

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**SICAK DALDIRMA YÖNTEMİYLE ALUMİNYUM KAPLANMIŞ TOZ  
METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN TAKIM ÇELİKLERİNİN AŞINMA  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Burak BİLİM**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Malzeme Mühendisliği Programı**

**EKİM 2021**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**SICAK DALDIRMA YÖNTEMİYLE ALUMİNYUM KAPLANMIŞ TOZ  
METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN TAKIM ÇELİKLERİNİN AŞINMA  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Burak BİLİM  
(506171406)**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Malzeme Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN**

**EKİM 2021**



İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 506171406 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Burak BİLİM, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “SICAK DALDIRMA YÖNTEMİYLE ALUMİNYUM KAPLANMIŞ TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN TAKIM ÇELİKLERİNİN AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN** .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU** .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Dr. Öğretim Üyesi Selim YILDIRIM** .....

İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa

**Teslim Tarihi : 05 Ekim 2021**  
**Savunma Tarihi : 28 Ekim 2021**





*Aileme,*



## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez araştırma konumun belirlenmesinde ve çalışmamın hazırlanma sürecinin her adımında tecrübesini, bilgilerini ve değerli zamanını benden esirgmeden maddi ve manevi her türlü desteği sağlayarak, yol göstererek hem ilham kaynağımız hem de farklı bir bakış açısı kazanmamıza yardımcı olan değerli hocam Sn Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN'a önerileri ve çalışmamıza kattığı değerli görüşleri için Sn. Prof.Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU'na ve Sn. Dr. Öğr. Üyesi Selim YILDIRIM'a teşekkürü bir borç bilirim.

Üniversitemizin laboratuvarlarında deneysel çalışmalarım boyunca tecrübeleriyle bana yardımcı olan ve beni motive ederek çalışmalarımın ilerleyişinde büyük katkısı olan, Dr. Öğr. Üyesi Yakup YÜREKTÜRK'e, Dr. Faiz MUHAFFEL'e, Arş.Gör. Doğukan ÇETİNER'e ve Arş. Gör. Mertcan KABA'ya teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımda kullandığım toz metalurjisi takım çeliklerinin temini konusundaki yardımlarından dolayı değerli arkadaşım ve meslektaşım Anıl ÇALIŞKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca deneysel çalışmalarımaya yaptığı yardımlardan dolayı Arş. Gör. Ahmet KAVUKCU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her zaman arkamda duran, ilgilerini ve sevgilerini daima hissettiğim AİLEME teşekkür ederim.

Ekim 2021

Burak BİLİM  
(Metalurji ve Malzeme Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
SEMBOLLER .....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY .....	xxiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. TAKIM ÇELİKLERİ .....</b>	<b>3</b>
2.1 Takım Çeliklerinin Genel Özellikleri.....	3
2.2 Takım Çeliklerinin Sınıflandırılması.....	4
2.3 Takım Çeliklerinin Üretim Prosesleri .....	6
2.3.1 Geleneksel takım çeliği üretimi .....	6
2.3.2 Osprey prosesi .....	8
2.3.3 Toz metalurjisi ile üretilen takım çelikleri.....	8
2.4 Takım Çeliklerine Alaşım Elementlerinin Etkisi .....	10
2.5 ASP 2005 ve ASP 2012 Kalite Takım Çelikleri ve Uygulama Alanları.....	12
<b>3. ALÜMİNYUM KAPLAMA İŞLEMLERİ .....</b>	<b>15</b>
3.1 Alüminyum Kaplama Yöntemleri .....	15
3.2 Sıcak Daldırma Yöntemi ile Alüminyum Kaplama .....	16
3.3 Kaplama İşleminde Etkili Olan Faktörler .....	19
3.4 Uygulama Alanları ve Avantajları .....	19
<b>4. TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN TAKIM ÇELİKLERİNE UYGULANAN KAPLAMALAR.....</b>	<b>21</b>
<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>25</b>
5.1 Numune Hazırlama İşlemleri .....	25
5.2 Sıcak Daldırma Yöntemi ile Alüminyum Kaplama İşlemi .....	26
5.3 Difüzyon Tavlama .....	26
5.4 Metalografik İşlemler .....	27
5.5 XRD Analizleri.....	28
5.6 Mikrosertlik Deneyleri .....	28
5.7 Yapışma Deneyleri .....	29
5.8 Aşınma Deneyleri.....	29
5.9 Profilometre Ölçümleri.....	30
5.10 Korozyon Deneyleri .....	30
<b>6. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....</b>	<b>31</b>
6.1 Takım Çelikleri ve Kaplama Tabakalarının Mikroyapısı.....	31
6.2 Sertlik Deneyi Sonuçları .....	55
6.3 Yapışma Deney Sonuçları .....	57
6.4 Aşınma Deneyi Sonuçları.....	59

6.5 Korozyon Deney Sonuçları .....	74
<b>7. GENEL SONUÇLAR .....</b>	<b>79</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>83</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>87</b>



## KISALTMALAR

<b>CVD</b>	: Kimyasal Buhar Biriktirme
<b>DT</b>	: Difüzyon Tavlama
<b>EDS</b>	: Enerji Dağılım Spektroskopisi
<b>ESR</b>	: Elektro Cüruf Ergitme
<b>HB</b>	: Brinell Sertlik Değeri
<b>HDA</b>	: Hot Dip Aluminizing
<b>HIP</b>	: Sıcak İzostatik Presleme
<b>PVD</b>	: Fiziksel Buhar Biriktirme
<b>SDA</b>	: Sıcak Daldırma Yöntemiyle Alüminyum Kaplama
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskopu
<b>SV</b>	: Su Verme
<b>TM</b>	: Toz Metalurjisi
<b>VAR</b>	: Vakumlu Ark Ergitme
<b>XRD</b>	: X-Işın Difraksiyonu
<b>MPS</b>	: Korozyon hızı birimi ( mil per year )



## SEMBOLLER

- $^{\circ}\text{C}$  : Santigrat Derece  
 $\mu$  : Mikron  
 $E_{\text{kor}}$  : Korozyon Potansiyeli  
 $I_{\text{kor}}$  : Korozyon Akım Yoğunluğu  
 $T$  : Sıcaklık





## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 2.1</b> : Takım çeliklerinin sınıflandırılması .....	<b>4</b>
<b>Çizelge 2.2</b> : ASP 2005 kalite takım çeliğinin kimyasal bileşimi (% ağı.) .....	<b>12</b>
<b>Çizelge 2.3</b> : ASP 2005 kalite takım çeliğinin fiziksel özellikleri .....	<b>12</b>
<b>Çizelge 2.4</b> : ASP 2012 kalite takım çeliğinin kimyasal bileşimi (% ağı.) .....	<b>13</b>
<b>Çizelge 2.5</b> : ASP 2012 kalite takım çeliğinin fiziksel özellikleri .....	<b>13</b>
<b>Çizelge 5.1</b> : Kaplama işleminde kullanılan alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (% ağı.).....	<b>26</b>
<b>Çizelge 6.1</b> : ASP 2005 kalite çeliğin nominal kimyasal bileşimi (% ağı.).....	<b>31</b>
<b>Çizelge 6.2</b> : ASP 2012 kalite çeliğin nominal kimyasal bileşimi (% ağı.).....	<b>34</b>
<b>Çizelge 6.3</b> : Yapışma deneyi sonuçlarının HF skalasına göre gösterimi. ....	<b>58</b>
<