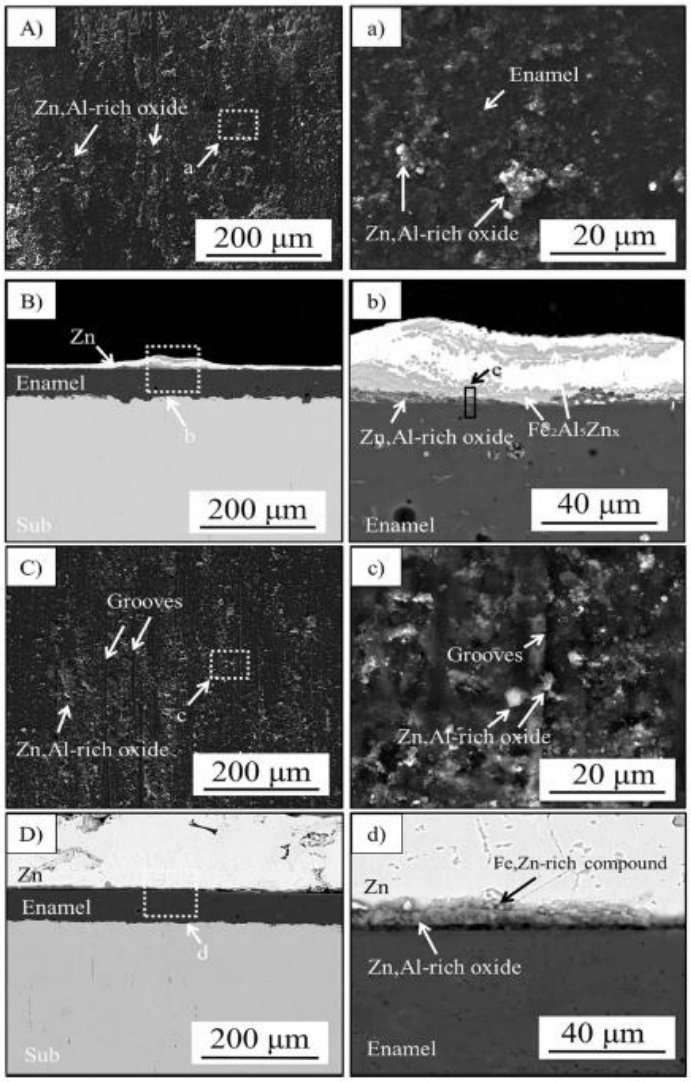
Zhang ve arkadaşları (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada farklı kompozisyonlara sahip düşük karbonlu çelik alt tabakaya camsı emayenin mikro yapısı ve yapışması optik mikroskopi, taramalı elektron mikroskobu ve eğme testi yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Kabarcıkların durumu, balık pulu direnci ve yapışma mukavemeti de mikroskobik yöntemlerle analiz edilmiştir. Sonuçlar, iki çelik için emaye katmanlarının mikro yapılarının benzer olduğunu, ancak çeliğe titanyum ve vanadyum eklenmesinin yapışmayı azalttığını göstermektedir. Emaye-çelik arayüz yapışmasının mekanizması, esas olarak bir dizi kimyasal reaksiyonun ardından oluşan mekanik kilitleme, kimyasal bağlanma olarak açıklanabilir. QB ve TB çeliklerinin emaye kaplamalı yüzeylerinde gözlemlenen arayüz mikroyapısı. QB çeliğinde 'anchor point' adı verilen mekanik kilitlenme yapıları yoğun biçimde bulunurken; TB çeliğinde yüzeyde gaz kabarcıkları ve düz geçişler gözlemlenmiştir. Bu farklar, özellikle TB çeliğine ilave edilen Ti ve V elementlerinin etkisiyle açıklanmaktadır (Şekil 2.9), (Zhang ve diğ., 2011).



Şekil 3.9. Emaye–çelik arayüz morfolojisi (Zhang ve diğ., 2011).

Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, QB çeliğinde camsı emaye tabakanın çelik yüzeye güçlü bir şekilde mekanik olarak kilitlendiği, TB çeliğinde ise titanyum ve vanadyum katkısı nedeniyle arayüzde gaz boşlukları ve düzgün geçişli yapılar oluştuğu gözlenmiştir. Bu durum, emaye–çelik yapışmasının hem mikroyapısal hem de kimyasal temelli olduğunu ortaya koymakta ve katkı elementlerinin bu süreci olumsuz yönde etkileyebileceğini göstermektedir.

Yu ve çalışma arkadaşları (2021) tarafından yapılan çalışma, yüksek sıcaklıktaki sıvı çinko ortamlarında emaye kaplamaların tribo-korozyon performansını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10. Erimiş Zn–0.2Al alaşımında 460 °C'de aşınma sonrası emaye kaplamanın yüzey morfolojisi (A, C) ve kesitsel mikroyapısı (B, D): (A, B) 6000 döngü ve (C, D) 30.000 döngü (Yu, 2021)

Çalışma kapsamında, emaye kaplamaların WC-12Co gibi geleneksel kaplama alternatiflerine kıyasla eriyik metal ortamlarda ne derece dayanıklı olduğu karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Araştırmada, WC-12Co ve emaye kaplamalar sırasıyla 460 °C erimiş çinko ve 640 °C Zn–55Al alaşımı içerisinde test edilmiştir. Aşınma davranışı, mikroyapı bütünlüğü ve difüzyon etkileri SEM, XRD ve optik mikroskopi ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, emaye kaplamanın WC-12Co'ya kıyasla çinko difüzyonuna daha dirençli olduğunu, yüzeyinde koruyucu $CaAl_4O_7$ tabakası oluşturarak yapısal bütünlüğünü koruduğunu göstermiştir. Bu bulgular, emayenin yüksek sıcaklıklı erimiş metal ortamları için uygun kaplama alternatifi olabileceğini göstermiştir.

Şekil 3.10'da görüldüğü gibi, yüksek sıcaklıkta erimiş çinko ortamlarında test edilen emaye kaplamalarda CaF_2 ve $CaAl_2Si_2O_8$ gibi oksit fazlarının yüzeyde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bu fazlar, sürtünme sırasında kendinden yağlamalı bir tribo-film oluşturmakta ve aşınmaya karşı etkili bir bariyer sağlamaktadır. Özellikle $CaAl_4O_7$ yapısına dönüşen bu tabaka, Zn difüzyonunu engellemiş ve kaplamanın yapısal bütünlüğünü muhafaza etmiştir. Bu sonuçlar, emaye kaplamanın WC-12Co kompozit kaplamaya kıyasla daha kararlı ve koruyucu bir davranış sergilediğini ortaya koymuştur

Deng, Liang, Guo, Gui ve Zhao (2023) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma, desülfürizasyon sonrası baca gazı ortamında emaye kaplamaların düşük sıcaklıkta korozyon davranışlarını analiz etmek amacıyla yapılmıştır. Çalışmanın temel hedefi, maliyeti yüksek nikel bazlı alaşımların yerine, daha ekonomik bir seçenek olan emaye kaplamaların bu zorlu kimyasal ortamlarda dayanıklılığını ve başarısızlık mekanizmalarını ortaya koymaktır. Araştırma, Çin'de bulunan 97 MW kapasiteli kömür yakıtlı sıcak su kazanı sistemine bağlı baca hattında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği; flanş plakası, paslanmaz çelik borular ve üç farklı türde (3080, 60082, 60086) emaye kaplı test numunelerinden oluşmaktadır. Numuneler farklı sürelerle (3 hafta ve 6 hafta) baca gazı ortamına maruz bırakılmış; test sonunda yüzey ve kesit analizleri yapılmıştır. Kullanılan analiz yöntemleri arasında SEM–EDS, XRD, AFM, optik mikroskopi, iyon kromatografisi ve korozyon hız ölçümü yer almıştır. Sonuçlar, baca gazı içerisinde bulunan Cl^- iyonlarının ve pH değeri 4.12 olan asidik sıvı filmin, emaye kaplamanın bozulmasına neden olduğunu göstermiştir. Özellikle alkali metal içeriği yüksek olan 60086 numunesinde korozyon oranı daha yüksek bulunmuştur. En ciddi korozyon ise

60082 numunesinde görülmüş, bu numunenin yüksek Zr içeriğinin mikroyapısal düzensizlik oluşturduğu tespit edilmiştir. 6 hafta sonunda en düşük korozyon oranı 60086, ardından 3080 ve 60082 olarak sıralanmıştır. Korozyon sürecinde emaye tabakasının iç yapısında önce metal iyonlarının ayrıştığı, ardından H^+ iyonlarıyla reaksiyona girerek gözenekli SiO_2 yapısının oluştuğu ve çatlamaların oluştuğu gözlemlenmiştir. Araştırmanın en önemli bulgularından biri, kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü gibi fiziksel parametrelerin, korozyonun lokalize olarak başladığı bölgeleri doğrudan etkilediğidir. Özellikle keskin dönüş noktalarında kalınlığın 30 μm'ye düşmesi, bu alanları zayıf noktalar hâline getirmiştir. Ayrıca karbon çelik altlıkta oksijen tüketimli korozyon sürecinin, emaye tabakasının altından genişleyerek yapıyı zayıflattığı görülmüştür.

2.8. Emaye Kaplamanın Performansı

Rossi ve Scrinzi (2010) tarafından yürütülen çalışma, çelik üzerine uygulanmış emaye kaplamaların estetik ve fonksiyonel özelliklerini bütünsel olarak değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada hem kimyasal hem de mekanik dayanım testleri yapılarak emaye kaplamanın performansı çok boyutlu olarak ele alınmıştır. Araştırmada, farklı emaye kaplama örnekleri üzerinde asit ve alkali dayanım testleri (ASTM C282, C614), UV yaşlandırma (ASTM G154), aşındırıcı test (ASTM D968) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) gerçekleştirilmiştir. Ek olarak AFM, ESEM, renk ve parlaklık ölçümleri ile yüzey karakterizasyonu yapılmıştır. Sonuçlar, emaye kaplamaların UV'ye, kimyasallara ve fiziksel aşınmalara karşı yüksek dayanım gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü ile parlaklık kaybı arasında doğrudan bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Böylece kaplamanın estetik performansının yüzey morfolojisiyle bağlantısı net biçimde ortaya konmuştur.

Tang, Chen, Brow ve Koenigstein (2017) tarafından yapılan çalışma, çelik boruların iç yüzeylerine uygulanan emaye kaplamaların korozyon direncini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Araştırmada, emaye kaplamaların çelik yüzeylere yapışma özellikleri, mikroyapıları ve korozyon performansları detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmada, çelik boruların iç yüzeylerine emaye kaplamalar uygulanmış ve bu kaplamaların mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir. Ayrıca, kaplamaların korozyon dirençleri elektrokimyasal testlerle değerlendirilmiştir. Araştırma sonuçları, emaye

kaplamaların çelik boruların iç yüzeylerinde yüksek korozyon direnci sağladığını göstermektedir. Kaplamaların homojenliği ve çelik yüzeye olan yapışma kalitesi, korozyon koruma performansını doğrudan etkilemektedir. Mikroyapı analizleri, kaplama ve çelik arasındaki arayüzeyde oluşan yapının korozyon direncine katkıda bulunduğunu ortaya koymuştur.

Rossi, Russo ve Calovi (2021) tarafından yapılan derleme; camsı emaye kaplamaların aşınma, kimyasal maddeler ve korozyona karşı dayanıklılık özelliklerini kapsamlı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışma, emaye kaplamaların üretim teknolojilerini tanıtarak, dayanıklılıklarını etkileyen temel özellikleri sunmaktadır. Yazarlar, mevcut literatürü tarayarak emaye kaplamaların dayanıklılığını etkileyen faktörleri analiz etmişlerdir. Bu kapsamda, aşınma direncini artırmaya yönelik çalışmalar, kimyasal maddelere karşı direnç ve korozyon koruma özellikleri ele alınmıştır. Ayrıca, emaye kaplamaların üretim süreçleri ve kullanılan malzemelerin özellikleri de değerlendirilmiştir. Araştırma sonucunda;

- Aşınma Direnci: Emaye kaplamalar yüksek sertliğe sahip olmalarına rağmen, camsı matrisin düşük kırılma tokluğu nedeniyle aşınmaya karşı sınırlı direnç göstermektedir. Aşınma direncini artırmak için frit bileşiminin değiştirilmesi, öğütme katkı maddelerinin eklenmesi ve sert partiküllerin (örneğin, tungsten karbür) ilavesi gibi yöntemler incelenmiştir.
- Kimyasal Direnç: Emaye kaplamalar asidik kimyasallara karşı iyi direnç gösterirken, alkali çözeltilere karşı daha hassastır. Alkali direncini artırmak için frit bileşimine alümina, zirkonya ve kuvars gibi maddelerin eklenmesi önerilmektedir.
- Korozyon Koruması: Emaye kaplamalar, metal alt tabakaları agresif maddelere karşı koruyan yüksek bariyer etkisi sağlar. Kaplamanın bütünlüğü ve mikroyapısı, korozyon koruma performansını doğrudan etkilemektedir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) gibi teknikler, kaplamanın korozyon direncini değerlendirmek için kullanılmaktadır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Malzemeler ve Metotlar

4.1.1. Emaye Kaplama İşleminde Kullanılacak Saclar ve Karakterizasyonları

4.1.1.1. 0,50mm ve 0,70mm DC04EK ve DC04ED Kalite Sacların Hazırlanması

Emaye kaplama işlemleri için DC04EK ve DC04ED kalite 0,50mm ve 0,70mm kalınlıklarda saclar kullanılmıştır. DC04EK kalite saclar Yıldız Demir çelik A.Ş firması üretiminden alınmıştır. DC04ED kalite saclar ise sektör firmalarından biri olan A firmasından tedarik edilmiştir. Emaye kaplama işlemi için sac numuneleri Şekil 4.1' de belirtilen giyotin makasında Şekil 2' de gösterildiği gibi 10cm×10cm boyutlarında kesilerek saclar hazırlanmıştır.



Şekil 4.1. Saymak VRGM 2060X4 model giyotin makası



Şekil 4.2. Giyotin makasta 10cm×10cm boyutlarında kesilen sac numuneleri

Emaye kaplama kalitesinin sağlanması için emaye kaplama öncesi sac yüzeyinin iyi temizlenmiş olması gerekmektedir. Emaye kaplamada kullanılan emaye kalite saclar soğuk haddeleme ile şekil verilerek üretilmektedir. Bu üretim esnasında, yüzeyi pastan korumak için anti-korozyon etki gösteren koruyucu yağlar yüzeye uygulanmaktadır. Şekil verme işleminde yüzeye uygulanan yağların ve metal parçacıklarının yüzeyden temizlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla köpüğü kontrollü; pH değeri %1' lik çözeltisinde 9-11 arasında olan, ağır yağ ve kir temizleme özelliğine ve etkin bir şekilde manuel olarak da temizleyebilme özelliğine sahip, bileşiminde %5±2 KOH, %5-15 noniyonik aktif madde içeren Şekil 4.3' te gösterilen "Peva Turbo" marka bir temizleme kimyasalı kullanılmış ve sac yüzeyi kir ve yağdan arındırılmıştır.



Şekil 4.3. Alkali yağ alma kimyasalı ile sac yüzeyinin temizlenmesi

Sac numunelerinin alt ve üst yüzeyi bir sünger yardımıyla kimyasal dökülüp ovalanarak iyice yıkanmış, yüzeydeki yağ ve kir temizlemiştir. Yıkama işlemi sonrası sac numuneleri, üzerindeki deterjanın durulanması için 60ºC-70ºC' deki sıcak suda yıkanmıştır. Durulama işleminde sıcak su kullanılmıştır. Bunun nedeni yüzeydeki yağ ve kirin tamamen temizlenmesini sağlamaktır. Aksi taktirde yüzeyde yeterinde temizleme sağlanamadığından, emayeleme işleminde sac yüzeye yeterince yapışamayarak emayeleme sonrası yüzeyde hatalar meydana getirir. Bu nedenle önce sıcak su ile durulama, sonra soğuk su ile durulama yapılır. Metalin yüzeyi alkali temizlemeden sonra kontrol edilir, tam ıslanmış olarak bir görüntü yok ve yıkama suyu dalgalı görülürse yağ gidermenin yeterinde yapılmadığı görülür. Bir kez daha aynı işlemler tekrar edilir ve yıkama sırasında su dalgalanma olmadan yüzeyden akıyorsa iyi bir temizleme yapıldığı

anlaşılır ve durulama işlemi tamamlanır. Temizleme sonrası sac numuneleri hava ile kurutulur.

4.1.1.2. DC04EK ve DC04ED Kalite Sacların Kimyasal ve Mekanik Özellikleri

Sacların emaye kaplama işlemlerinde en önemli etkenler; kullanılan sacın kimyasal bileşiminin uygun olması, derin şekillenebilirlik ve yüksek mukavemet için mekanik özelliklerinin istenilen düzeyde olması, emayenin saca yapışmasının iyi olabilmesi için yüzey temizleme işleminin uygun şartlarda ve yeterli yapılması, yüzey pürüzlülüğünün uygun olması, emayenin uygun sıcaklıkta pişirilmesidir.

Emaye kaplama işleminde kullanılacak sacın karbon miktarının minimum seviyede olması gerekmektedir. Karbon miktarı yüksek ise emaye kaplama üzerinde karbon kaynaması, kabarcık, balık pulu gibi hatalar meydana gelebilir. Karbon miktarı yüksek malzeme kullanılması durumunda sacın mukavemeti artar fakat sacın şekillendirilebilirliği azalır, pişirme sırasında malzemenin yüzeyindeki veya sacın içindeki küme karbürler oksitlenerek sacta kaynama meydana getirmektedir. Sacın bileşiminde Mangan elementinin miktarının fazla olması pişme sırasında emayede atmalara yapışmada zafiyete neden olmaktadır. Mangan elementi MnS şeklinde kullanıldığında ve düşük miktarda olduğunda balık pulu hatasının görülme olasılığı azalmaktadır. Alüminyum miktarının yüzey hatalarına sebebiyet vermemesi için düşük oranda, silisyum miktarının emayenin saca yapışmasında problem yaratmaması için düşük oranda olması gerekmektedir.

Emaye çelikleri için TS EN 10209 standardı kullanılmaktadır. Bu standartta Tablo 4.1' de belirtildiği gibi çelik kaliteleri için mekanik ve kimyasal özellikler ve olması gereken değerler açıklanmıştır. Çelik kaliteleri standartta EK ve ED olarak belirtilmiştir. EK konvansiyonel emaye kaplamaya uygun çeliği temsil ederken; ED kaliteler direk emayelemeye uygun çelikleri temsil eder. ED kaliteler çift kat tek pişirim ve çift kat çift pişirim emaye kaplamalara uygundur. DC kısaltması soğuk haddelenmiş yassı mamulü temsil eder. 01, 03, 04, 05 ve 06 değerleri arttıkça şekillendirilebilirlik özelliği artar.

Tablo 4.1. DIN EN 10209 standardına göre emaye çeliklerinin özellikleri

EN 10027-1'e uygun kısa gösteriliş	EN 10027-2'ye uygun kısa gösteriliş	Oksijen giderme (Deoksidasyon) yöntemi	Mekanik özelliklerin geçerliliği ve lüders bantları olmaması	R_e MPa max [b c]	R_m MPa	A_{80} % min [d]	r_{90} min [e]	Kimyasal bileşim (pota analizi) % max					C içeriği (mamul analizi) % max
								C	Ti	Mn	P	S	
DC01EK	1.0390	Tam giderilmiş [f]	6 ay [f]	270	270/390	30		0,07		0,60	0,045	0,050	
DC04EK	1.0392	Tam giderilmiş	6 ay	220 [k]	270/350	36		0,06		0,50	0,030	0,050	
DC05EK	1.0386	Tam giderilmiş	6 ay	220 [k]	270/350	36	1,7	0,06		0,50	0,025	0,050	
DC06EK	1.0869	Tam giderilmiş	6 ay	190	270/350	38	1,8	0,02	0,15 h	0,50	0,020	0,050	
DC07EK	1.9350	Tam giderilmiş	6 ay	170	270/350	40	2,0	0,02	0,15 h	0,50	0,020	0,050	
DC03ED	1.0399	Tam giderilmiş [f]	6 ay [f]	240	270/370	34		j		0,40	0,035	0,050	0,004
DC04ED	1.0394	Tam giderilmiş	6 ay	210 [g]	270/350	38		j		0,40	0,030	0,050	0,004
DC06ED	1.0872	Tam giderilmiş	6 ay	190	270/350	38	1,8	0,02	0,15 [h]	0,35	0,020	0,050	

[a] Mekanik özellikler yalnızca temper haddesinden geçirilmiş mamullere uygulanır. Mekanik özellik değerleri dikey deney yönünü ifade eder.

[b] Akma gerilimi değeri, tam bir akma noktası sunmayan mamuller için Rp % 0,2 ve diğerleri için daha düşük akma gerilimidir (Rel,). Kalınlık 0,7 mm'ye eşit veya küçük olduğunda ve 0,5 mm'den büyük olduğunda akma gerilimi değeri 20 MPa artırılır. 0,5 mm veya daha küçük kalınlıklar için değer 40 MPa artırılır.

[c] Şekillendirme amacıyla, DC01EK, DC04EK, DC05EK, DC03ED ve DC04ED kaliteleri için Re alt sınırı 140 MPa, DC06EK ve DC06ED kaliteleri için 120 MPa ve DC07EK kalitesi için 90 MPa olarak kabul edilebilir.

[d] Kalınlık 0,7 mm veya daha küçük ve 0,5 mm'den büyük olduğunda kırılma sonrası minimum uzama değeri 2 birim azalır. 0,5 mm'ye eşit veya daha az kalınlıklar için minimum değer 4 birim azaltılır.

[e] Minimum r değeri yalnızca kalınlığı 0,5 mm'ye eşit veya daha büyük olan mamuller için geçerlidir. Kalınlık 2,0 mm'nin üzerine çıktığında minimum r değeri 0,2 birim azaltılır.

[f] Sipariş sırasındaki anlaşmaya bağlı olarak diğer deoksidasyon yöntemleri kullanılabilir. Bu durumda, mekanik özelliklerin geçerlilik süreleri ve lüder bantları izlerinin bulunmaması, sipariş sırasında kararlaştırılacaktır.

[g] Kalınlık 1,5 mm'ye eşit veya daha büyükse akma geriliminin maksimum değeri 225 MPa'ya ulaşabilir.

[h] Sipariş sırasında kararlaştırıldığı takdirde titanyum niyobyum ile değiştirilebilir. Karbon ve nitrojen tamamen bağlı olacaktır.

[i] Sipariş sırasındaki anlaşmaya bağlı olarak, aynı mekanik özelliklere sahip başka çelikler de tedarik edilebilir. Bu durumda, bu çeliklerin kimyasal bileşimi sipariş sırasında kararlaştırılacaktır.

[j] DC03ED ve DC04ED kalitelerinin dekarbürizasyonu katı veya sıvı fazda gerçekleşebilir. Karbon giderme sonrasında mamul analiziyle belirlenen karbon içeriği maksimum %0,004 olacaktır. Sipariş sırasında kararlaştırıldığı takdirde DC03ED ve DC04ED kaliteleri örneğin titanyum, niyobyum veya bor içerebilir.

[k] Alıcının talebi üzerine DC04EK ve DC05EK kaliteleri 0,7 mm'den 1,5 mm'ye kadar kalınlıklarda Re ≤ 210 MPa ve A80 ≥ %38 olarak temin edilebilir. Bu nedenle, normal pürüzlülük seçenekleri aralığında yüzey pürüzlülüğünü seçmek imalatçının sorumluluğundadır.

*EK: Konvansiyonel emaye kaplamaya uygun çelik

*ED: Direkt emaye kaplamaya uygun çelik

- Müşteri talebine istinaden sac kalınlığı $0.7 \geq t \leq 1.5$ mm aralığında olduğunda akma dayanımı ≤210 MPa ve toplam kopma uzaması ≥%38 şartlarında olmalıdır.
- t≥1,5 mm ise akma dayanımı maximum 225 MPa olmalıdır.
- DC03ED ve DC04ED kalite sacların dekarbürizasyondan sonraki %C değeri maximum 0,004 olmalıdır.

Emaye kalite saclarda aranan özellikler aşağıdaki gibi olmalıdır:

1. Sac yüzeyindeki yağ ve kir tabakası iyi temizlenmiş olmalı iyi bir durulama işlemi yapılmış olmalıdır.
2. Sacın içeriğinde cüruf vb. zararlı ve yüzey kusuruna sebebiyet verecek yapışma zafiyeti yaratacak atıklar olmamalıdır.
3. Şekil vermeye ve derin çekmeye uygun olmalıdır.
4. Kaynaklanabilir özellikte olmalıdır.
5. Karbon içeriği düşük olmalıdır. Al içermemelidir.

DC04EK ve DC04ED Kalite Sacların Kimyasal Analizlerinin Yapılışı: Sacların kimyasal analizinde Şekil 4.4' te belirtilen Specrolab M12 hybrid marka OES (Optik Emüsyon Spektroskopi) cihazı kullanılmıştır.

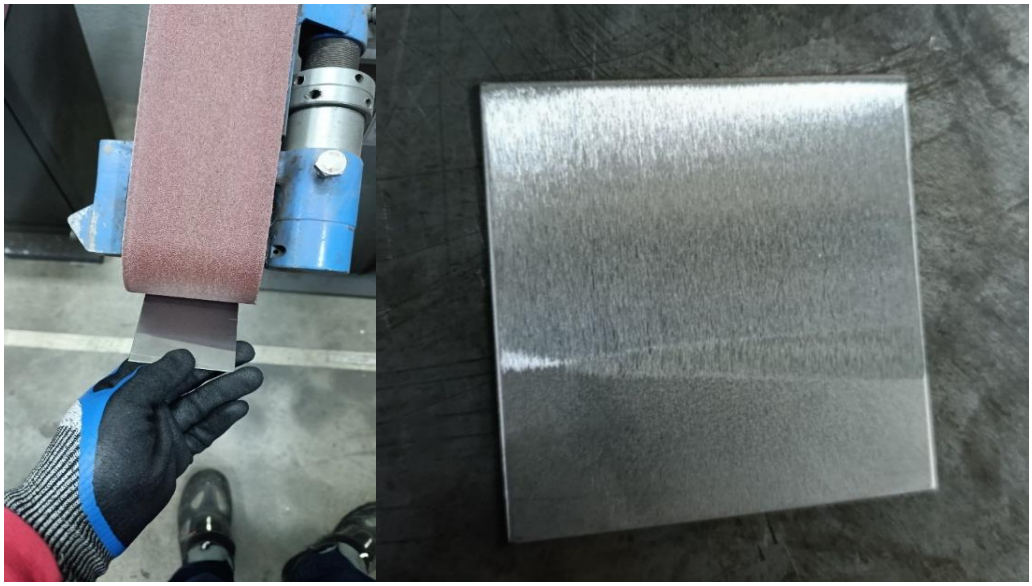
Optik emisyon spektrometresi (OES) özellikle metallerin niteliksel ve niceliksel karakterizasyonunda kullanılan bir tekniktir. Bu teknik, her elementin ısıtıldığında belirli frekanslarda karakteristik spektral çizgiler yayması prensibine dayanmaktadır. OES'lerde uyarma iki elektrot (metal ya da grafit elektrotlar) arasında gerçekleştirilen akım darbesi (spark) veya elektrik boşalımı (ark) ile sağlanır.

Bu şekilde elde edilen spektral çizgilerin büyük kısmı mor ötesi (UV) aralığında bulunmaktadır. Bu çizgilerin birbirlerinden ayırt edilebilmesi için ızgara reflektör kullanılır ve çizgilerin şiddetleri CCD (charge coupled device) sensörler kullanılarak ölçülür. Bu sayede numune içerisinde bulunan elementler ve bu elementlerin yüzde miktarları tespit edilir. Optik emisyon spektrometre cihazı ile numunenin üç farklı bölgesinden yakma işlemi yapılarak 26 adet elementin analizi gerçekleştirilir.

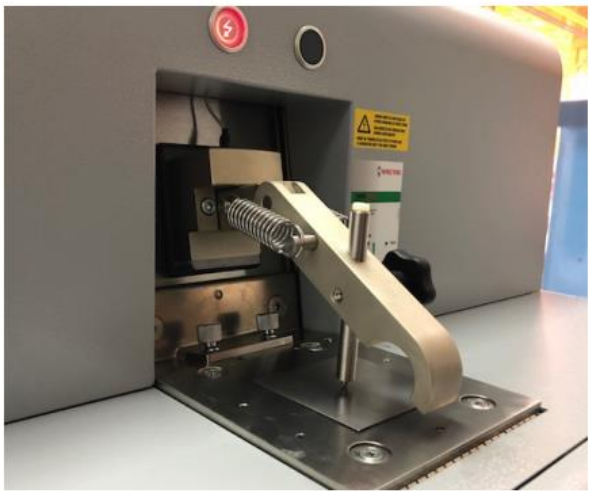


Şekil 4.4. Specrolab M12 hybrid marka OES (Optik emüsyon spektroskopi) cihazı

Kimyasal analiz öncesi sac numuneleri Şekil 4.5’ te gösterilen 80kum zımparalı Zımpara Makinasında zımpara yapılarak yüzeyi metal ve demir tozlarından, kirden arındırılarak Şekil 4.5’ te gösterildiği gibi homojen ve düz hale getirilir. Zımpara esnasında sacta ısınma meydana gelir. Bu nedenle numunenin soğuması beklenir. Soğuduktan sonra OES cihazının yakma bölgesine sac numunesi yerleştirilerek Şekil 4.7’ de belirtildiği gibi en az 3 adet yakma işlemi yapılır ve çıkan sonucun ortalamasını cihaz % cinsinden verir.



Şekil 4.5. Zımparalama İşlemi ve zımpara sonrası sac yüzeyi görüntüsü



Şekil 4.6. OES ile kimyasal analiz



Şekil 4.7. Kimyasal analiz sonrası numunenin görüntüsü

DC04EK ve DC04ED Kalite Sacların Mekanik Testlerinin Yapılışı: Malzemelerin mekanik yükler altındaki davranışlarına "Mekanik özellikler" adı verilir. Metallerin mekanik özellikleri farklı yükler altında, farklı deney örnekleri ile incelenip değerlendirilir. Burada önemli olan değerlendirme kriterleri yük altında malzemenin şekil değiştirme kaabiliyetinin ve malzeme dayanımının yüksek olmasıdır. Bu amaçla malzemelere "Çekme Testi" uygulanmaktadır. Çekme deneyinin amacı; malzemelerin statik yük altındaki elastik ve plastik davranışlarını belirlemektir. Çekme testi, bir malzemenin kuvvet altında davranışını ve mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılan test metodudur. Test bitiminde cihaz tarafından akma dayanımı, çekme dayanımı ve uzama miktarı grafiksel ve değersel olarak cihazdan alınmaktadır.

Çekme testlerinde şekillendirme özelliklerinin karakterizasyonu için r ve n değerleri belirlenir. r değeri (dikey anizotropi katsayısı) malzemenin incelmeye karşı direncini, n değeri (deformasyon sertleşmesi, pekleşme üssü) malzemenin sertleşme kabiliyetini gösterir.

Derin çekme kabiliyetini etkileyen en önemli mekanik özellik r değeridir. r değeri büyüdükçe malzemenin derin çekilebilirliği artar.

n değeri ise deformasyon altında malzemenin sertleşme kabiliyetini gösterir. Bir malzemeye çekme yoluyla yerel büzülme olmadan üniform olarak şekil verilebilecek üst sınırı belirler. Eğri ne kadar dik yükselirse, malzeme deformasyon altında o kadar sertleşir.

Çekme deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler

Elastik bölgede tespit edilen mekanik özellikler;

- Elastik modülü
- Poission oranı
- Rezilyans modülü
- Akma mukavemeti

Plastik bölgede tespit edilen mekanik özellikler;

- Çekme mukavemeti
- Kopma mukavemeti
- Yüzde (%) uzama
- Yüzde (%) kesit daralması

Elastik ve plastik bölgede tespit edilen mekanik özellikler;

- Tokluk (TS EN ISO 6892-1)

DC04EK ve DC04ED kalite sacların mekanik özelliklerini belirlemek için TS EN ISO 6892-1 standardına göre 23±5 °C sıcaklıkta Zwick Royel marka 50kN kapasiteli cihazda Çekme Testi yapılmıştır. Çekme testi sonucunda sacın Akma dayanımı (R_e), Çekme

dayanımı (R_m), Yüzde Uzama (A%), Gerinme Sertleşme Miktarı (n), Plastik Gerinme Miktarı (r) değerleri okunur.

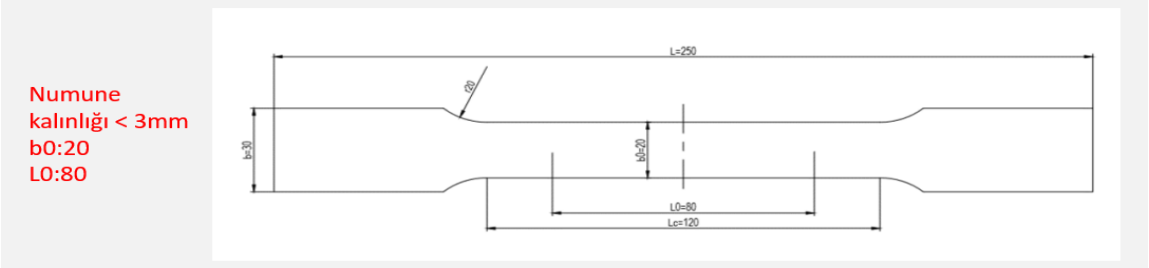
DC04EK ve DC04ED kalite 0,50mm ve 0,70mm kalınlıktaki sac numuneleri hadde yönüne dik ve kenarlardan 50mm içerde olacak şekilde TS EN ISO 6892-1 standardı Ek-B Çizelge-1 de açıklanan ve Şekil 4.9' da belirtilen, L_0=80 mm, b_0=20 mm olacak şekilde pres kalıbında kemik numune haline getirilerek çekme testi yapılmıştır.

Pres: Kendisine bağlanan özel kalıplar yardımıyla basınç ya da darbe uygulayarak metalleri kesmeye, kıvırmaya, çekmeye ya da sıvamaya yarayan makinedir.

Kemik numune Şekil 4.8' de gösterilen 100tonluk Hidrolik Preste basılmıştır.



Şekil 4.8. 100kN' luk hidrolik pres makinası



Şekil 4.9. Çekme testi kemik numune ölçüsü

L_0 : Test parçasının ilk uzunluğu

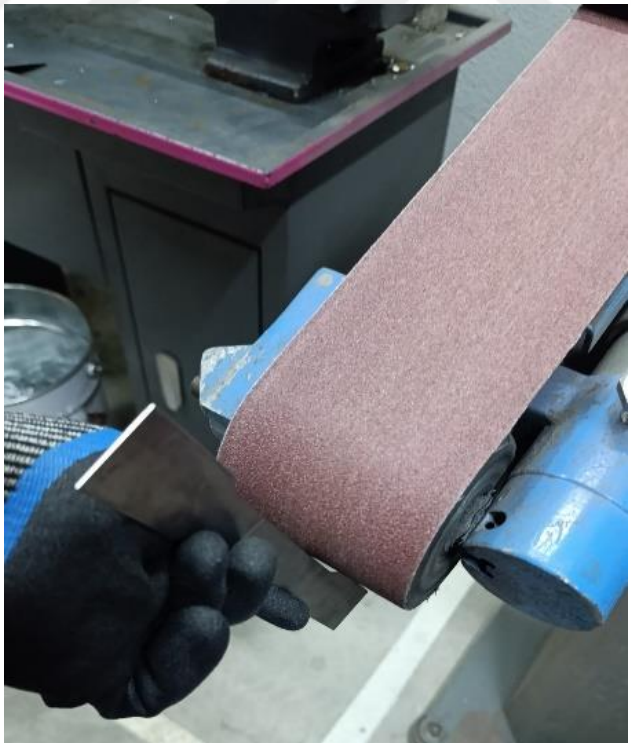
L: Test parçasının toplam uzunluğu

b_0 :Test parçasının ilk genişliği

b: Kemik numunenin kulak genişliği

r_{20}: Radüs çapı

Kemik numune pres kalıpta basılma sonucu kenarlarında çapak oluşumu meydana geliyor olup, kenarlarda oluşan çapaklar Şekil 4.10' da gösterilen 80kum zımpara bulunan zımpara makinasında alınır.



Şekil 4.10. Zımpara makinası

Radüs kısımlarında kalan çapaklar da Şekil 4.11' de gösterilen çapak alma raspası kullanılarak temizlenir.



Şekil 4.11. Çapak alma el raspası

Çapağı alınan kemik numune zımpara kaynaklı ısınmış olacağından soğuması beklenir. Soğuduktan sonra kemik numunenin kalınlığı Şekil 4.12' de gösterilen Dijital Mikrometre ile ölçülür.



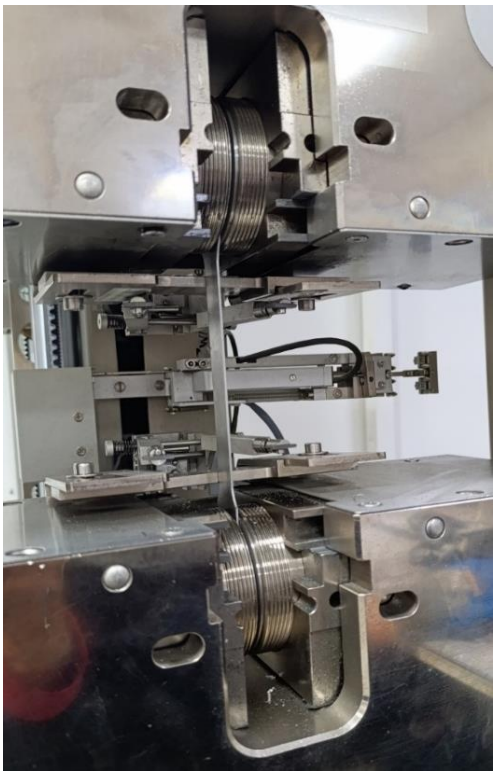
Şekil 4.12. Mutıtoyo marka dijital mikrometre ile sac kalınlığı ölçümü

Kemik numunenin genişliği Şekil 4.13’ de gösterildiği gibi Dijital Kumpas ile ölçülür.



Şekil 4.13. Mutıtoyo marka dijital kumpas ile genişlik ölçümü

Ayak Pedallarına basılarak kemik numune Şekil 4.14’ te gösterildiği gibi çenelere sıkıştırılır. Start verilerek test başlatılır.

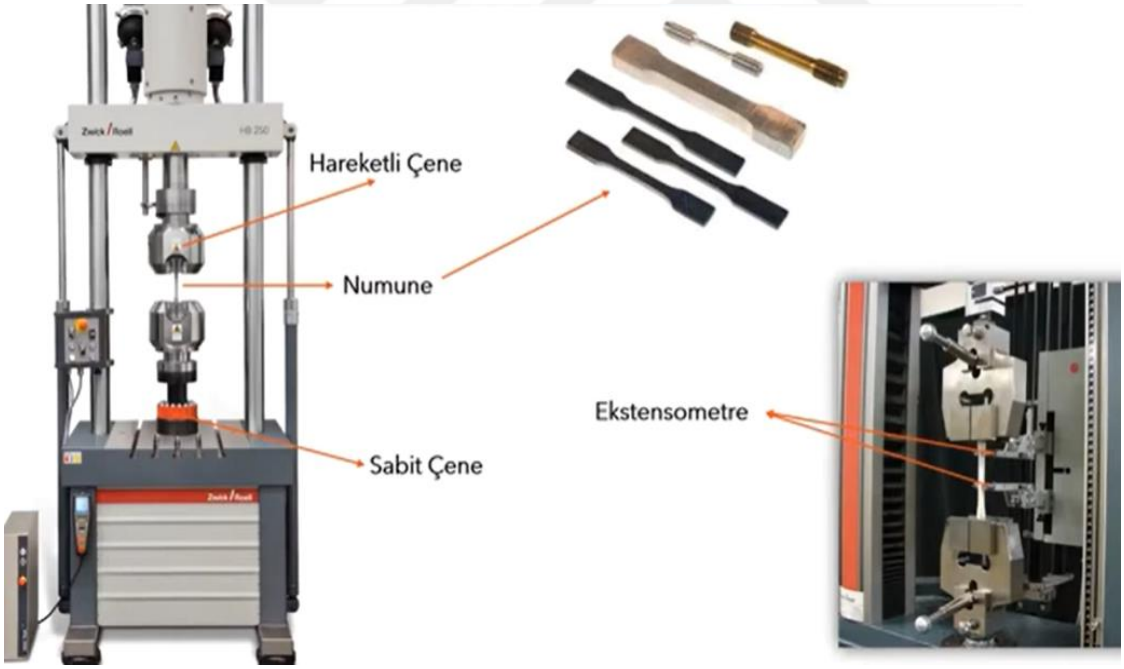


Şekil 4.14. Kemik numunenin çekme test cihazına yerleştirilmesi

Numunenin kopmasının ardından ekranda test sonuçları grafik ve tablo olarak görüntülenir.

Rp 0,2 : % 0,2 uzama mukavemeti (MPa)
ReH : Üst akma noktası (MPa)
ReL : Alt akma noktası (MPa)
Rm : Çekme mukavemeti (MPa)
A80 : 80 mm numune ölçüsünde uzama miktarı (%)
r90 : Plastik gerinme miktarı
n90 : Gerinme sertleşme miktarı
a_0: İlk kalınlık (mm)
b_0: İlk genişlik (mm)

Çekme testi Şekil 4.15' te tüm parçaları gösterilen gösterilen 50kN' luk Zwick test cihazında yapılmıştır.



Şekil 4.15. Zwick marka 50kn' luk çekme test cihazı bölgeleri

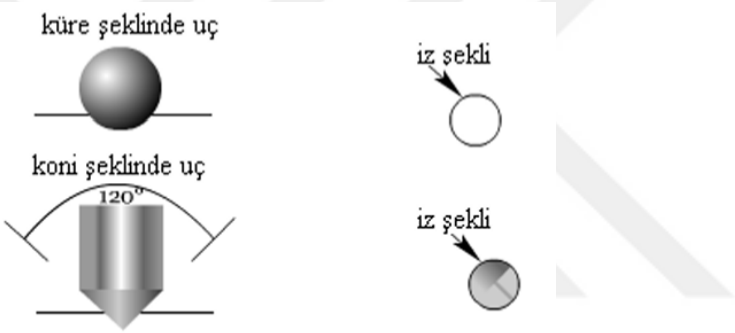
4.1.1.3. DC04EK ve DC04ED Kalite Saclarda Sertlik Ölçümünün Yapılışı

Sertlik, bir malzemenin yüzeyine batırılan sert bir cisme karşı gösterdiği dirençtir. Sertlik ölçümünde konik veya küresel uç malzemeye batırılarak malzemenin gösterdiği direnç

ölçülmektedir. Malzeme batırılan uç malzemede iz yaratır ve bu izin derinliğinden sertlik miktarı ölçülür.

Rockwell sertlik ölçme yöntemi: Bir malzemenin sertlik derecesini belirlemek için uygulanan mekanik testlerden biridir. Bu yöntemde, belirli bir yük altında malzeme yüzeyine bir uç batırılır ve bu batma derinliği ölçülerek sertlik değeri hesaplanır. Ölçümü yapılacak malzemenin cinsine ve kalınlığına göre ucu yuvarlatılmış 120° 'lik konik elmas uç veya 1/16" ve 1/8" çapında çelik bilyalar kullanılır. Rockwell deneyi için kullanılan batıcı uçlar Şekil 4.16’ da gösterilen belirli çaplarda çelik bilyalar ve konik elmas uçlardır.

Endüstride daha çok Rockwell C ve B yöntemleri kullanılır. RC yönteminde elmas konik uç, RB yönteminde çelik bilya kullanılır.



Şekil 4.16. Uç tipine göre rockwell sertlik ölçümü

Rockwell sertlik değeri Şekil 4.17’ de gösterilen daima sembol harfle birlikte belirtilir. Bu harf batıcı ucun tipini, kullanılan yükün miktarını ve kadran üzerinde okunacak bölümü belli eder.



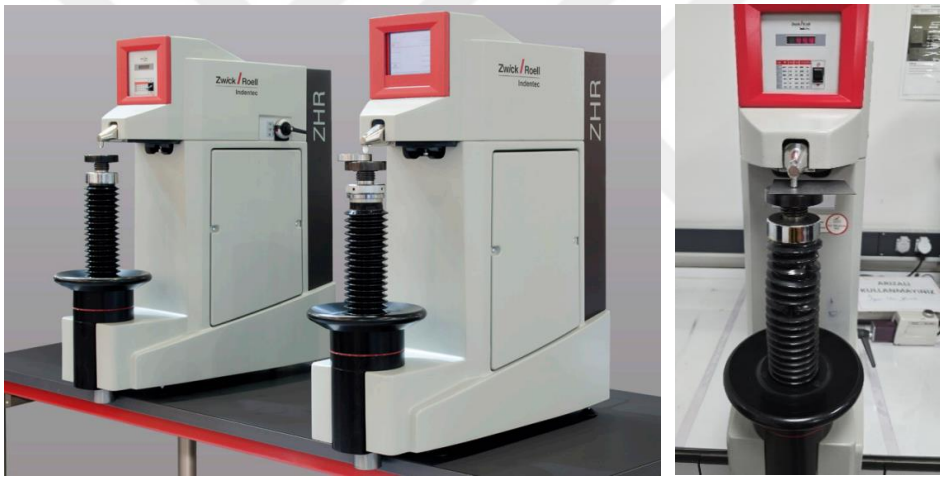
Şekil 4.17. Uç tipine göre yapılacak sertlik ölçüm skalası

Bu yöntemde batma derinliği ölçüleceği için önce batıcı uç küçük bir yükle (P_0=ön yük) malzemeye daldırılarak sıfırlanır.

- Daha sonra ana yük (P_1)uygulanır.
- Ana yük (P_1)kaldırılır.
- Meydana gelen kalıcı izdeki derinlik artışı dijital göstergeden Rockwell Sertlik değeri olarak okunur.

Sertlik ölçümü Şekil 4.18' de gösterilen cihaz kullanılarak, farklı bölgelerden 3 ölçüm alınarak yapılmaktadır. Ölçüm sonuçlarının ortalaması alınmaktadır.

Sertlik ölçüm sonucunun doğru olabilmesi için ölçüm yapılacak yüzeyin düz, çiziksiz ve temiz olması gerekmektedir.



Şekil 4.18. ZWICK BK 8150 model sertlik ölçüm cihazı

0,50mm ve 0,70mm kalınlıktaki DC04EK ve DC04ED kalite sacların sertlik ölçümleri sac kalınlığına göre seçilmiş ve bilye uca göre S modunda okutulmuş olup, 1/16″Ø bilye çapına göre 15N kuvvet altında 3 farklı noktadan ölçülmüş ve ortalamaları alınmıştır.

4.1.1.4. DC04EK ve DC04ED Kalite Saclarda Pürüzlülük Ölçümünün Yapılışı

Pürüzlülük, sac yüzeyinin grafiksel olarak profilini ölçen bir test yöntemidir. Pürüzlülük cihazının çalışma prensibi bir iğne ucunun yüzeyde ileri geri hareket ederek yüzey profili grafiksel olarak oluşturması ve bu profilin sayısal olarak ifade edilmesi esasına dayanmaktadır.

Pürüzlülük ölçümünde kullanılan parametreler Ra, Rp(Rz), Rv ve Rt' dir.

- Ra: ortalama pürüzlülüktür.
- Rp(Rz): yüzey profilinde yer alan en yüksek piktir.
- Rv: yüzey profilinde yer alan en dip piktir.
- Rt: yüzey profilinde yer alan en yüksek ve en dip pikin toplamıdır.

Pürüzlülük ölçümü düz ve titreşimsiz bir zeminde ölçüm yapılacak numunenin üzerinde uc gezdirilerek yapılır. Ölçümü yapılacak numune yüzeyinin temiz ve kuru olması gerekir, değilse bez ile silinir. Cihaz pürüzlülük ölçülecek yüzeyde, hadde yönüne dik olacak şekilde konumlandırılır. Yüzey ölçümü yapılacak numunenin en ufak titreşimden etkilenmeyeceği şekilde ölçümün yapılması gerekmektedir. Belli bir süre beklenir ve dijital ekranda okunan değer numunenin yüzey pürüzlülüğünü gösterir.

Pürüzlülük ölçümünde Şekil 4.19' da gösterilen Mitutoyo marka el tipi pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. Ölçümler alt yüzey ve üst yüzeyden ayrı ayrı yapılmıştır.



Şekil 4.19. MITUTOYO marka pürüzlülük ölçüm cihazı

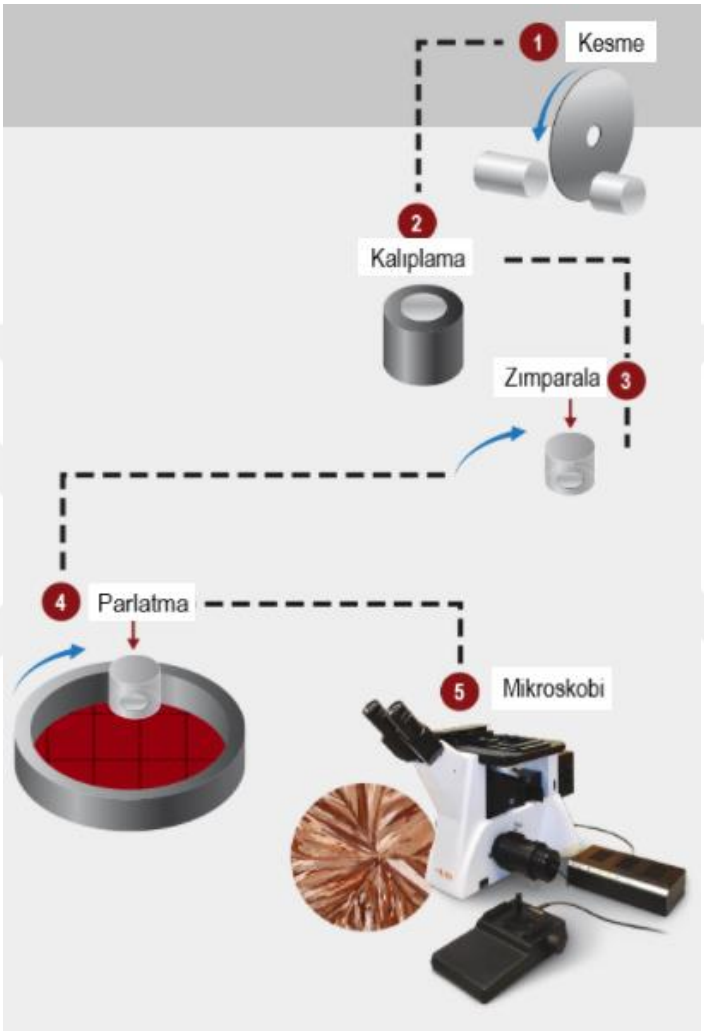
4.1.1.5. DC04EK ve DC04ED Kalite Sacların Mikroyapı Analizlerinin Yapılışı

Metalografik inceleme işlemi ASTM E 112 Standarına göre yapılmıştır. Metalografik inceleme için numuneler hazırlanmış, optik mikroskopta incelenmiş, görüntü ayarları yapılmış, tane sınırları belirlenmiş ve bu tane sınırları kullanılarak tane boyutu ölçülmüştür.

Mikroskop incelemeleri için numunenin uygun bir şekilde hazırlanması gerekmektedir. Numune hazırlama aşamaları Şekil 4.20' de belirtilmiş olup, aşağıdaki gibidir;

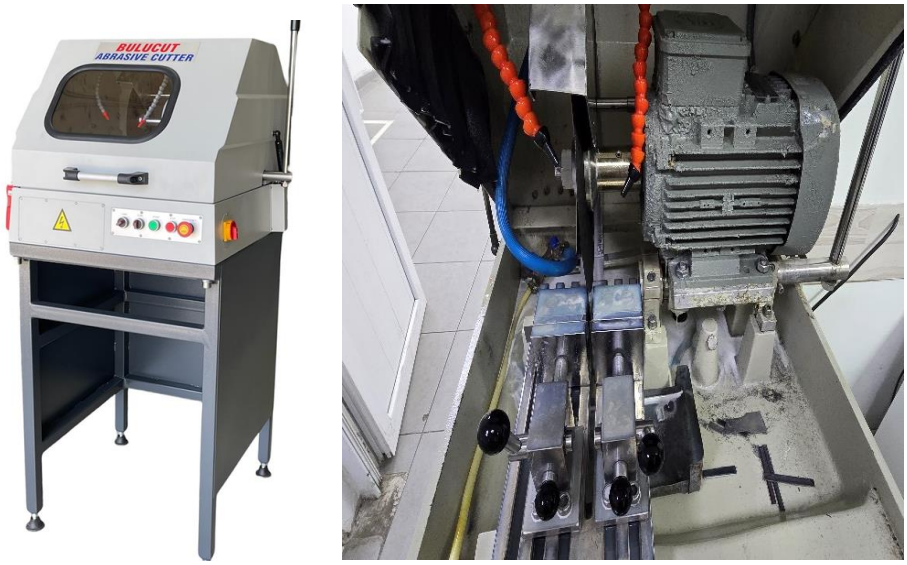
1. Kesme

2. Kalıplama (bakalite alma)
3. Zımparalama
4. Parlatma
5. Dağlama



Şekil 4.20. Mikroyapı ölçümü için numune hazırlama işlemleri

Kesme: 0,50mm ve 0,70mm kalınlılardaki DC04EK ve DC04ED kalite saclardaki numuneler hadde yönüne dik olacak şekilde kesitten Şekil 4.21' de gösterilen BMS Bulut Makine Bulucut-2 marka su soğutmalı kesme cihazında kesilmiştir. Kalıplamadan önce numunelerdeki kesme esnasında oluşan metal çapakları kaba zımpara ile temizlenmiştir.



Şekil 4.21. BMS bulut makine bulucut-2 marka su soğutmalı kesme cihazı

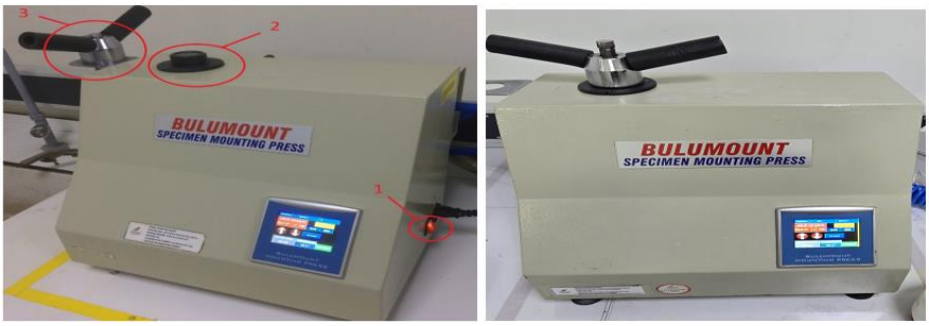
Kalıplama: İncelenecek numune boyutlarının küçük olması durumunda veya numunenin şekillendirilmiş olması durumunda kalıplanması gerekmektedir. Kalıplama işlemi sıcak ve soğuk olarak yapılabilmektedir. Sıcak kalıplamada bir kalıplama cihazına ihtiyaç duyulurken soğuk kalıplamada her hangi bir cihaza ihtiyaç duyulmaz. Kalıplamadan sonra kalıbın kenarlarındaki çapaklar zımparalama ve parlatma sırasında parmaklara, zımparalama ve parlatma disklerine zarar teşki eebileceğinden temizlenmelidir.

Kalıplama işlemi için Şekil 4.24' te gösterilen Metkon marka bakalit tozu ve Şekil 4.25' te gösterilen çelik bakalit klipsi kullanılmaktadır. Kesme cihazında küçültülen sac numunesi bakalit klipsinin orta kısmındaki boşluğa Şekil 4.22' de gösterildiği gibi yerleştirilip, Bakalit Alma Cihazının 2 nolu kalıplama bölmesine yerleştirilir ve üzerine 20ml bakalit tozu ilave edilir. 3 nolu kol 2 nolu bölgeye takılıp sıkılarak cihaza Start verilir ve 180°C' de kalıplama işlemi yapılır.



Şekil 4.22. Kesme makinasında küçültülen sacın bakalit klipsi

Cihaz set sıcaklığına ulaştığında otomatik sulu soğutma sistemi devreye girerek numuneyi 30°C' ye kadar soğutur. 3-5 dk beklendikten sonra ayar kolu gevşetilerek bakalit Şekil 4.23' te gösterildiği gibi 2 nolu bölmeden alınır.



Şekil 4.23. BSM BULUMOUNT marka bakalite alma cihazı

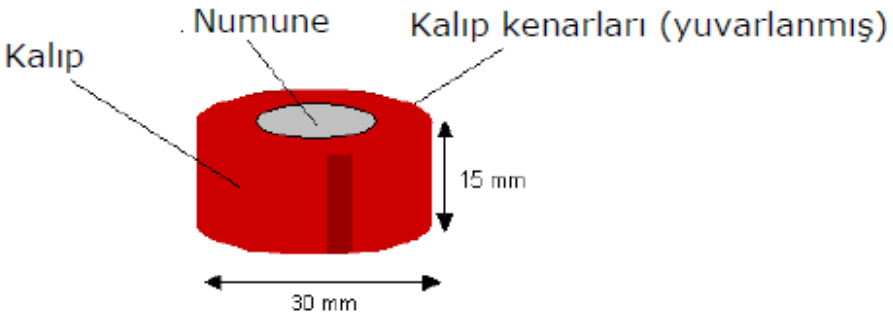


Şekil 4.24. Kalıplama işlemi için kullanılan metkon marka şeffaf bakalit tozu



Şekil 4.25. Paslanmaz çelik metkon marka bakalit alma klipsi

Bakalite alınan numunenin ölçüleri Şekil 4.26’ da belirtildiği gibidir.



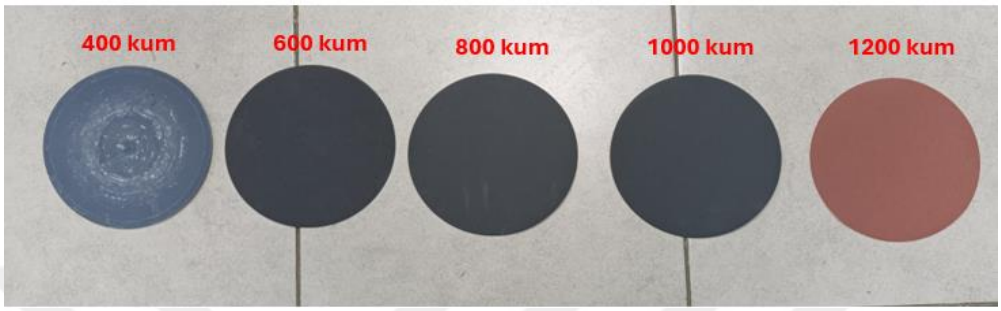
Şekil 4.26. Bakalite alınmış numunenin ölçüleri ve görünümü

Zımparalama ve Parlatma: Zımparalama ve parlatma işlemleri kesme sonrası numune yüzeyinin deforme olması nedeniyle yapılmaktadır. Amaç yüzeyi düz ve pürüzsüz, çiziksiz hale getirmektir. Parlatma işlemi, kademeli olarak kabadan inceye doğru yapılarak yüzey parlak ve homojen hale getirilir. Zımparalama ve parlatma işlemlerinde Şekil 4.27’ de belirtilen cihaz kullanılmıştır. Zımparalama işlemi de aynı şekilde kabadan inceye doğru yapılmaktadır. Her bir zımpara kademesi değiştirildiğinde numune 90˚ çevrilerek bir sonraki adıma devam edilmelidir. Zımparalama sırasında numune yüzeyinin ısınmasını önlemek ve yüzeyden ayrılan malzemenin uzaklaştırılmasını sağlamak amacıyla su kullanılmaktadır. Her bir zımparalama basamağından sonra numune yüzeyi su ile temizlenmelidir. Numuneye dikey yönde fazla bir kuvvet uygulanmamalıdır. Bu baskı kaynaklı numune yüzeyinin düzgün olmasını engeller.



Şekil 4.27. BSM BULUPOL marka zımpara ve parlatma cihazı

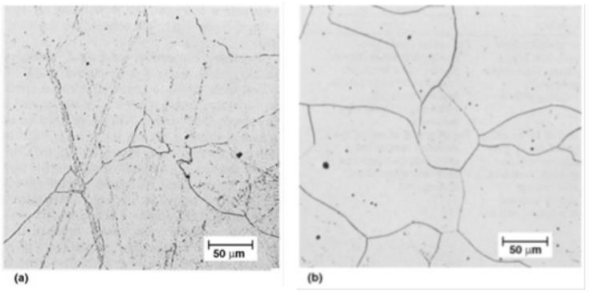
Bakalite alınmış numuneler sırasıyla Şekil 4.28' de gösterilen 400-600-800-100-1200kum zımpara kağıtları kullanılarak Şekil 4.29' da gösterilen bölgede su ile birlikte zımpara ıslatılarak 512rpm' lik devirde döner tablada zımparalanmış ve sacın iç yapısına kadar inilirek düz bir yüzey elde edilmiştir. Her zımpara değişimi sonrası numune yüzeyi su ile durulanıp, hava ile kuturulmuştur.



Şekil 4.28. Zımparalama işleminde kullanılan zımpara kağıtları



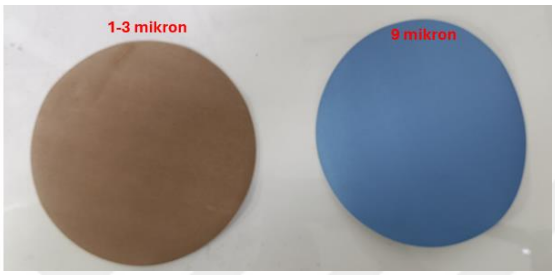
Şekil 4.29. Bakalite alınan numunelerin zımparalanması



(a) Yanlış zımparalamanın etkisini gösteren düşük karbonlu çelik mikroyapısı. (b) Doğru zımparalanmış çelik mikroyapısı.

Şekil 4.30. Zımparalama işlemi sonrası malzeme iç yapısı

Şekil 4.30’ da gösterildiği gibi zımparalamadan gelen çiziklerin yok edilmesi ve ayna parlaklığında yüzey görünümü elde etmek için parlatma işlemi uygulanmalıdır. Parlatma işlemi parlatma keçeleri ve parlatma çuhaları kullanılarak yapılmaktadır. Parlatma işlemi cihazın 1 nolu tablasında Şekil 4.31’ de gösterilen 9mikron-3mikron-1 mikronluk parlatma keçeleri sırasıyla tablaya yerleştirilip Şekil 4.32’ de gösterilen 9mikron-3 mikron-1 mikronluk Metkon marka parlatma solüsyonları kullanılarak Şekil 4.33’ te gösterildiği gibi yapılmıştır.



Şekil 4.31. Parlatma çuhaları



Şekil 4.32. Parlatma solüsyonları

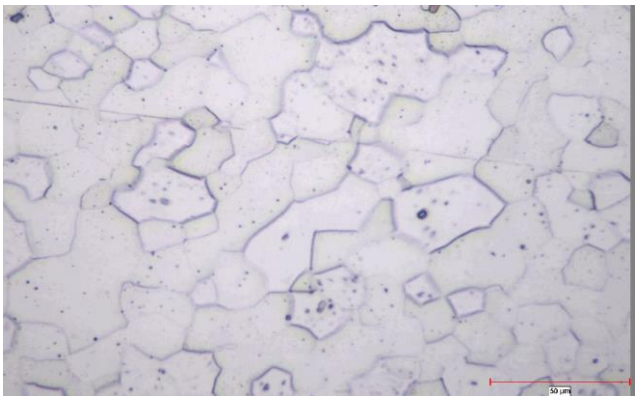


Şekil 4.33. Bakalite alınan numunelerin parlatılması

Parlatma işlemi kabadan inceye doğru yapılmalı ve süspansiyon kullanılmalıdır. Parlatma işlemi esnasında numune üzerine çok fazla baskı uygulanmamalıdır. Fazla baskı uygulandığında yüzeyde kuyruklu yıldız görünümü oluşabilmektedir. Parlatma ile son bulan numune hazırlama işleminden sonra numune yüzeyi incelenir, çiziksiz ayna gibi bir yüzey elde edilmemişse parlatma işlemi tekrarlanır.

Dağlama: Parlatılmış numunenin yüzeyi ışığı eşit bir şekilde dağıttığından iç yapı özelliklerini ortaya çıkarmak için metalografide parlatılmış numune yüzeylerine uygun bir dağlama çözeltisi uygulanarak numunenin tane sınırları ortaya çıkarılır.

Metallerde farklı doğrultuda yönlenmiş tanelerin dağlama reaktifi içinde farklı çözünme miktarları farklı tonlardaki görüntüler ortaya çıkarmaktadır. Çok fazlı yapılarda farklı fazların veya tek fazlı alaşımlarda ve saf metallerde farklı doğrultuda yönlenmiş tanelerin dağlama reaktifi içinde çözünme miktarları farklıdır. Enerjisi yüksek olan kısımlar (tane sınırları ve fazlar) anot, enerjisi düşük olan kısımlar (tane içleri) katot olur. Anot olan bölgeler aşınır, katot olan bölgeler ise korunur. Aşınan kısımlar mikroskop altında ışığı farklı yönlere yansıttığı için mikroskop altında koyu renkte, aşınmayan bölgeler ise geri yansıttığı için açık renkte görülürler. Bu şekilde oluşan kontrast yardımı ile taneler ve fazların yapısı incelenir. Şekil 4.34' te dağlama sonrası oluşan tane sınırı ve tane yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.34. Tane sınırı ve tane yapısı görüntüsü

Dağlama işlemi için DC04EK kalite saclarda %50 Marshall 1+%50 Marshall 2 (3-5sn) dağlama çözeltileri; DC04ED kalite saclarda %4 Pikral (3-5sn) dağlama çözeltileri kullanılmıştır.

Marshall 1 Çözeltisinin Hazırlanması: 100ml Ultra Saf Su + 5 ml H_2SO_4 (Sülfirik Asit) + 8 gr $C_2H_2O_4$ (Okzalik Asit)

Marshall 2 Çözeltisinin Hazırlanması: 30% Hidrojen Peroksit + 70% Ultra Saf Su

%4' lük Pikral Çözeltisinin Hazırlanması: 4 gr $C_6H_3N_3O_7$ (Pikrik Asit) + 96 ml C_2H_5OH (Etil Alkol) +5 damla Benzalkonyum Klorür (Islatma için)

Dağlama işlemi saat camına dağlama çözeltileri damlatılarak ve numuneler batırılıp 3-5sn bekletilerek Şekil 4.35' te belirtildiği gibi yapılmıştır. Her dağlama sonrası yüzey saf su ile durulanıp, hava ile kurutulmuştur.



Şekil 4.35. Mikroyapı analizi için yapılan dağlama işlemi

Dağlama işlemleri tamamlanan numuneler sırasıyla Şekil 4.36' da gösterilen NİKON/ECLIPSE MA100N marka Optik mikroskoba yerleştirilip, mikroskoba bağlı kameradan görüntü Clemex Vision Lite programına aktarılarak incelenmiştir.



Şekil 4.36. NİKON/ECLIPSE MA100N marka optik mikroskop

Tane boyutu ölçümü yapılacak numuneler sırasıyla optik mikroskoba yerleştirilip, 500X büyütmede ASTM E112 standardı referans alınarak tane yapılarının görüntüsü alınmış, tane boyutu ölçümleri yapılmıştır.

4.1.2. Emaye Kaplama İşleminde Kullanılacak Emaye Tozunun Karakterizasyonu

Emaye kaplama işleminde kullanılan toz, Akcoat firmasından tedarik edilmiş olup kodu RTU GR 2142' dir. Bu toz Astar ve Sonkat kaplama olarak kullanılmakta olup Nikel yapılı ve siyah renkli bir emaye tozudur.

Emaye tozuna ilişkin fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 4.2' de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Emaye tozunun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Emaye Kodu	RTU GR 2142
Renk	Siyah
Fiziksel Hali	Katı
Görünüm	Toz ve Parlak
Koku	Kokusuz
Yoğunluk	1,70-1,75 gr/cm3
Erime Noktası	1900°C (Nikel Oksit)
Donma Noktası	Uygulanmaz
Kaynama Noktası	Uygulanmaz
Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı	>400°C (Nikel Oksit)
Alevlenebilirlik	Alevlenmez
Çözünürlük	Suda çözünmez
Partikül Boyutu (150 mesh)	2-4
Bileşimi	%100 Nikel Frit
Uygulama Tipi	Daldırma ve Püskürme
Uygulama Türü	Astar ve Sonkat
Depolama Şekli	20-22 C˚,40-60% RH
Raf Ömrü	12 ay
Yüzey Hazırlığı	Lütfen emaye kaplamaya uygun kalite çelik kullanın. Çelik yüzey yağ, toz ve diğer kirleticilerden arındırılmış olmalıdır.
Uygulama Kalınlığı	Astar: 100-150 mikron, Sonkat: Max. 130 mikron
Kürleme Süresi	3-5dk
Kürleme Sıcaklığı	Çift Kat Uygulamalarda Astar: 830°C, Sonkat 820°C; Tek Kat Uygulamalarda: 830°C

4.1.3. Uygulama Yöntemleri ve Emaye Kaplama Prosesleri

Emaye kaplama işlemlerinde yaş (daldırma veya püskürtme) ve kuru elektrostatik püskürtme metotları kullanılmaktadır. Emaye kaplama yöntemi uygulama şekline, sac ve emayenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine ve kullanım alanına bakılarak seçilmektedir. Emaye kaplama işlemlerinde pişirme sıcaklıkları genel olarak 820-830°C, pişirme süreleri ise 3-5 dakika arasında olmaktadır. Bu parametreler emayenin ve sacın kimyasal bileşimine, emayenin uygulama koşullarına, uygulanacak performans testlerine göre belirlenmektedir. Emaye kaplama prosesinde pişirme şekli tek kat tek pişirim, çift kat tek pişirim, çift kat çift pişirim olmak üzere 3 farklı şekilde yapılmaktadır. Beyaz renkli emayeler sektörde genel olarak çift kat tek pişirim, siyah renkli emayeler tek kat tek pişirim olarak uygulanmaktadır.

Bu çalışmada sac yüzeyinin emaye ile kaplanmasında daldırma ve püskürtme yöntemleri kullanılmış; uygulama yaş emaye ile yapılmış, uygulama ve sonrası pişirme işlemleri tek kat tek pişirim ve çift kat çift pişirim olarak yapılmıştır.

4.1.3.1. Daldırma Yöntemi ile Kaplama

Daldırma yönteminde emaye kaplanacak sac yaş formdaki emaye çamurunun içine daldırılıp, sac emaye ile ovulup, 5-10 sn bekletildikten sonra çıkarılır ve emayenin fazlasının süzülmesi için numune dik bir açıyla tutularak emayenin fazlası yüzeyden akıtılıp yüzeyin homojen olması sağlanır. Daldırma işleminde tane boyutu ve emayenin yoğunluğu ile akışkanlığının kaplama yapmaya etkisi oldukça büyüktür.

Yaş olarak hazırlanan emayenin bileşimindeki katkılar sayesinde emayenin yoğunluğuna bağlı olarak sac yüzeyine bir miktar emaye çamuru yapışır. Etüvde bisküvi kıvamına gelene kadar kurutulan sac, daha sonra kül fırınında pişirilir. Sacın emaye ile kaplanmasında optimum sıcaklık 17-22°C arasındadır. Bu sıcaklığın yüksek tutulması durumunda yüzeyde balık pulu hataları meydana gelebilir. Emaye karışımının sıcaklığı daha düşük olduğunda bileşimindeki katkılar çöker ve homojen olmayan bir yüzey meydana gelir. Bu durum da kürleme esnasında sertliğin artmasına ve yüzey parlaklığının azalmasına neden olur. (Ay, 2000) Emayenin uygulama sırasında fazlasının sac yüzeyinden akması emaye çamurunda kayıp yaşanmamasına neden olan avantajlardandır.

Fakat ön ve arka yüzeylerin aynı kalınlıkta emaye ile kaplanmak zorunda olması, emayenin akış yönünde izler olması ve kaplama kalınlığının akış yönü boyunca değişmesi en önemli dezavantajlarıdır. Bu sebeplerden dolayı daldırma yöntemi ile emayelemede verim düşüktür ve kaplama kalınlığının ayarlanması zordur. Daldırma ile yapılan kaplamalarda metot manuel olduğundan kaplama miktarının her numunede aynı miktarda olacak şekilde ayarlanması zordur.

Daldırma yöntemi, zemin emaye uygulamak için baca borularında, çamaşır makinesi sepetlerinde ve kazanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yaş emayelerin tane boyutunu belirlemede Bayer tekniği kullanılmaktadır. Pistole tabanca ile püskürtme yöntemiyle uygulanacak emayeler için genel olarak tane boyutu 0,5 – 1,5 Bayer / 60 mesh olurken, daldırma yöntemi ile uygulanacak emayeler için tane boyutu 2 – 5 Bayer / 150 mesh olarak hazırlanmaktadır.

Daldırma metodu ile uygulanacak yaş emayenin hazırlanması ve sac yüzeyine uygulanmasında RTU GR 2142 kodlu emaye tozu kullanılmış, uygulama hem astar hem de sonkat olarak yapılmıştır. Yaş emaye 600gr emaye tozu:240ml su oranı ile hazırlanmış, karışım karıştırıcıda 30dk karıştırılmıştır.

Emayenin bayer kontrolü için, Bayer test seti kullanılmıştır. Bu setin içerisinde Şekil 4.37’ de gösterilen ölçü kaşığı, 60 mesh ve 150 mesh elek, huni, eleğin takılı olduğu emaye haznesi, ölçüm mezürü vardır. Yaş emaye ölçü kaşığına silme olacak şekilde doldurulup, Ölçü kaşığına alınan emaye huni yardımı ile emaye haznesine boşaltılmış, huni çıkartılmış ve hazneye su doldurulmuştur. Su elekten geçerek ince boyuttaki emaye taneciklerinin de elekten geçmesini sağlamıştır.

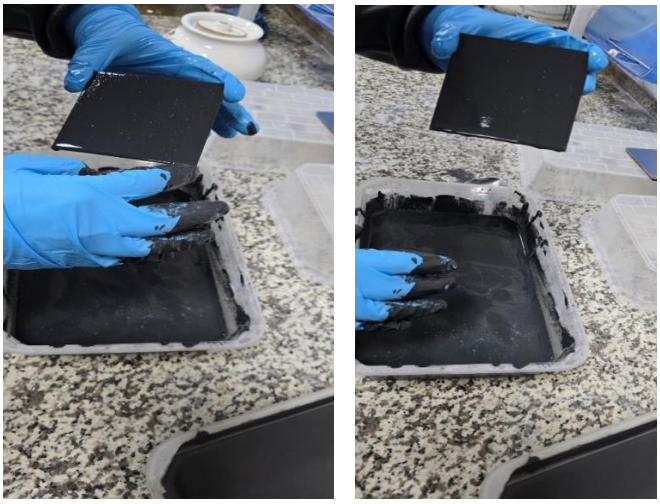
Böylece eleğin üzerinde 100 mikrondan yüksek tanecikler kalmıştır. Emaye iyice ince taneciklerden arındırıldıktan sonra yıkama işlemi sonlandırılmıştır. Haznenin üst kısmına ölçüm mezürü takılıp hazne ters çevrilmiş, haznenin içerisine su doldurulup elek üzerinde kalan emaye taneciklerinin ölçüm mezürüne geçmesi sağlanmıştır. Emaye iyice çöktükten sonra mezürün üzerindeki ölçü çizgilerinden emayenin tane boyutu 4 bayer olarak okunmuştur. Tane boyutu uygun olduğundan elekten geçirme işlemi yapılmamıştır.



Şekil 4.37. Tane boyutu ölçümü yapılan bayer elek test ekipmanları

Hazırlanan yaş formdaki emaye 5dk dinlendirilmiş, DC04EK ve DC04ED kalite saclara sırasıyla tek kat ve çift kat olarak aşağıdaki şekillerde uygulanmıştır:

Tek Kat Tek Pişirim: DC04EK ve DC04ED kalite 0,50mm ve 0,70mm kalınlığındaki sac numuneleri sırasıyla emaye ile ovulup, sac emaye kabına daldırılmış, Şekil 4.38' de gösterildiği gibi fazlası sıyırılarak dik açıyla tutulup emayenin yüzeye homojen olarak yayılması sağlanmıştır. Çift kat uygulamada astar olarak uygulanan ilk kat uygulaması tek kat uygulama gibi yapılmıştır.



Şekil 4.38. Daldırma metodu ile emaye kaplama işlemi

Emaye kaplanmış sac, Şekil 4.39' da gösterilen 200°C' ye setli Etüv fırınında bisküvi kıvamına gelene kadar 10dk kurutulmuştur. Kurutma sonrası Şekil 4.40' ta gösterilen 830°C' ye setli Kürleme Fırınında 4dk pişirilmiş ve soğumaya bırakılmıştır. Emaye

kaplama ve kürlendirme işlemleri Akcoat A.Ş firma laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çift kat uygulama için de pişirme süresi ilk kat için 3dk olarak yapılmıştır.



Şekil 4.39. Şimşek labor teknik ST 120 model etüv kurutma fırını



Şekil 4.40. Protherm PLF110/30 model kül fırını

Çift Kat Çift Pişirim: İlk katı uygulanıp, etüvde kurutulmuş ve kül fırınında pişirilip soğutulmuş ikişer adet sac numuneleri çift kat uygulama için sırasıyla yaş emaye kabına daldırılmış üst kat için sac numuneleri emaye ile kaplanmıştır. Emayenin fazlası

yüzeyden sıyırılıp, dik açıyla tutulup yüzey homojen hale geldiğinde 200°C' ye setli Etüv fırınında büskivi kıvamına gelene kadar 10dk kurutulmuştur. Kurutma sonrası ikinci katın pişirilmesi için sac numunesi 820°C' ye setli Kürleme Fırınında 4dk pişirilmiş ve soğumaya bırakılmıştır.

4.1.3.2. Püskürtme Yöntemi ile Kaplama

Bu yöntem en eski uygulama tekniklerinden biri olup, emayenin püskürtme tekniği ile sac yüzeyine uygulanması işlemidir. Bu yöntemde yaş emaye sac yüzeyine basınçlı hava yardımıyla püskürtme tabancası kullanılarak uygulanır. Manuel ya da otomatik olarak uygulama yapılabilir. Bu yöntemde basınçlı hava yardımıyla düşük bayerdeki yaş emaye yüksek hız ve basınç altında hava ile atomize hale getirilerek sac yüzeyine uygulanır. Bu sayede yüzeyde homojen bir uygulama sağlanmış olur.

Püskürtme yönteminde uygun tane boyutuna getirilmiş emaye çamuru basınç altında pistole tabanca ile sac yüzeyine püskürtülür. Püskürtülen emaye, metal yüzeyine yapıştığında burada ince bir film tabakası oluşturur. Püskürtme yöntemi, pistole tabanca ile kabin içerisinde manuel veya kapalı kabinlerde robotlar yardımıyla yapılır. Püskürtme sistemi, bir püskürtme kabini veya odasından, bir hava kompresöründen, bir pistole tabancasından (sprey) ve bir sıvı emaye kabı haznesinden oluşur. Burada kompresör basınçlı havayı sağlamak için kullanılmaktadır. Pistole ile uygulama yapabilmek için gerekli 2 – 3 mbar basınca sahip havayı sisteme kompresör sağlar. Pistole tabanca ise atomik yapıdaki emaye çamurunun damlacıklar halinde yüzeye basınçlı hava yardımı ile yapışmasını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır.

Püskürtme işleminin avantajları;

- Emaye kalınlığının istenilen miktarda uygulanması,
- Şekillendirilmiş kompleks yapıdaki parçaların dahi kolay emayelenebilir olması,
- Tek yüzey emaye kaplamaya elverişli olması,
- Düz ve delikli parçaların kolayca emaye kaplanabilmesi,
- Daha estetik ve homojen bir yüzey elde edilmesi,
- İstenilen yüzeye istenilen miktarda ve gerektiğinde tamir amaçlı tekrar uygulanabilir olması, bu sayede balık pulu gibi yüzey hatalarının oluşmasının önüne geçilmesi,

Püskürtme yönteminin dezavantajları ise;

- Ekipmanların maliyetinin fazla olması,
- Emaye çamuru sarfiyatının fazla olması,

Çift kat emaye kaplama işlemlerinde püskürtme yöntemi de kullanılmıştır. Önce astar katmanı sac yüzeyine pistole tabanca ile uygulanıp, etüvde kurutulmuş daha sonra kül fırınında pişirilmiştir. Pişirilen astar emayenin üzerine üst kat emaye yine püskürtme yöntemiyle uygulanmış, aynı şekilde kurutulmuş ve pişirilmiştir.

Püskürtme metodu için kullanılacak yaş emaye çamuru 300gr emaye tozu:135ml su oranında hazırlanmıştır. Hazırlanan emayenin tane boyutunun 0,5bayer olması için Şekil 4.41' de gösterilen emaye karışımı içinde 850gr zirkon alüminyum bazlı 20mm ve 30mm çapında porselen bilye bulunan Şekil 4.42' de gösterilen değirmende 2dk karıştırılıp Şekil 4.43' te gösterilen 60mesh elekten geçirilmiştir. Bayer testi uygulanarak tane boyutu 0,5bayer olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.41. Bilyeli emaye öğütme değirmeni



Şekil 4.42. Değirmen makinası



Şekil 4.43. Emaye süzmede kullanılan elek

Yaş emaye karışımı pistole tabancanın emaye haznesine boşaltılmış, DC04EK ve DC04ED kalite 0,50mm ve 0,70mm kalınlığındaki saclara sırasıyla tek kat ve çift kat olarak aşağıdaki şekillerde uygulanmıştır:

Tek Kat Tek Pişirim: DC04EK ve DC04ED kalite 0,50mm ve 0,70mm kalınlığındaki sac numuneleri sırasıyla püskürtme kabininde pistole tabanca ile sac yüzeyine Şekil 4.44' te gösterildiği gibi uygulanmış, saclar bisküvi kıvamına gelene kadar 10dk 200°C' ye setli etüvde kurutulmuş daha sonra 830°C' ye setli kül fırınında 4dk pişirilmiştir. Çift kat uygulama için de pişirme süresi ilk kat için 3dk olarak yapılmıştır.



Şekil 4.44. Püskürtme yönetimi ile emayenin sac yüzeyine uygulanması

Çift Kat Çift Pişirim: Tek kat olarak pistole tabanca ile püskürtme yapılıp emaye kaplanmış, kül fırınında pişirilmiş numuneler soğuduktan sonra 2.kat uygulama için numunelerin her biri sırasıyla püskürtme kabininde emaye kaplanmış ve etüvde aynı şekilde kurutulup, kül fırınında 820°C' de 4dk pişirilmiştir ve soğumaya bırakılmıştır.

4.1.4. Emaye Kaplama Sonrası Yapılan Performans Testleri

4.1.4.1. Emaye Kalınlığı Ölçümü

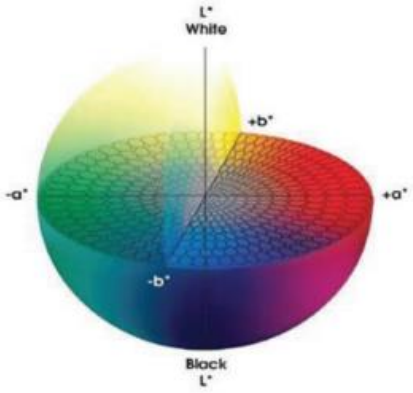
Bu testin amacı, emayelenmiş metal plaka yüzeyindeki emaye kalınlığını Elkometre ile ölçmektir. Ölçüm için Şekil 4.45' te gösterilen Akcoat A.Ş firma laboratuvarındaki elkometre cihazı kullanılmıştır. Elkometre cihazı kalınlığı ölçülecek plakanın yüzeyine dik tutularak en az 3 farklı bölgeden ölçüm yapılarak ortalama değeri alınır.



Şekil 4.45. Positest DFT marka dijital elkometre cihazı

4.1.4.2. Renk Ölçümü

Emaye kaplanmış sac numunerinde kaplama miktarına göre renk değişimlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Renk ölçümünde Şekil 4.46' da gösterilen Akcoat A.Ş firma laboratuvarındaki kolorometre cihazı kullanılmıştır. Ölçümler Şekil 4.47' de gösterildiği gibi SCIE Lab (L*a*b*) sisteminde hassas olarak yapılmıştır. Renk üç boyutlu olarak tanımlanır. Bu modelde L*: Rengin koyuluğu ya da açıklığı (0: Siyah, 100: Beyaz), a*: Kırmızılık Yeşillik (-60: Yeşil, +60: Kırmızı), b*: Sarılık Mavilik (-60: Mavi, +60: Sarı) olarak tanımlanır (Keskin,2017).



Şekil 4.46. CIE L*a*b* renk sistemi (Keskin, 2017)



Şekil 4.47. Konica mınolta marka el tipi kolorometrik renk ölçüm cihazı

4.1.4.3. Parlaklık Ölçümü

Emaye kaplamaların parlaklık ölçümleri Şekil 4.48' de gösterilen Akcoat A.Ş firma laboratuvarındaki 3nH glossmetre cihazı ile yapılmıştır. Bu cihazda 3 açılı ölçüm

yapılabilmektedir. 20º ’deki değer mat plakalar için kullanılır, 85º ’deki değerler ise genellikle parlak kaplamalarda kullanılır. Ama genellikle 60º ’deki değerlere bakılır. Düşük değerler matlığı, yüksek değerler ise parlaklığı gösterir. Bu çalışmada ölçüm 60^0’ ye göre yapılmıştır.

Emaye kaplamanın parlaklığı yüzey pürüzlüğüne göre değişiklik gösterir. Pürüzsüz yüzeyde ışık aynı yönde yansır, pürüzlü yüzeyde ise ışık rastgele dağılır ve yüzeyin opak görünmesine sebep olur.



Şekil 4.48. 3nH marka parlaklık ölçüm cihazı

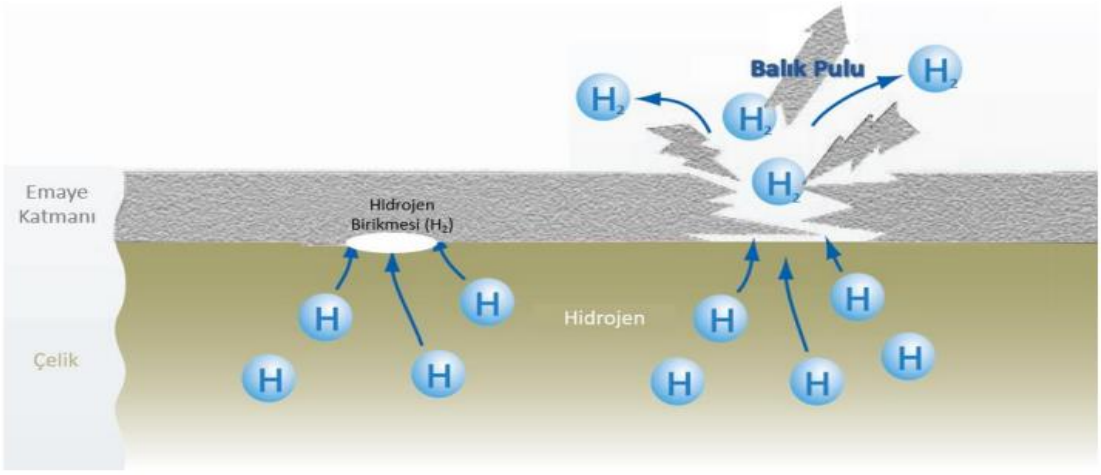
4.1.4.4. Sitrik Asit Dayanım Testi

Bu testin amacı emaye yüzeyinin aside dayanımını ölçmektir. Uygulama alanları olarak Odun sobaları, beyaz eşya, pişirme ve saklama kaplarında kullanılmaktadır. %10 derişime sahip sitrik asit çözeltisi hazırlamak için 1 gram sitrik asit tartılıp 10 ml suya eklenmiştir. Sitrik asit testi yapılacak plakaların üzerine sitrik asit damlatılarak üzerlerine saat camı kapatılıp 15 er dk bekletilmiştir. 15 dk’ nın sonunda plakalar yıkanarak sitrik asit yüzeyden temizlenmiştir. Islak yüzey kurulanıp sitrik asidin yüzeydeki aşındırması kontrol edilmiştir.

Kontrol yöntemi: Eğer yüzeyde aşınma yok ise AA değerini alınır, asit izi gözle görünüyorsa A değerini, eğer beyazlama var ise B değerini alır.

4.1.4.5. Balık Pulu Kontrolü

Sac ve emaye kaplama arayüzeyinde hidrojen atomlarının birleşerek moleküler hidrojen formuna geçmesi ve oluşan basınç etkisi altında emayenin yüzeyden atması olayına balık pulu (fish scale) denmektedir. Şekil 4.49' da balık pulu oluşum mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 4.49. Balık pulu oluşum mekanizması (Ramazan, 2022)

Balık pulu kusuru, sac yüzeyine uygulanmış astar veya sonkat emaye katında görülen balık puluna benzer yüzeyde yarım ay şeklinde bir görüntüye sahip olan yüzey kusurudur. Bu hata sactan gelen hidrojenin moleküler yapıda emayeli yüzeyden çıkmasından kaynaklanmaktadır. Bu hata türü emaye kaplandıktan hemen sonra ortaya çıkabileceği gibi, 24 saat hatta aylar sonrasında da ortaya çıkabilmektedir. Bu hata sac kaynaklı olabileceği gibi emayenin pişirilme sıcaklığı, kullanılan sacın karbon oranının yüksek olması, fırın atmosferindeki ya da fırınlanan emayedeki su buharı, emaye tozunun karakterizasyonu (hammadde ya da fritte bulunan bağlanmış su), cam yapısında bulunan OH grupları, öğütme işleminde kullanılan su, çelik içerisinde asitleme öncesi ya da sonrası bulunabilecek çözünmüş hidrojen, emaye kalınlığının çok yüksek olması, fırın emayelemeye uygun sac kullanılmaması, emaye kaplama kalınlığının fazla olması ile ilgili de olabilir.

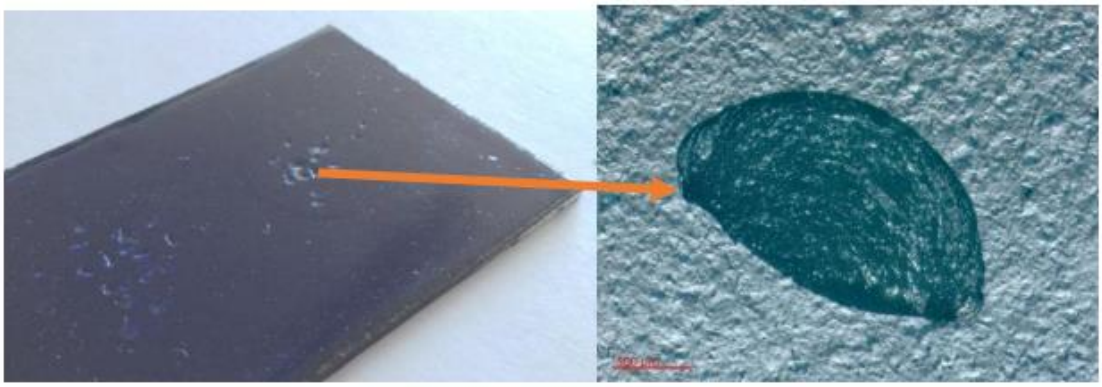
Balık pulu hatası yüzeyin her iki tarafı da emaye kaplandığında veya çift kat emaye yüzeye uygulandığında çoğunlukla meydana gelmektedir. Bunun nedeni sacın bünyesindeki hidrojenin sacın bünyesinden çıkamamasıdır. Emaye kaplı sacın kürleme

sıcaklığı düşürüldükçe, hidrojen çelik içerisine daha az nüfus ederek emaye ile çelik sac arayüzeyinde birikmeye başlar. Yüksek basınç altında hidrojen moleküler forma dönüşür ve emaye katmanını aşarak yüzeyde balık pulu dediğimiz yüzey kusurunu oluşturur.

İlk kez 1925 yılında Sasse tarafından yapılan çalışmalarda hidrojen kaynaklı olduğu tespit edilmiştir. Emaye çeliklerinde çok düşük miktarda (ppm seviyesinde) hidrojen bulunduğundan balık pulu kusuruna neden olacak bir durum teşkil etmemektedir. Emaye kaplama sonrası pişirme işlemi yüksek sıcaklıklarda (800-850°C) yapıldığı için fırın içerisinde bulunabilecek nemin bu kusura neden olabileceği söylenmektedir. Petzhold ve Keeler de yaptıkları çalışmalarda balık puluna neden olabilecek ana hidrojen kaynağının emaye tozunda bulunan bağlanmış su olduğunu belirtmişlerdir. Ortamdaki nem (H2O) ya da kilde bulunan bağlanmış su emaye-çelik arayüzeyine difüze olmakta, H2O çözünerek Atomik hidrojen çelik içine nüfuz etmekte ve atomların birleşimi sonucu H2 gaz formuna dönüşmektedir. Artan sıcaklık ile hidrojenin çelik içindeki çözünürlüğü artmaktadır. Hidrojen emaye çelik arayüzeyine doğru hareket ederek, basınç etkisi ile kusuru oluşturmaktadır. Bu kusurun oluşum mekanizması aşağıdaki reaksiyona göre gerçekleşmektedir (Ramazan, 2022).

$$H2O + Fe(katı) \leftrightarrow 2\ H(Fe/çözünmüş) + FeO(katı) \quad (4.1)$$

Bunu engellemek için; hidrojenin çelik sac içerisinde kalmasını sağlamak ve pişirme fırınında nemi engellemek gerekmektedir. Şekil 4.50’ de balık pulu hata görselleri belirtilmiştir.



Şekil 4.50. Balık pulu hatası ve x100 stereo mikroskop görüntüsü (Ramazan, 2022)

DC04EK ve DC04ED kalite saclar için daldırma ve püskürtme yöntemleriyle tek kat ve çift kat uygulanmış emaye kaplamalarda uygulama sonrası, 24 saat sonra, 1 ay sonrası için balık pulu kontrolü yapılmıştır.

4.1.4.6. Darbe ve Yapışma Testi

Emayenin sac yüzeyine yapışma derecesini test etmek için Yapışma testi uygulanmaktadır. Bu testin uygulanması için TS EN 10209 standardında belirtilen darbe testi aleti kullanılmaktadır. Emaye kaplanmış sac yüzeyinde oluşan dairesel iz TS EN 10209 standardında bulunan referans görseller ile karşılaştırılarak emayenin yapışma derecesi ve sınıfı test edilmiştir.

Darbe Test Cihazı Şekil 4.55' te gösterildiği gibi uzunluğu 1m, iç çapı 21 mm, kütlesel ağırlık bloğu 1,5 kg olan bir ekipmandır. Darbe uygulanırken ortaya çıkan enerji kuvvetini hesaplamak için uygulama yüksekliği, darbe yaratan kütlenin ağırlığı ve yerçekimi ivmesi değerleri kullanılır. Bu değerler çarpılarak uygulanan darbe kuvvetinin kaç joule olduğu bulunur.

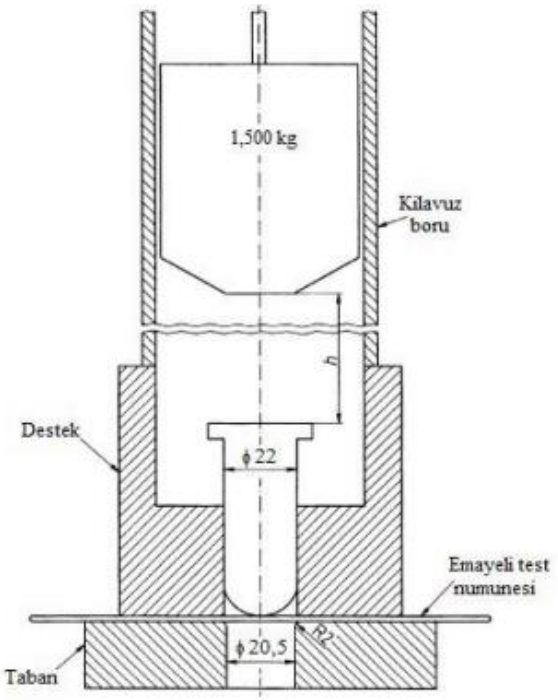
Saca uygulanacak darbe testinde düşme yüksekliği mesafesi Tablo 4.3' te belirtilmiş olup, 0,50mm kalınlığında emaye kaplı saclarda 750mm; 0,70mm kalınlığında emaye kaplı saclarda 300mm' dir. Belirtilen yükseklikten darbe ağırlığı serbest düşmeye bırakılarak, emayeli parçada oluşan deformasyon darbe skalasına göre derecelendirilmiştir.

Tablo 4.3. TS EN 10209 kalınlık aralığına göre düşme yüksekliği tablosu

Kalınlık aralığı *t* mm	**Düşme yüksekliği *h*** mm
$0,3 \leq t \leq 0,6$	750 [a]
$0,6 < t \leq 0,8$	300
$0,8 < t \leq 1,2$	500
$1,2 < t \leq 3,0$	750

Basılan ve emayelenen parçaların darbe testi Şekil 4.51 ve 4.52' de gösterilen Darbe Test Cihazı ile Akcoat A.Ş firması laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Darbe testi EN 10209 Standardına göre yapılmıştır. Darbe testi emayenin yapışma derecesini test etmek için uygulanır. Yapışma derecesi 1'den 5'e kadar değerlendiriliyor olup 1 yapışmanın çok iyi

5 çok kötü olduğunu ifade etmektedir. Darbe testi için Şekil 4.51' de görseli belirtilen darbe test cihazı kullanılmıştır. Darbeyi yaratan küresel uç, 1,5kg' lık yük altında serbest düşmeye bırakıldığında yüzeyde bir derinlik oluşturur. Bu bölgedeki darbenin etkisi ve miktarı aşağıdaki sınıflandırma derecesine göre belirlenip, sonuç emayenin yapışma değeri olarak kaydedilir.

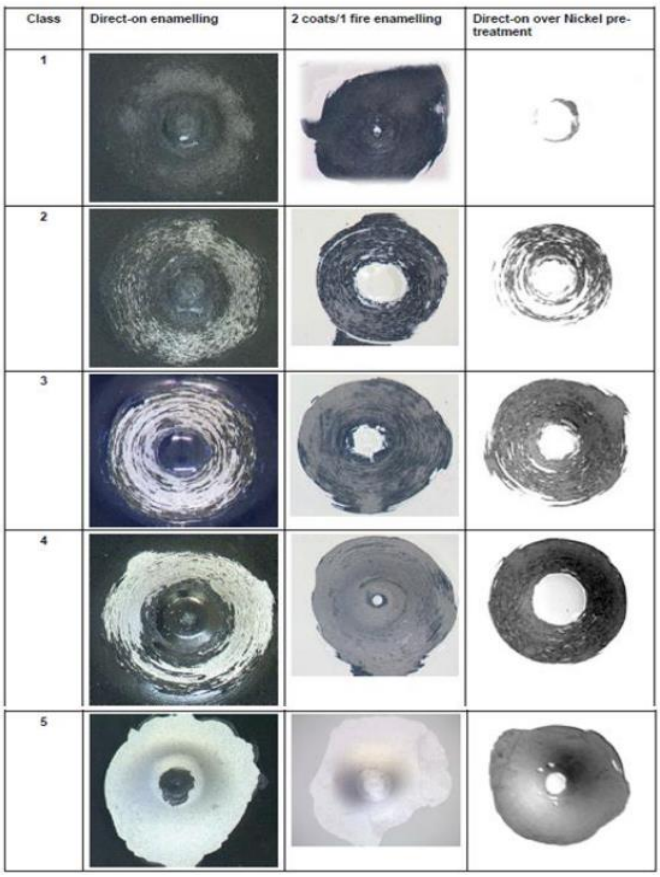


Şekil 4.51. TS EN 10209 darbe deney tertibatı (TS EN 10209, 2023)



Şekil 4.52. Akcoat A.Ş laboratuvarı Neurtek marka darbe test cihazı

Pişirme sonrası emaye ve çeliğin yapışma performansı TS EN 10209 soğuk haddelenmiş emaye kaplamaya uygun çelik standardına göre Tablo EK-C' de gösterilen derecelendirme esas alınarak değerlendirilmektedir. Gösterge olarak Şekil 4.53' de gösterildiği gibi yapışma seviyesi 1'den 5'e doğru sınıflandırılmaktadır.



Şekil 4.53. TS EN10209 emaye ve çelik yapışma performansı değerlendirmesi (TS EN 10209, 2023)

Sınıf 1: mükemmel: kırılma meydana gelmesine rağmen darbe yüzeyi tamamen emaye ile kaplanmıştır.

Sınıf 2: çok iyi: darbe yüzeyi neredeyse tamamen kırık emaye ile kaplanmıştır ve alt tabakanın bazı hafif izleri görülebilir.

Sınıf 3: orta: darbe yüzeyi hala kırık emaye ile kaplanmıştır ancak alt tabakanın geniş alanları görülebilir.

Sınıf 4: zayıf: darbe yüzeyi neredeyse tamamen çıplaktır ve yalnızca kırık emaye kalıntıları vardır.

Sınıf 5: çok zayıf: darbe yüzeyi tamamen çıplaktır ve emaye-alt katman arayüzünde keskin bir ayrım vardır.

5. BULGULAR VE SONUÇLAR

5.1. Kimyasal Analiz

DC04EK ve DC04ED kalite sac numunelerine ilişkin kimyasal analiz sonuçları Tablo 5.1' de gösterilmiş olup, Tablo 5.2' deki karakteristiklere göre sonuçlar değerlendirilmiştir.

Tablo 5.1. 0,50mm ve 0,70mm DC04EK ve DC04ED kalite sacların kimyasal analiz sonuçları

Çelik Kalitesi	Kalınlık	C	Mn	P	S	Si	Ti	Nb	Al	V	Mo	B	Cr	N	Cu	Ni	Co	W	Pb	Sn	Zr	Ca	Sb	Zn	Ag	O	Fe
DC04 EK	0,50	0,032	0,12	0,014	0,005	0,017	0,001	0,001	0,03	0,001	0,013	0,002	0,062	0,009	0,21	0,069	0,009	<0.0002	<0.0002	0,01	<0.0001	0,002	0,0004	0,001	0,0002	<0.002	99,4
DC04ED	0,50	0,002	0,13	0,010	0,023	0,005	0,073	0,002	0,023	0,003	0,003	0,0003	0,027	0,007	0,026	0,011	0,003	<0,0002	0,0008	0,001	0,0004	<0,0000	0,002	0,0001	0,0001	<0,002	99,6
DC04EK	0,70	0,004	0,12	0,009	0,023	0,003	0,083	0,001	0,029	0,003	0,004	0,0002	0,027	0,011	0,027	0,012	0,004	0,0003	0,0007	0,001	0,0004	<0.0000	0,002	0,0001	0,0001	<0.002	99,6
DC04ED	0,70	0,003	0,16	0,016	0,016	0,007	0,068	0,001	0,06	0,003	0,003	0,0002	0,018	0,008	0,034	0,024	0,008	0,0002	0,0007	0,002	0,0005	<0.0000	0,002	0,0001	0,0001	<0.002	99,6

Tablo 5.2. TS EN 10209 standardının mekanik ve kimyasal özellikler için gereklilikleri

EN 10027-1'e uygun kısa gösteriliş	EN 10027-2'ye uygun kısa gösteriliş	Oksijen giderme (Deoksidasyon) yöntemi	Mekanik özelliklerin geçerliliği ve lüders bantları olmaması	R_e MPa max [b c]	R_m MPa	A_{80} % min [d]	r_{90} min [e]	Kimyasal bileşim (pota analizi) % max					C içeriği (mamul analizi) % max
								C	Ti	Mn	P	S	
DC01EK	1.0390	Tam giderilmiş [f]	6 ay [f]	270	270/390	30		0,07		0,60	0,045	0,050	
DC04EK	1.0392	Tam giderilmiş	6 ay	220 [k]	270/350	36		0,06		0,50	0,030	0,050	
DC05EK	1.0386	Tam giderilmiş	6 ay	220 [k]	270/350	36	1,7	0,06		0,50	0,025	0,050	
DC06EK	1.0869	Tam giderilmiş	6 ay	190	270/350	38	1,8	0,02	0,15 h	0,50	0,020	0,050	
DC07EK	1.9350	Tam giderilmiş	6 ay	170	270/350	40	2,0	0,02	0,15 h	0,50	0,020	0,050	
DC03ED	1.0399	Tam giderilmiş [f]	6 ay [f]	240	270/370	34		j		0,40	0,035	0,050	0,004
DC04ED	1.0394	Tam giderilmiş	6 ay	210 [g]	270/350	38		j		0,40	0,030	0,050	0,004
DC06ED	1.0872	Tam giderilmiş	6 ay	190	270/350	38	1,8	0,02	0,15 [h]	0,35	0,020	0,050	

Tablo 5.3’ de belirtilen TS EN ISO 10209 standardına göre DC04EK kalite saclarda max. karbon oranı %0,06, Mangan oranı %0,50, Fosfor oranı %0,030, Kükürt oranı %0,050 olup, Tablo 5.1’ de belirtilen analiz sonucu elde edilen elementlerin bileşimi standarda uygun ölçülmüştür. Tablo 5.2’ de belirtilen TS EN ISO 10209 standardına göre DC04ED kalite saclarda max. karbon oranı %0,004, Mangan oranı %0,40, Fosfor oranı %0,030, Kükürt oranı %0,050 olup, Tablo 5.1’ de belirtilen analiz sonucu elde edilen elementlerin bileşimi standarda uygun ölçülmüştür.

5.2. Çekme Testi

Test sonuçları Tablo 5.3’ te belirtilen TS EN ISO 10209 standardı mekanik özellik tablosuna göre aşağıdaki gibi değerlendirilir:

Tablo 5.2. TS EN 10209 standardının mekanik ve kimyasal özellikler için gereklilikleri

EN 10027-1'e uygun kısa gösteriliş	EN 10027-2'ye uygun kısa gösteriliş	Oksijen giderme (Deoksidasyon) yöntemi	Mekanik özelliklerin geçerliliği ve lüders bantları olmaması	R_e MPa max [b c]	R_m MPa	A_{80} % min [d]	r_{90} min [e]	Kimyasal bileşim (pota analizi) % max					C içeriği (mamul analizi) % max
								C	Ti	Mn	P	S	
DC01EK	1.0390	Tam giderilmiş [f]	6 ay [f]	270	270/390	30		0,07		0,60	0,045	0,050	
DC04EK	1.0392	Tam giderilmiş	6 ay	220 [k]	270/350	36		0,06		0,50	0,030	0,050	
DC05EK	1.0386	Tam giderilmiş	6 ay	220 [k]	270/350	36	1,7	0,06		0,50	0,025	0,050	
DC06EK	1.0869	Tam giderilmiş	6 ay	190	270/350	38	1,8	0,02	0,15 h	0,50	0,020	0,050	
DC07EK	1.9350	Tam giderilmiş	6 ay	170	270/350	40	2,0	0,02	0,15 h	0,50	0,020	0,050	
DC03ED	1.0399	Tam giderilmiş [f]	6 ay [f]	240	270/370	34		j		0,40	0,035	0,050	0,004
DC04ED	1.0394	Tam giderilmiş	6 ay	210 g	270/350	38		j		0,40	0,030	0,050	0,004
DC06ED	1.0872	Tam giderilmiş	6 ay	190	270/350	38	1,8	0,02	0,15 h	0,35	0,020	0,050	

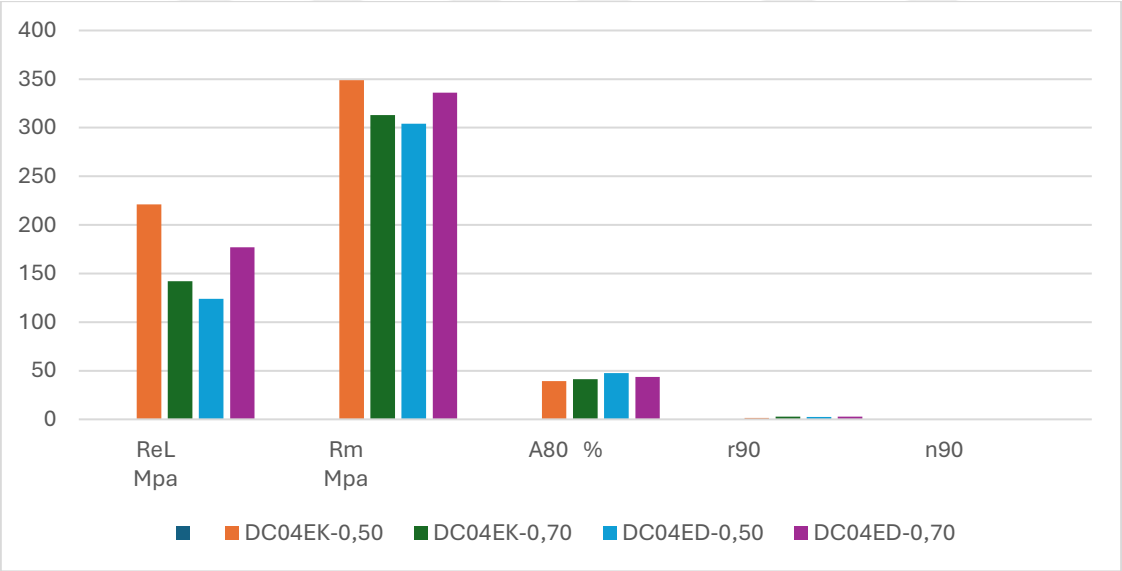
a. Mekanik özellikler yalnızca temper haddesinden geçirilmiş mamullere uygulanır. Mekanik özellik değerleri dikey deney yönünü ifade eder.
b. Akma gerilimi değeri, tam bir akma noktası sunmayan mamuller için Rp % 0,2 ve diğerleri için daha düşük akma gerilimidir (Rel,). Kalınlık 0,7 mm'ye eşit veya küçük olduğunda ve 0,5 mm'den büyük olduğunda akma gerilimi değeri 20 MPa artırılır. 0,5 mm veya daha küçük kalınlıklar için değer 40 MPa artırılır.
c. Şekillendirme amacıyla, DC01EK, DC04EK, DC05EK, DC03ED ve DC04ED kaliteleri için Re alt sınırı 140 MPa, DC06EK ve DC06ED kaliteleri için 120 MPa ve DC07EK kalitesi için 90 MPa olarak kabul edilebilir.
d. Kalınlık 0,7 mm veya daha küçük ve 0,5 mm'den büyük olduğunda kırılma sonrası minimum uzama değeri 2 birim azalır. 0,5 mm'ye eşit veya daha az kalınlıklar için minimum değer 4 birim azaltılır.
e. Minimum r değeri yalnızca kalınlığı 0,5 mm'ye eşit veya daha büyük olan mamuller için geçerlidir. Kalınlık 2,0 mm'nin üzerine çıktığında minimum r değeri 0,2 birim azaltılır.
f. Sipariş sırasındaki anlaşmaya bağlı olarak diğer deoksidasyon yöntemleri kullanılabilir. Bu durumda, mekanik özelliklerin geçerlilik süreleri ve lüder bantları izlerinin bulunmaması, sipariş sırasında kararlaştırılacaktır.
g. Kalınlık 1,5 mm'ye eşit veya daha büyükse akma geriliminin maksimum değeri 225 MPa'ya ulaşabilir.
h. Sipariş sırasında kararlaştırıldığı takdirde titanyum niyobyum ile değiştirilebilir. Karbon ve nitrojen tamamen bağlı olacaktır.
i. Sipariş sırasındaki anlaşmaya bağlı olarak, aynı mekanik özelliklere sahip başka çelikler de tedarik edilebilir. Bu durumda, bu çeliklerin kimyasal bileşimi sipariş sırasında kararlaştırılacaktır. J. DC03ED ve DC04ED kalitelerinin dekarbürizasyonu katı veya sıvı fazda gerçekleşebilir. Karbon giderme sonrasında mamul analiziyle belirlenen karbon içeriği maksimum %0,004 olacaktır. Sipariş sırasında kararlaştırıldığı takdirde≤ DC03ED ve DC04ED kaliteleri örneğin titanyum, niyobyum veya bor içerebilir.
k. Alıcının talebi üzerine DC04EK ve DC05EK kaliteleri 0,7 mm'den 1,5 mm'ye kadar kalınlıklarda Re ≤ 210 MPa ve A80 ≥ %38 olarak temin edilebilir. Bu nedenle, normal pürüzlülük seçenekleri aralığında yüzey pürüzlülüğünü seçmek imalatçının sorumluluğundadır.

Tablo 5.4’ te belirtilen ölçülmüş mekanik değerlerin TS EN ISO 10209 standardını karşıladığı görülmüştür.

Tablo 5.3. 0,50mm ve 0,70mm DC04EK ve DC04ED kalite sacların çekme test sonuçları

			Çekme Test Sonuçları						
Çelik Kalitesi	**Kalınlık (mm)**	**Test Açısı**	**AKMA**	**ÜST AKMA**	**ALT AKMA**	**ÇEKME**	**UZAMA**	**r90**	**n90**
			Rp 0,2 Mpa	**ReH Mpa**	**ReL Mpa**	**Rm Mpa**	**A80 %**	**r_{90}**	**n_{90}**
DC04EK	0,50	90	223	223	221	349	39,5	1,59	0,22
DC04EK	0,70	90	143	146	142	313	41,2	2,88	0,24
DC04ED	0,50	90	126	128	124	304	47,5	2,34	0,25
DC04ED	0,70	90	175	179	177	336	43,8	2,76	0,24

DC04EK ve DC04ED kalite sacların Çekme Test Sonuçlarının grafiksel gösterimi Şekil 5.1’ de belirtilmiştir.



Şekil 5.1. Çelik kalitesi ve sac kalınlığına göre çekme testi sonuçları

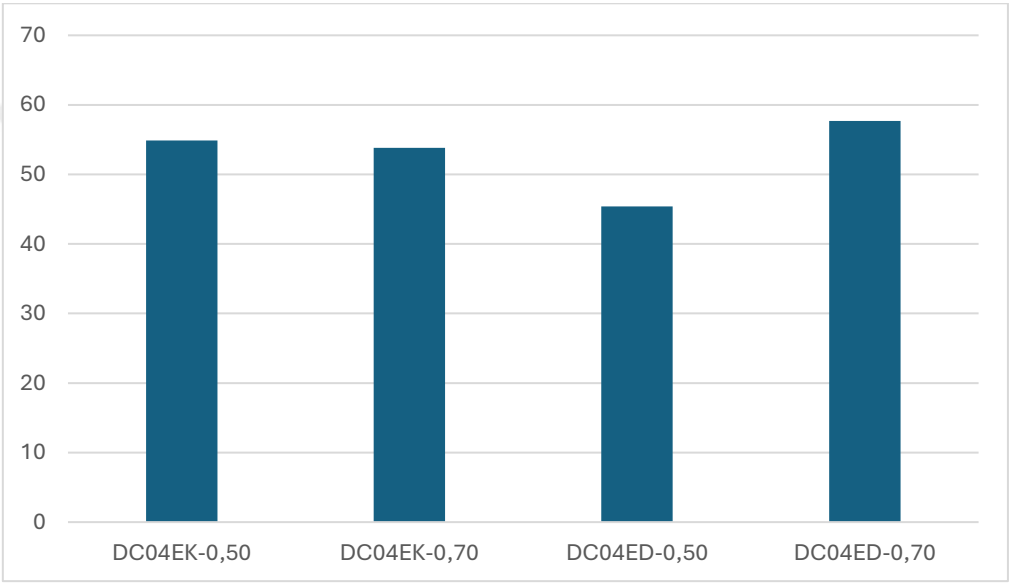
5.3. Sertlik Ölçümü

Sertlik ölçümünde ZWICK BK 8150 model sertlik cihazı kullanılmış ve Rockwell cinsinden sertlik ölçümü yapılmıştır. Sertlik ölçüm sonuçları Tablo 5.5’ te belirtilmiştir.

Tablo 5.4. 0,50mm ve 0,70mm DC04EK ve DC04ED kalite sacların sertlik ölçümleri

Çelik Kalitesi	Kalınlık	Sertlik Ölçüm Sonucu (HRB 15T-S)
DC04EK	0,50	54,9
DC04EK	0,70	53,8
DC04ED	0,50	45,4
DC04ED	0,70	57,7

Sac kalınlığı ve çelik kalitesine göre ölçülen Sertlik değerlerinin grafiksel gösterimi Şekil 5.2' de belirtilmiştir.



Şekil 5.2. Sac kalınlığı ve çelik kalitesine göre sertlik ölçüm sonucu (HRB 15T-S)

5.4. Pürüzlülük Ölçümü

TS EN 10209 standardına göre emaye çeliklerinin yüzey pürüzlülük değerlerinin Tablo 5.6' da belirtildiği gibi (Ra) 0,6-1,9µm aralığında olması gerekmektedir.

Tablo 5.5. EN 10209 standardında yüzey pürüzsüzlük değer aralığı

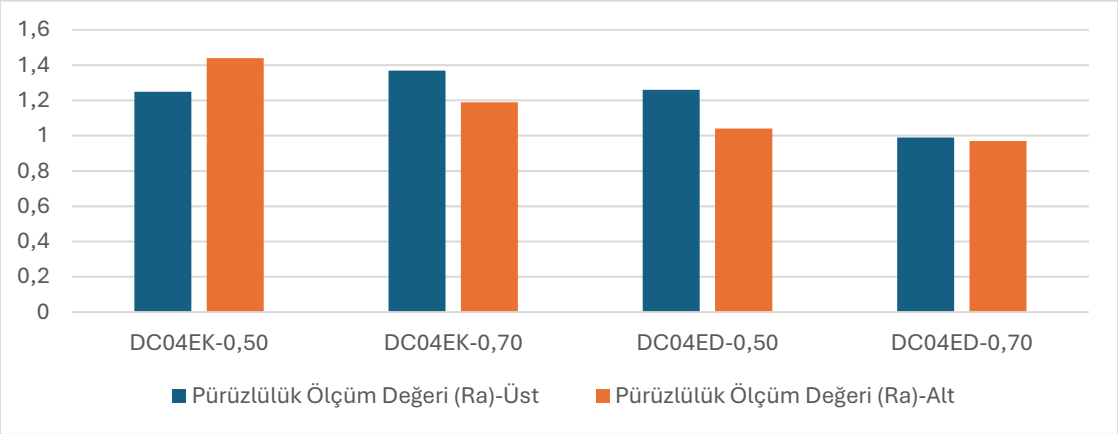
Yüzey Görüntümü	Sembol	Pürüzlülük
Normal Pürüzlü	m r	0,6 µm < Ra ≤ 1,9 µm Ra > 1,6 µm

Ölçülen pürüzlülük değerleri Tablo 5.7' de belirtilmiş olup, ölçülen değerlerin TS EN 10209 standardında belirtilen pürüzlülük limitlerini karşıladığı görülmüştür.

Tablo 5.6. 0,50mm ve 0,70mm kalınlıktaki DC04EK ve DC04ED kalite sacların pürüzlülük ölçüm sonuçları

Çelik Kalitesi	Kalınlık	Pürüzlülük Ölçüm Değeri (Ra)-Üst	Pürüzlülük Ölçüm Değeri (Ra)-Alt
DC04EK	0,50	1,25	1,44
DC04EK	0,70	1,37	1,19
DC04ED	0,50	1,26	1,04
DC04ED	0,70	0,99	0,97

Sac kalınlığı ve çelik kalitesine göre ölçülen pürüzlülük sonuçlarının grafiksel gösterimi Şekil 5.3' te ki gibidir:



Şekil 5.3. Sac kalınlığı ve çelik kalitesine göre pürüzsüzlük ölçüm sonuçları

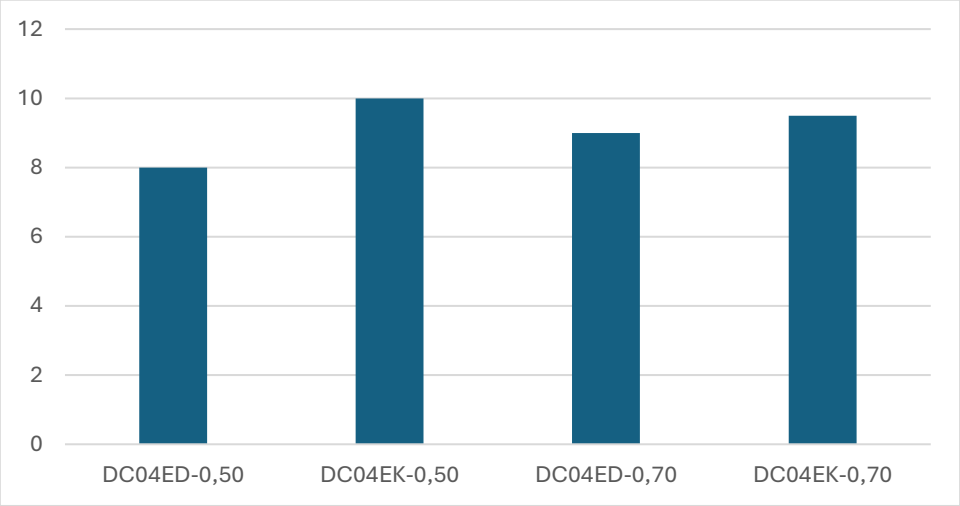
5.5. Mikroyapı Analizi

Tane boyutlarının yapısı incelenmiş ve tane boyutu ölçümleri ASTM E112 standardına göre Tablo 5.9 kullanılarak yapılmıştır. Tane boyutlarının mikroyapısı Şekil 5.5' te, tane boyutları Şekil 5.6' da gösterilmiştir. ASTM Tane boyutları ölçüm sonuçları Tablo 5.8' deki gibi olup, DC04EK kalite sacların tane boyutlarının; DC04ED kalite saclara göre daha büyük olduğu görülmüştür.

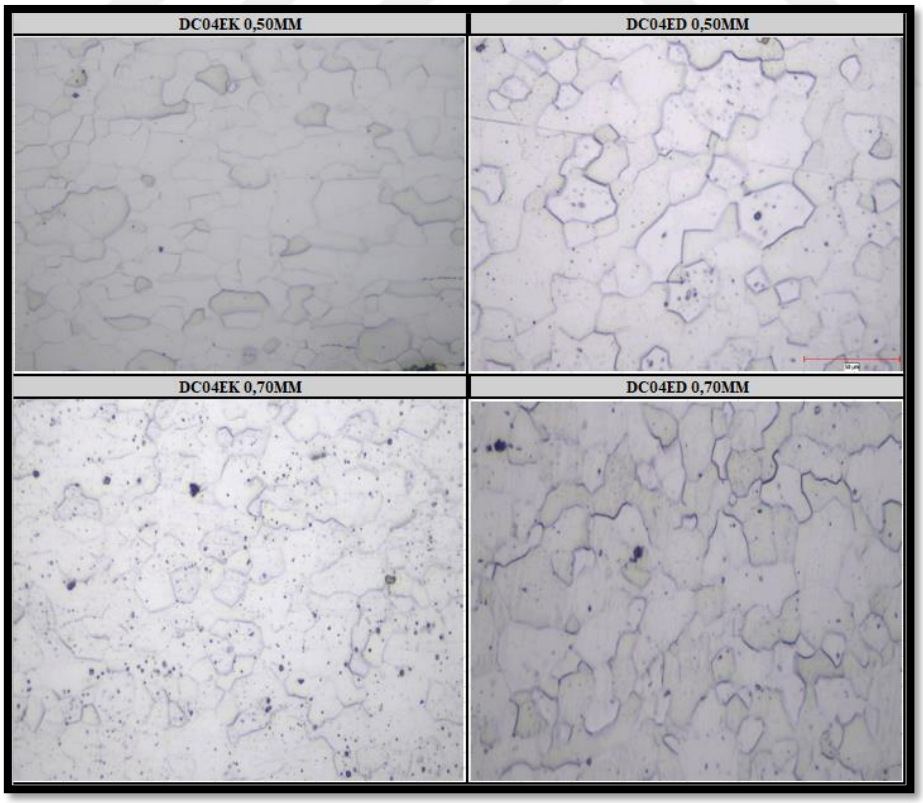
Tablo 5.7. Tane boyutu ölçüm sonucu

Çelik Kalitesi	Sac kalınlığı (mm)	Tane Boyutu (ASTM, G)
DC04ED	0,50	8
DC04EK	0,50	10
DC04ED	0,70	9
DC04EK	0,70	9,5

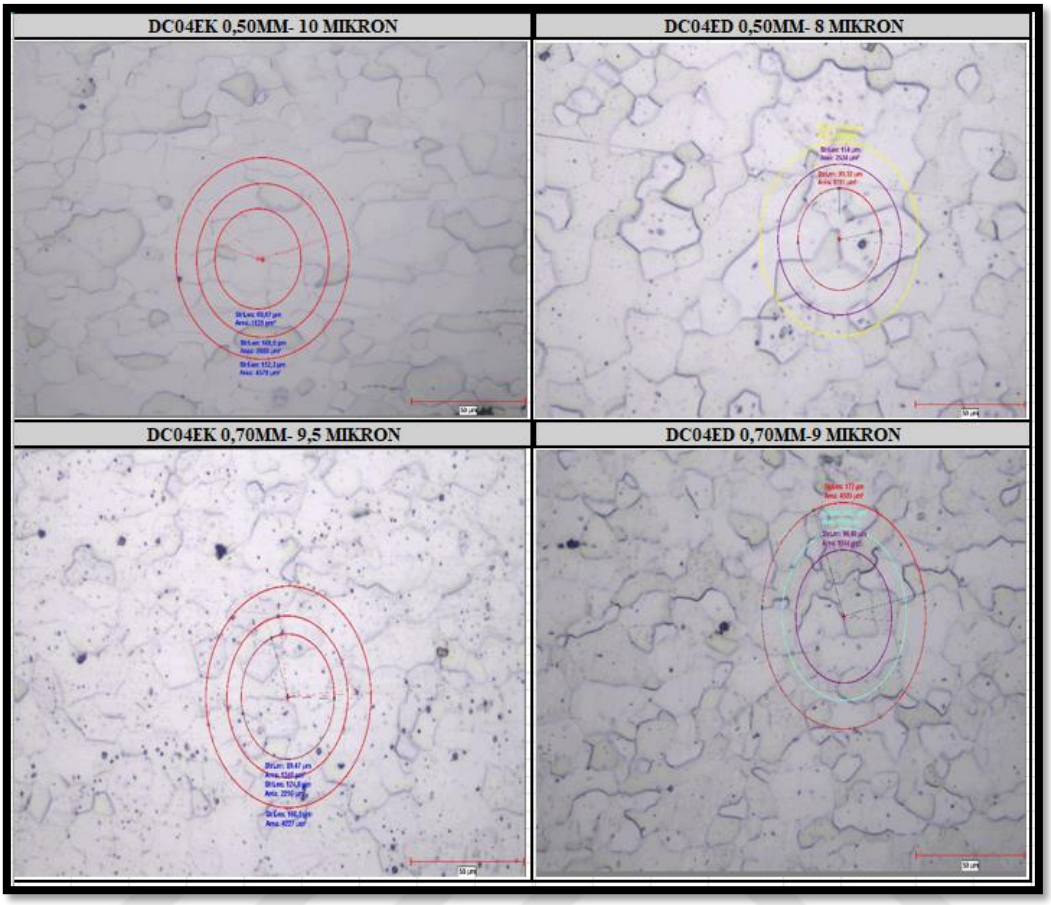
Sac kalınlığı ve çelik kalitesine göre ölçülen tane boyutu sonuçlarının grafiksel gösterimi Şekil 5.4' te ki gibidir. DC04EK kalite saclarda tane boyutunun DC04ED kalite saclara göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum da DC04EK kalite sacın şekillendirilebilirliğinin ve mukavemetinin daha iyi olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.4. Sac kalınlığı ve çelik kalitesine göre tane boyutu (ASTM, G)



Şekil 5.5. DC04EK ve DC04ED kalite sacların mikroyapı görüntüleri



Şekil 5.6. DC04EK ve DC04ED kalite sacların tane boyutu görüntüleri

Tablo 5.8. Tekdüze, rastgele yönlendirilmiş, eş eksenli tanecikler için hesaplanan tane boyutu ilişkileri

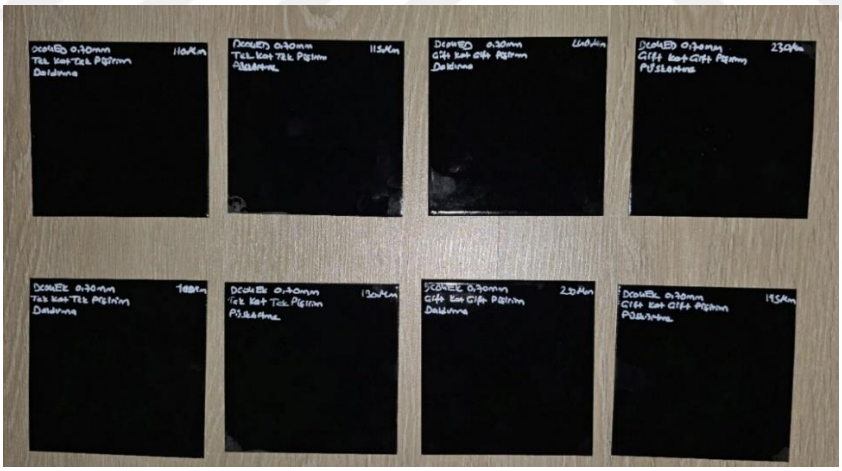
Grain Size No.	$\bar{N}_A$ Grains/Unit Area		$\bar{A}$ Average Grain Area		$\bar{d}$ Average Diameter		$\bar{\ell}$ Mean Intercept		$\bar{N}_L$
G	No./in.^{2} at 100X	No./mm^2 at 1X	mm^2	μm^2	mm	μm	mm	μm	No./mm
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

5.6. Emaye Kalınlığı Ölçümü

Daldırma ve püskürtme yöntemleriyle tek ve çift kat olarak yapılan emaye kaplanmış saclar için emaye kalınlığı ölçüm görselleri ve sonuçları Şekil 5.7’ de ve Şekil 5.8’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. 0,50mm DC04ED ve DC04EK tek ve çift kat daldırma ve püskürtme yöntemiyle kaplanmış emaye kaplama kalınlıkları

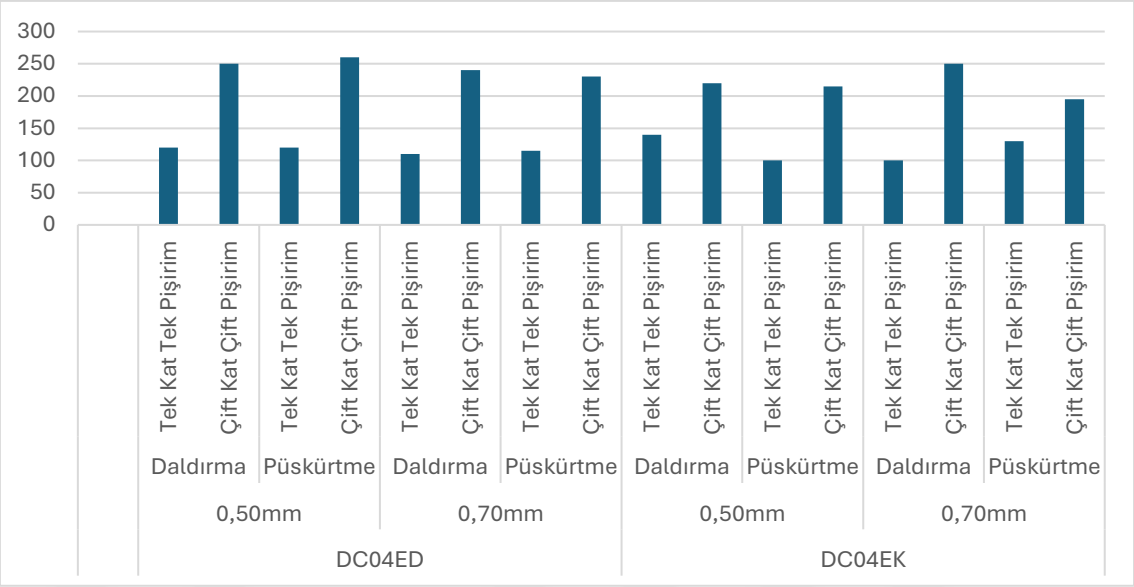


Şekil 5.8. 0,70mm DC04ED ve DC04EK tek ve çift kat daldırma ve püskürtme yöntemiyle kaplanmış emaye kalınlıkları

DC04ED ve DC04EK kalite Tek ve Çift Kat Daldırma ve Püskürtme yöntemiyle kaplanmış sacların emaye kalınlıkları ölçüm sonuçları Tablo 5.10’ da belirtilmiş olup, tek kat uygulamalarda 100-140 mikron arası; çift kat uygulamalarda 195-260mikron arası ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarının grafiksel gösterimi de Şekil 5.9’ da belirtilmiştir.

Tablo 5.9. Emaye kaplama kalınlığı ölçüm sonuçları

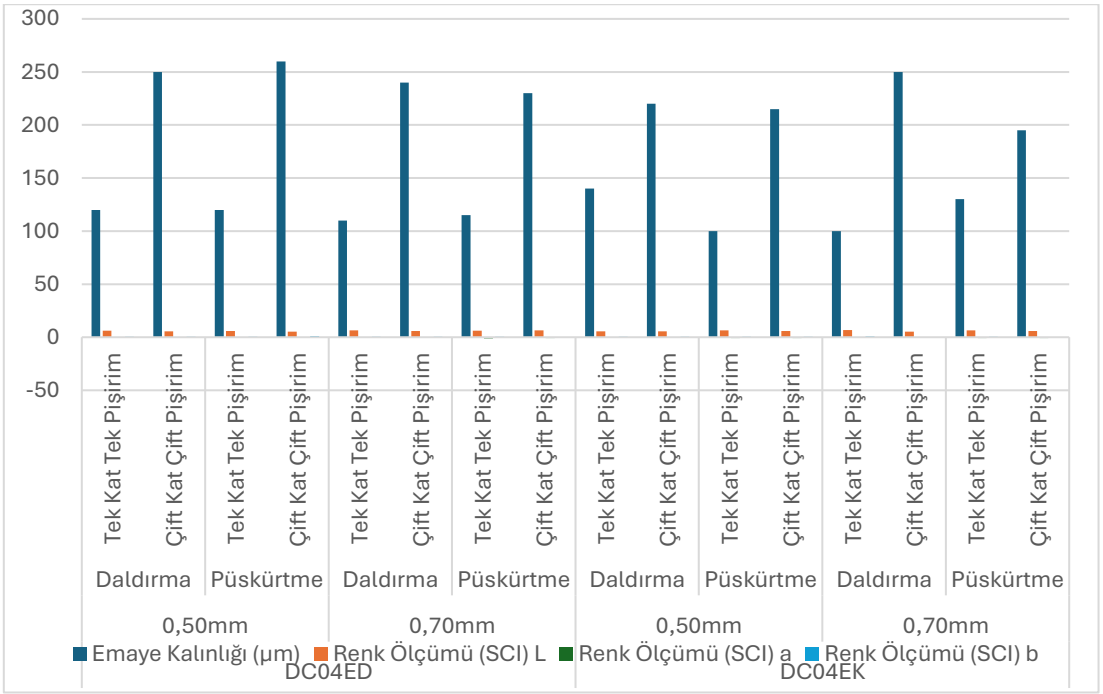
Kullanılan Emaye Tozu Kodu	Emaye Rengi	Çelik Kalitesi	Sac Kalınlığı (mm)	Uygulama Yöntemi	Uygulama ve Pişirme Tipi	Ön Pişirme Sıcaklığı (° C)	Ön Pişirme Süresi (dk)	Kürleme Sıcaklıkları (° C)	Kürleme Süresi (dk)	Emaye Kalınlığı (µm)
RTUGR2142	Siyah	DC04ED	0,50mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	120
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	İlk Kat:3 İkinci Kat:4	250
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	120
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	İlk Kat:3 İkinci Kat:4	260
			0,70mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	110
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	İlk Kat:3 İkinci Kat:4	240
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	115
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	İlk Kat:3 İkinci Kat:4	230
RTUGR2142	Siyah	DC04EK	0,50mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	140
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	İlk Kat:3 İkinci Kat:4	220
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	100
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	İlk Kat:3 İkinci Kat:4	215
			0,70mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	100
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	İlk Kat:3 İkinci Kat:4	250
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	130
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	İlk Kat:3 İkinci Kat:4	195



Şekil 5.9. Emaye kaplama kalınlığı ölçüm sonuçları (µm)

5.7. Renk Ölçümü

Emaye kaplanmış sacların renk ölçüm sonuçları Tablo 5.11' de gösterilmiş olup, uygulama kalınlığına göre renkteki değişim ölçülmüştür ve uygulama miktarına göre renk değerlerinin farklı yönlendiği görülmüştür. Şekil 5.10' da da ölçüm sonuçlarının grafiksel hali gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Emaye kaplanmış sacların renk ölçüm sonuçları (SCI)

Tablo 5.10. Emaye kaplanmış sacların renk ölçüm sonuçları

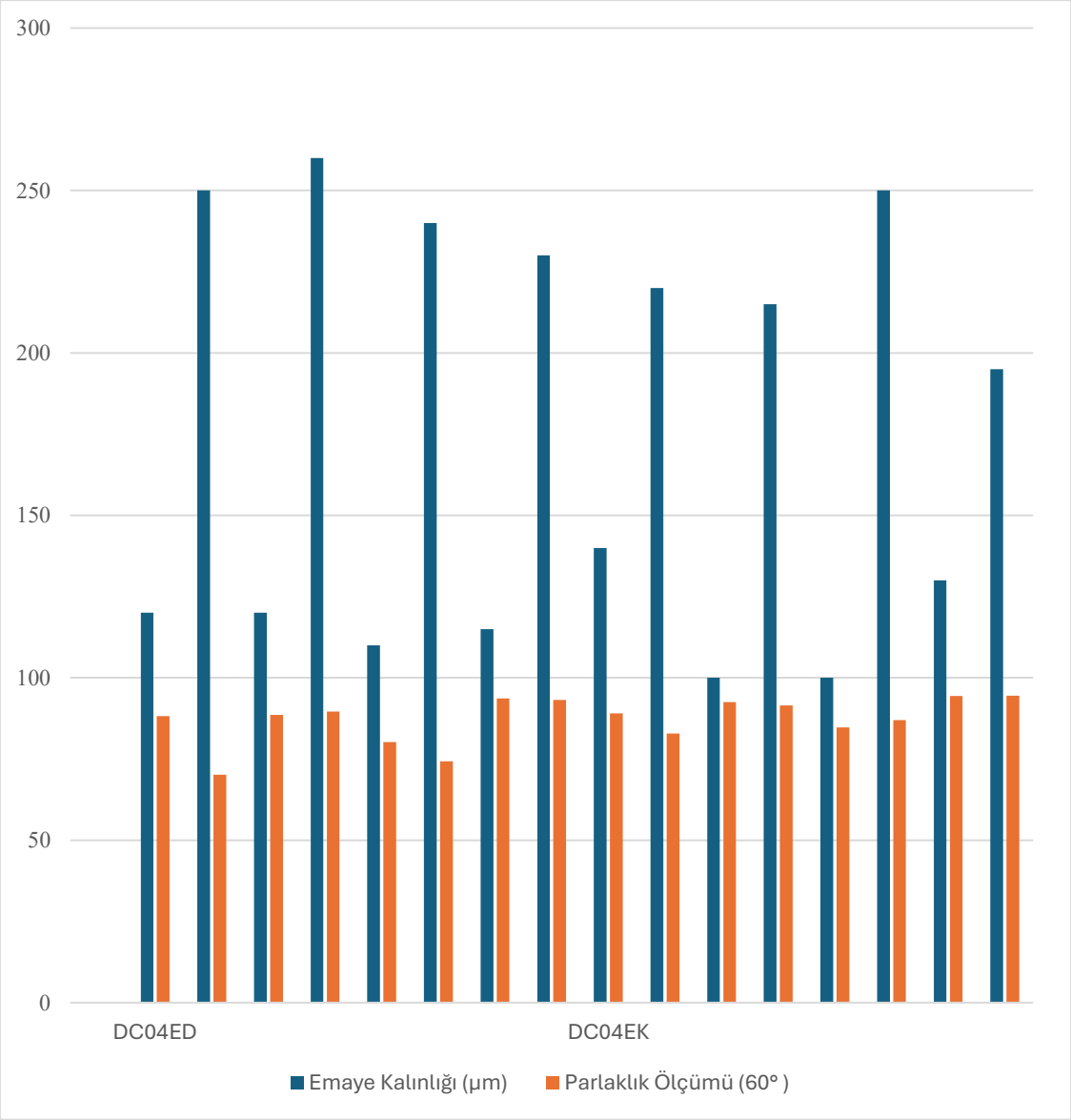
Kullanılan Emaye Tozu Kodu	Emaye Rengi	Çelik Kalitesi	Sac Kalınlığı (mm)	Uygulama Yöntemi	Uygulama ve Pişirme Tipi	Emaye Kalınlığı (µm)	Renk Ölçümü (SCI)		
							L	a	b
RTUGR2142	Siyah	DC04ED	0,50mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	120	6,08	-0,33	0,57
					Çift Kat Çift Pişirim	250	5,49	-0,24	0,38
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	120	5,93	-0,35	0,55
					Çift Kat Çift Pişirim	260	5,13	-0,55	1,08
			0,70mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	110	6,41	-0,53	0,52
					Çift Kat Çift Pişirim	240	5,84	-0,27	0,35
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	115	6,29	-0,97	0,20
					Çift Kat Çift Pişirim	230	6,32	-0,80	-0,07
RTUGR2142	Siyah	DC04EK	0,50mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	140	5,58	-0,41	0,36
					Çift Kat Çift Pişirim	220	5,68	-0,33	0,45
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	100	6,49	-0,85	0,35
					Çift Kat Çift Pişirim	215	5,75	-0,84	0,12
			0,70mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	100	6,91	-0,43	0,59
					Çift Kat Çift Pişirim	250	5,38	-0,33	-0,27
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	130	6,34	-0,71	0,06
					Çift Kat Çift Pişirim	195	5,89	-0,69	-0,28

5.8. Parlaklık Ölçümü

Emaye kaplanmış sacların uygulama kalınlıklarına göre parlaklık ölçüm sonuçları Tablo 5.12' de gösterilmiş olup, Şekil 5.11' de de grafiksel olarak sonuçlar gösterilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde yüzeydeki emaye miktarına bağlı olarak parlaklık değerinin değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

Sac yüzeyinde ölçülen parlaklık değerini emaye kaplanmış sacın yüzey pürüzlülüğü de etkilemektedir. Pürüzlülüğe bağlı olarak parlaklık değeri farklılık gösterebilmektedir.



Şekil 5.11. Emaye kaplanmış sacların parlaklık ölçüm sonuçları (60^0)

Tablo 5.11. Emaye kaplanmış sacların parlaklık ölçüm sonuçları

Kullanılan Emaye Tozu Kodu	Emaye Rengi	Çelik Kalitesi	Sac Kalınlığı (mm)	Uygulama Yöntemi	Uygulama ve Pişirme Tipi	Emaye Kalınlığı (µm)	Parlaklık Ölçümü (60°)
RTUGR2142	Siyah	DC04ED	0,50mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	120	88,2
					Çift Kat Çift Pişirim	250	70,2
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	120	88,6
					Çift Kat Çift Pişirim	260	89,6
			0,70mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	110	80,2
					Çift Kat Çift Pişirim	240	74,3
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	115	93,6
					Çift Kat Çift Pişirim	230	93,2
RTUGR2142	Siyah	DC04EK	0,50mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	140	89
					Çift Kat Çift Pişirim	220	82,8
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	100	92,5
					Çift Kat Çift Pişirim	215	91,5
			0,70mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	100	84,7
					Çift Kat Çift Pişirim	250	87
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	130	94,4
					Çift Kat Çift Pişirim	195	94,5

5.9. Sitrik Asit Dayanım Testi

Daldırma ve Püskürtme yöntemleriyle tek kat ve çift kat olarak uygulanan 0,50mm ve 0,70mm kalınlıklardaki DC04EK ve DC04ED kalite sacların sitrik asit dayanım test sonuç görselleri ve test sonuçları aşağıdaki gibidir. Kullanılan emaye tozu asit mukavim bir emaye olmadığından test sonrası tüm sac yüzeylerinde asit lekesi meydana gelmiştir.

Değerlendirme işlemi görsel olarak yapılmıştır. Test sonucunda asite maruz kalan yerlerde lekeler oluştuğu için asit dayanım sınıfı Şekil 5.12' de ve Şekil 5.13' te gösterildiği gibi B olarak değerlendirilmiştir. Ölçüm sonuçları Tablo 5.13' te belirtildiği gibidir. Emaye kaplamaların asite maruz kalan bölgelerinde renk değişikliği gözlenmiş, yapılan tüm uygulamalarda asit dayanımı zayıf tespit edilmiştir.



Şekil 5.12. 0,50mm DC04ED ve DC04EK kalite saclarda sitrik asit dayanım test sonucu görseli



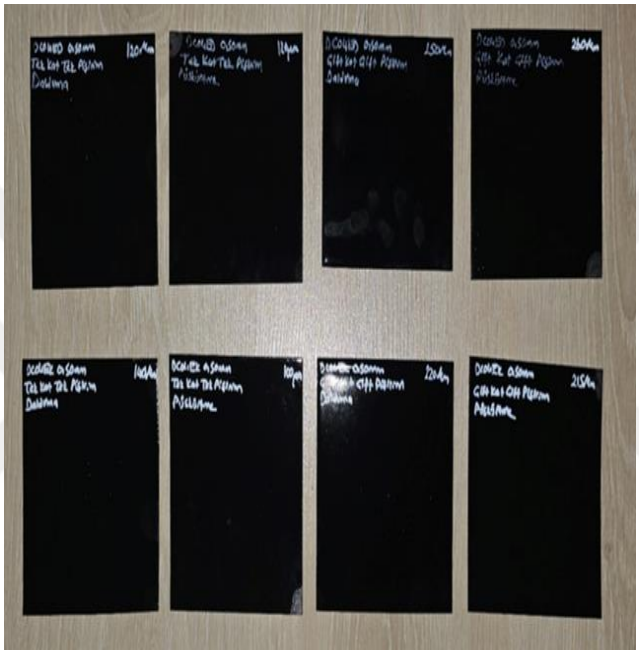
Şekil 5.13. 0,70mm DC04ED ve DC04EK kalite saclarda sitrik asit dayanım test sonucu görseli

Tablo 5.12. Emaye kaplı sacta sitrik asit dayanım testi sonuçları

Kullanılan Emaye Tozu Kodu	Emaye Rengi	Çelik Kalitesi	Sac Kalınlığı (mm)	Uygulama Yöntemi	Uygulama ve Pişirme Tipi	Asit Testi
RTUGR2142	Siyah	DC04ED	0,50mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	B
					Çift Kat Çift Pişirim	B
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	B
					Çift Kat Çift Pişirim	B
			0,70mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	B
					Çift Kat Çift Pişirim	B
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	B
					Çift Kat Çift Pişirim	B
RTUGR2142	Siyah	DC04EK	0,50mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	B
					Çift Kat Çift Pişirim	B
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	B
					Çift Kat Çift Pişirim	B
			0,70mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	B
					Çift Kat Çift Pişirim	B
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	B
					Çift Kat Çift Pişirim	B

5.10. Balık Pulu Kontrolü

DC04EK ve DC04ED kalite daldırma ve püskürtme yöntemleriyle tek kat ve çift kat uygulanmış emaye kaplamalarda; kürleme sonrası, 1 hafta sonra, 24 saat sonra, 1 ay sonra, yapılan kontrollerde hiçbir uygulamada balık pulu hatasına rastlanmamıştır. 1 aylık süre sonundaki yüzey görünümleri Şekil 5.14' te balık pulu kontrol sonuçları Tablo 5.14' te belirtilmiştir.



Şekil 5.14. 1ay süre ile bekletilen emaye kaplanmış sacların yüzey görüntüsü (1)



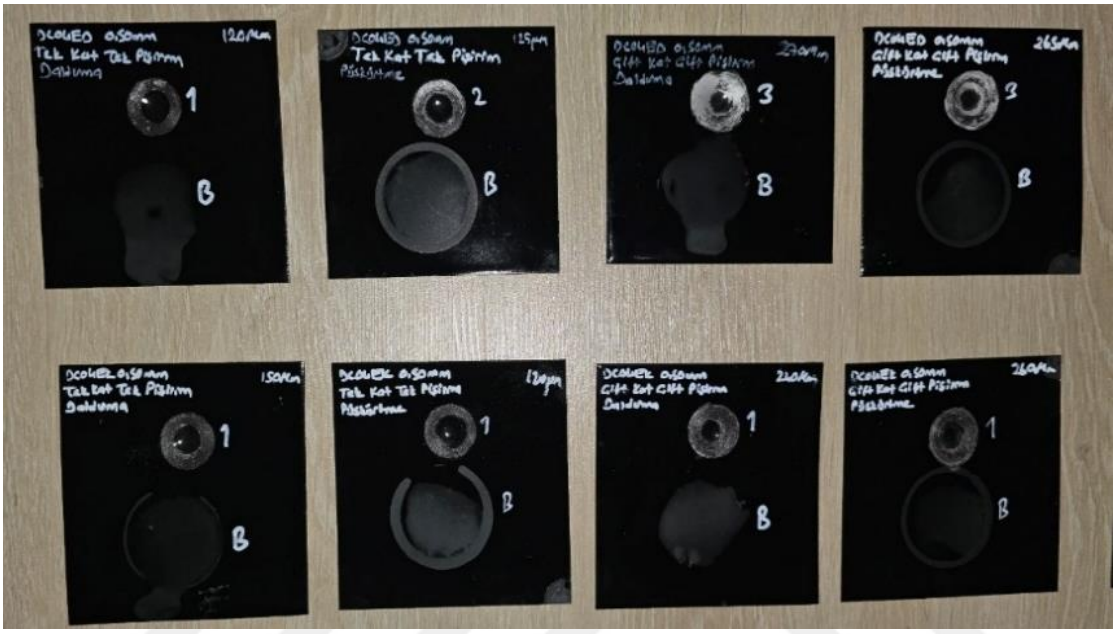
Şekil 5.15. 1ay süre ile bekletilen emaye kaplanmış sacların yüzey görüntüsü (2)

Tablo 5.13. Emaye Kaplı Sacta Balık Pulu Kontrol Sonuçları

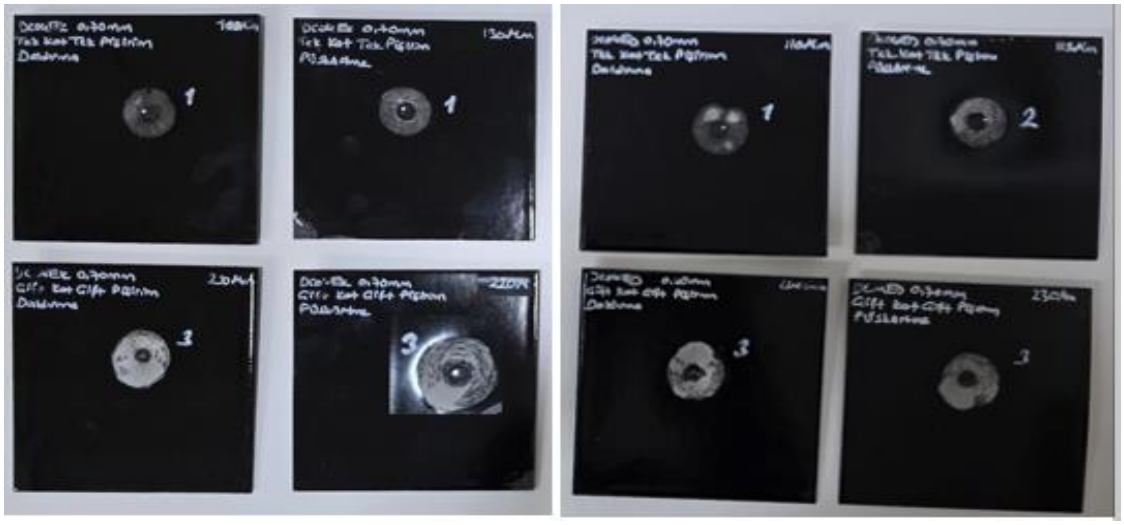
Kullanılan Emaye Tozu Kodu	Emaye Rengi	Çelik Kalitesi	Sac Kalınlığı (mm)	Uygulama Yöntemi	Uygulama ve Pişirme Tipi	Ön Pişirme Sıcaklığı (° C)	Ön Pişirme Süresi (dk)	Kürleme Sıcaklıkları (° C)	Kürleme Süresi (dk)	Emaye Kalınlığı (µm)	Balık Pulu Kontrolü			
											Kürleme Sonrası	24 Saat Sonrası	1 Hafta Sonrası	1 Ay Sonrası
RTUGR2142	Siyah	DC04ED	0,50mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	120	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	3 4	250	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	120	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	3 4	260	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok
			0,70mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	110	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	3 4	240	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	115	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	3 4	230	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok
RTUGR2142	Siyah	DC04EK	0,50mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	140	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	3 4	220	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	100	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	3 4	215	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok
			0,70mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	100	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	3 4	250	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	130	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	3 4	195	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok	Balık Pulu Yok

5.11. Darbe ve Yapışma Testi

Daldırma ve Püskürtme yöntemleri kullanılarak tek kat ve çift kat olarak uygulanan DC04EK ve DC04ED kalite saclara yapılan darbe testi sonrası yapışma dereceleri ve görselleri Şekil 5.16 ve Şekil 5.17' da verilmiştir.



Şekil 5.16. 0,50mm DC04EK ve DC04ED yapışma test görselleri

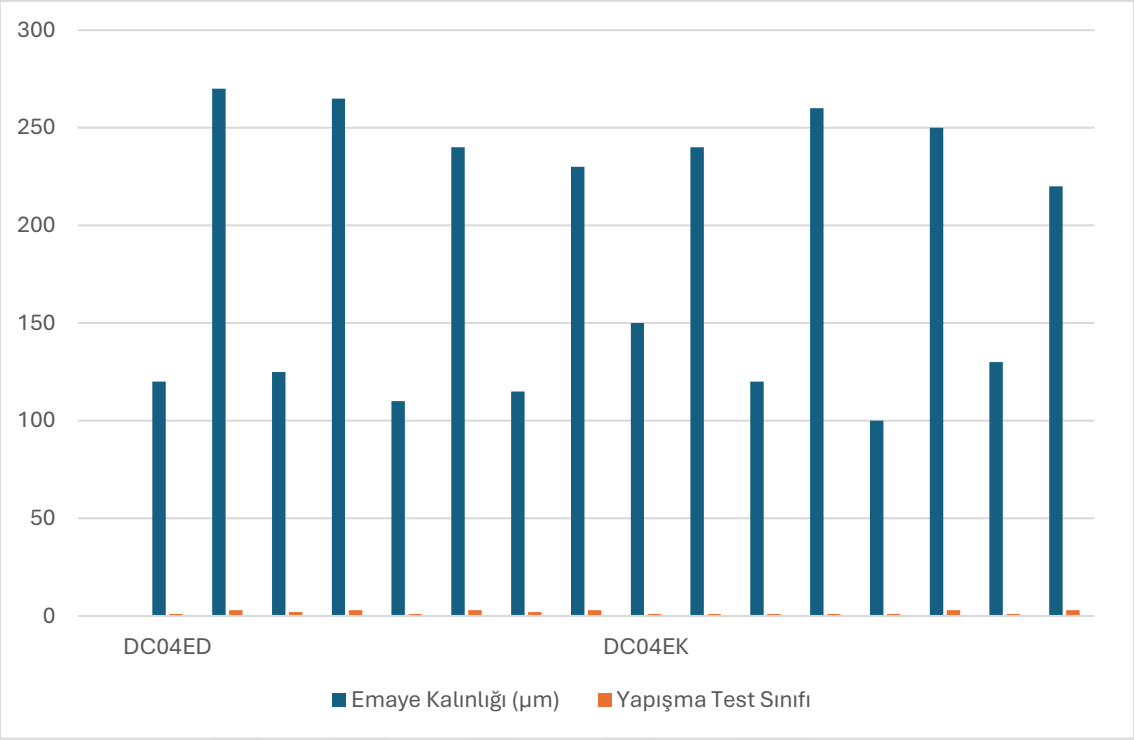


Şekil 5.17. 0,70mm DC04EK ve DC04ED yapışma test görselleri

Sac kalınlığına göre uygulanan darbe testi sonrası yapışma dereceleri Tablo 5.15' te, sonuçların grafiksel gösterimi de Şekil 5.18' de verilmiştir.

Tablo 5.14. Emaye kaplanmış sacların yapışma test sınıfları

Kullanılan Emaye Tozu Kodu	Emaye Rengi	Çelik Kalitesi	Sac Kalınlığı (mm)	Uygulama Yöntemi	Uygulama ve Pişirme Tipi	Ön Pişirme Sıcaklığı (° C)	Ön Pişirme Süresi (dk)	Kürleme Sıcaklıkları (° C)	Kürleme Süresi (dk)	Emaye Kalınlığı (µm)	Darbe Yüksekliği (mm)	Yapışma Test Sınıfı
RTUGR2142	Siyah	DC04ED	0,50mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	120	750	1
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	3 4	270	750	3
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	125	750	2
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	3 4	265	750	3
			0,70mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	110	300	1
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	3 4	240	300	3
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	115	300	2
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	3 4	230	300	3
RTUGR2142	Siyah	DC04EK	0,50mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	150	750	1
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	3 4	240	750	1
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	120	750	1
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	3 4	260	750	1
			0,70mm	Daldırma	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	100	300	1
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	3 4	250	300	3
				Püskürtme	Tek Kat Tek Pişirim	200	10	830	4	130	300	1
					Çift Kat Çift Pişirim	200	10	İlk Kat: 830 İkinci Kat: 820	3 4	220	300	3



Şekil 5.18. Emaye kaplanmış sacların yapışma testi sonuçları

Tablo 5.15' e göre yapılan test sonuçları incelendiğinde:

-0,50mm DC04EK kalitenin tüm uygulamalarının tamamında mükemmel bir yapışma görülmektedir. Yapışma sınıfı 10209 standardı değerlendirme tablosuna göre "1" dir.
-0,50mm DC04ED kalitenin daldırma yöntemiyle tek kat uygulanmış emaye sacında yapışma sınıfı "1"; püskürtme yöntemiyle tek kat uygulanmış emaye sacında yapışma sınıfı "2"; daldırma ve püskürtme yöntemleriyle çift kat uygulama yapılmış emaye sacında yapışma sınıfı "3" olarak değerlendirilmiştir. 0,50mm DC04ED kalite sacın yapışma performansının 0,50mm DC04EK kalite saca göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
-0,70mm DC04EK kalitenin daldırma ve püskürtme yöntemleriyle tek kat uygulama yapılmış saclarında yapışma sınıfı "1"; çift kat uygulamalarında "3" olarak değerlendirilmiştir. Tek kat daldırma püskürtme uygulamalarında yapışma performansının daha iyi olduğu görülmektedir.
-0,70mmDC04ED kalitenin daldırma yöntemiyle tek kat uygulanmış emaye sacında yapışma sınıfı "1"; püskürtme yöntemiyle tek kat uygulanmış emaye sacında yapışma sınıfı "2"; daldırma ve püskürtme yöntemleriyle çift kat uygulama yapılmış emaye sacında yapışma sınıfı "3" olarak değerlendirilmiştir. 0,50mm DC04ED kalite ile aynı

derecede yapışma performansı sergilemiştir. 0,70mm DC04ED kalite sacın yapışma performansının 0,70mm DC04EK kalite saca göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak en iyi yapışma performansına sahip olan çalışmanın 0,50mm DC04EK' nın tüm uygulamalarında görüldüğü sonucuna varılmıştır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Emaye kaplama işlemlerinde doğrudan emaye kaliteye uygun DC04EK ve DC04ED kalite saclar kullanılmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan sac ve emayenin performansını ve uygunluğunu test etmek için 0,50mm ve 0,70mm kalınlığında saclar kullanılmıştır. Daldırma ve püskürtme yöntemleri ile emayeler sac yüzeyine tek kat ve çift kat uygulanmıştır. Çalışmada emaye yaş olarak uygulanmış, Nikel bileşimli bir emaye tozu kullanılmıştır.

Sacların karakterizasyonunu belirlemek emaye kaplamaya uygunluğunu test etek için Çekme testi, Kimyasal Analiz, Pürüzlülük Ölçümü, Sertlik Ölçümü ve Mikroyapı Analizleri yapılmıştır. Sacların emaye kaplamaya uygun olduğu tespit edilmiştir.

Emaye tozunun sac yüzeyine yapışma performansını ve yüzey uygunluğunu test etmek için emaye kaplama işlemleri yaş emaye karışımı hazırlanarak sac yüzeyine Daldırma ve Püskürtme yöntemleriyle tek kat ve çift kat uygulanmıştır. Önce emaye kaplanmış sac numuneleri 200°C' ye setli etüvde bisküvi kıvamına gelene kadar kurutulmuş, daha sonra tek kat uygulama 830°C kürleme sıcaklığında 4dk; çift kat uygulama ilk kat 830°C 3dk 2. kat 820°C 4dk olarak yapılmıştır. Uygulama sonrası emaye kaplama kalınlıkları ölçülmüş, arkasından renk ve parlaklık ölçümleri ile Sitrik Asit Dayanım testi yapılmıştır. Emaye yapışma mukavim bir yapıda olduğundan Sitrik asit dayanımı zayıf ölçülmüştür.

Emaye kaplamanın yüzey uygunluğunu test etmek için uygulama sonrası, 24 saat sonrası, 1 hafta sonrası ve 1 ay sonrasında yüzey kontrolleri yapılmış; yüzeyde Balık Pulu, Kabarcık, Karbon Kaynaması gibi yüzey kusurlarına rastlanmamıştır.

Emayenin yüzeye yapışma performansını test etmek için TS EN 10209 standardına göre darbe testi uygulanarak yapışma dereceleri değerlendirilmiştir. En iyi yapışma performansına sahip olan çalışmanın 0,50mm DC04EK' nın tüm uygulamalarında görüldüğü sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

Altınbay, B. (2007). Titan Beyazı Emayelerin Kimyasal Dayanımının Arttırılması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 213540.

Amerikan Malzeme ve Testler Derneği (2024). *ASTM E 112: Ortalama Tane Boyutunu Belirlemek İçin Standart Test Yöntemleri,* https://store.astm.org/e0112-24.html (Ziyaret tarihi: 15 Mayıs 2025).

Asaad, O. S., Farag, M.ve Helmy, Y. (2024). Efficiency of three different fluoride varnishes on enamel remineralization of primary teeth: An in vitro study. *Dental Science Updates*, *5*(1), 205–214.

Ayyıldız, S., Varol, T.ve Pürçek, G. (2021). Al7075 alaşımına uygulanan dekoratif krom kaplama tabakasının karakterizasyonu. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, *7*(1), 132–140.

Çavuşoğlu, A. (2011). Emaye Okulu Ders Notları. *II. International Ceramic, Glass, Porcelain Enamel, Glaze and Pigment Congress,* Eskişehir, Türkiye, 12- 14 Ekim 2011.

Danesh, G., Podstawa, P. K. K., Schwartz, C., Kirschneck, C., Bizhang, M.ve Arnold, W. H. (2020). Depth Of Acid Penetration And Enamel Surface Roughness Associated With Different Methods Of İnterproximal Enamel Reduction. *PLOS ONE*, *15*(3), e0229595. DOI: 10.1371/journal.pone.0229595

Deng, S., Liang, Z., Guo, T., Gui, Y., ve Zhao, Q. (2023). Investigation Of Enamel Coatings Failure İn Desulfurization Flue Gas. *Engineering Failure Analysis*, *147,* 107141.

Durmuşoğlu, Y. (2009). Emayeleme ve Oluşabilecek Hatalar, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 244057.

Edige, E. (2011). Emaye Okulu Ders Notları. *II. International Ceramic, Glass, Porcelain Enamel, Glaze and Pigment Congress,* Eskişehir, Türkiye, 12- 14 Ekim 2011.

Elkoca, O.ve Çimen, D. (2017). Set Üstü Ocak Uygulamaları İçin Emaye İşlemine Uygun Sıcak Haddelenmiş Bir Çelik Kalitesinin Geliştirilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *5*(1), 1–9.

Evcimen, N. (2007). Emaye Üretiminde Kaplama ve Özelliklerin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 213321.

Faust, W. D., Andrews, A. I.ve Pagliuca, S. (2012). *Porcelain (Vitreous) Enamels and Industrial Enamelling Processes*. Aurora, OH: Porcelain Enamel Institute.

Gençer, A. (2006). Antibakteriyel Oksit Tozlarının Emaye Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 198442.

Gouda, M., El-Sayed, A.ve Ahmed, A. (2014). Microstructure and adherence of vitreous enamel to low carbon steel. *Surface and Coatings Technology*, *240,* 290–296. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.12.042

Hellak, A., Ebeling, J., Schauseil, M., Stein, S., Roggendorf, M. J.ve Korbmacher-Steiner, H. (2016). Shear Bond Strength Of Three Orthodontic Bonding Systems On Enamel And Restorative Materials. *BioMed Research International*, *2016,* 6307107. DOI: 10.1155/2016/6307107

Işıksaçan, Ö. (2020). Taban Malzeme ile Emaye Kaplama Arasındaki Difüzyon Mekanizmasının Araştırılması ve Düşük Metal Migrasyonuna Sahip Emaye Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 650302.

Karagöz, R. (2009). Emaye Malzemelere Fotokatalitik Özelliğin *kazandırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 237271.

Karasu, B., Saçkan, İ., ve Taplı, M. (2020). *Emayenin Dünü ve Bugünü*. *El-Cezeri*, *7*(2), 923-939.

Kaya, T. N.ve Ayday, A. (2023). Islatma Açısı Arttırılarak Emaye Kaplı Parçaların Gıda Temasında Yapışmazlık Özelliğinin Geliştirilmesi. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, *9*(2), 352–360.

Keskin, M., Setlek, P., Demir, S. (2017), *Renk Ölçüm Sistemlerinin Gıda Bilimleri ve Tarımda Kullanım Alanları*, International Advanced Researches & Engineering Congress, Osmaniye, Türkiye, 16-18 Kasım 2017.

Koç, A., Gündüz, M., ve Şahintürk, B. (2020). *Emaye Çelikleri ve Erdemir'de Üretimi.* Ereğli: Erdemir Teknik Yayınları.

Majumdar, A.ve Jana, S. (2001). Glass And Glass–Ceramic Coatings: Versatile Materials For İndustrial And Engineering Applications. *Bulletin of Materials Science*, *24*(1), 69–77. https://doi.org/10.1007/BF02704843

Maskall, K. A.ve White, D. (1986). *Vitreous Enamelling: A Guide to Modern Enamelling Practice*. Oxford: Pergamon Press.

Medvedovski, E.ve Leal Mendoza, G. (2023). Enamel (Glassy) Coatings For Steel Protection Against High Temperature Corrosion. *Advances in Applied Ceramics*, *122*(3–4), 145–169. DOI:10.1080/17436753.2023.2231699CoLab+2Taylor & Francis Online+2SAGE Journals+2

Moss, R. I. (1985). Test Methods For The Porcelain Enameling İndustry. içinde W. J. Smothers (Ed.), *Proceedings of the 46th Porcelain Enamel Institute Technical Forum* (427–430). The American Ceramic Society. DOI:10.1002/9780470320273

Müller, M., Hromasová, M., Valášek, P., Nováková, I., Moravec, J.Ve Jelínek, M. (2023). Tribological Behaviour of Enamel Coatings Created By A Prototype Device For Local Repair Of İnorganic Surfaces. *Materials*, *16*(3), 1224. https://doi.org/10.3390/ma16031224

Paytuncu, S. (2011). Emaye okulu ders notları. *II. International Ceramic, Glass, Porcelain Enamel, Glaze and Pigment Congress,* Eskişehir, Türkiye, 12- 14 Ekim 2011.

Rossi, S., Russo, F., ve Calovi, M. (2021). Durability of Vitreous Enamel Coatings And Their Resistance To Abrasion, Chemicals, And Corrosion: A Review. *Journal of Coatings Technology and Research*, *18,* 39-52.

Rossi, S., ve Scrinzi, E. (2013). Evaluation of the Abrasion Resistance Of Enamel Coatings. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *68*, 74-80.

Samiee, L., Sarpoolaky, H., ve Mirhabibi, A. (2007). Microstructure and adherence of cobalt containing and cobalt free enamels to low carbon steel. *Materials Science and Engineering: A*, *458*(1–2), 88–95. DOI: 10.1016/j.msea.2006.12.103

Scrinzi, E., ve Rossi, S. (2010). The Aesthetic And Functional Properties of Enamel Coatings On Steel. *Materials ve Design*, *31*(9), 4138-4146.

Șerbănoiu, D., Vartolomei, A., Ghiga, D., Moldovan, M., Saroşi, C., Petean, I. ve Păcurar, M. (2024). A Comparative Analysis Of Enamel Surface Roughness Following Various İnterproximal Reduction Techniques: An Examination Using Scanning Electron Microscopy And Atomic Force Microscopy. *Biomedicines*, *12*(8), 1629. DOI:10.3390/biomedicines12081629

Tang, F., Chen, G., Brow, R. K., ve Koenigstein, M. L. (2017). Corrosion Resistances Of Steel Pipes İnternally Coated With Enamel. *Journal of Materials Engineering and Performance, 26*(7), 3274–3281

Tang, F., Chen, G., Brow, R. K., Volz, J. S., ve Koenigstein, M. L. (2012). Corrosion resistance and mechanism of steel rebar coated with three types of enamel. *Corrosion Science*, *59*, 157-168.

Türk Standartları Enstitüsü. (2020). *Metalik Malzemeler– Çekme Deneyi – Bölüm 1: Ortam Sıcaklığında Deney Yöntemi (ISO 6892-1:2019).* Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü. (2023). *Soğuk Haddelenmiş Düşük Karbonlu Çelik Yassı Mamuller – Camsı Emaye İçin – Teknik Teslim Şartları* (*TS EN 10209)* Ankara.

Türkel, E., Çalışkan Güneş, P., ve Babayiğit, E. (2024). Bakır Yüzeylerde Renkli Emaye Uygulamaları. *The Journal of Academic Social Science, 154*(154), 19-42

Uzun, R. (2022). Emaye Kaplamaya Uygun Saclarda Üretim Proses Parametrelerinin Şekillendirme Performansı ve Hidrojen Geçirgenlik Direnci Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 744393.

Yılmaz, E. (2014). Taban Malzeme–Emaye Arayüz İlişkilerinin Emaye Kalitesine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 353709.

Yu, L., Deng, L., He, X.ve Li, C. (2021). Corrosion of the WC-12Co and Enamel Coatings İn Liquid Zn-55Al alloy at 640 °C. *Journal of Materials Science & Technology*, *75*, 1–9. DOI: 10.1016/j.jmst.2020.11.056

Zhang, A., Jiang, Z., Jiao, S.ve Wei, D. (2011). Microstructure And Adherence Of Vitreous Enamel To Low Carbon Steel. *International Journal of Surface Science and Engineering*, *5*(5–6), 369–380. DOI:10.1504/IJSURFSE.2011.044390

Zhao, J., Wang, B., Pan, Y., Wang, W.ve Zhao, C. (2021). Molecular Dynamics Simulation On Wetting Behaviors Of N-Octane And Water Droplets On Polytetrafluoroethylene Surfaces. *Chemical Physics Letters*, *785,* 139161. DOI: 10.1016/j.cplett.2021.139161

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Şeyda, E., Yıldız, M. (2025). DC04EK ve DC04ED Kalite Saclarda Emaye Kaplama İşlemleri, Emaye Kalite ve Performansının İyileştirilmesi, *14. Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi IMASCON,* Kocaeli, 16-17 Mayıs 2025.

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise eğitimini Malatya'da tamamladı. İnönü Üniversitesi Kimya Mühendisliği bölümünden 2015 yılında mezun oldu. 2018'den bu yana Yıldız Demir Çelik A.Ş firmasında Laboratuvar Kıdemli Mühendisi olarak çalışmaya devam etmektedir.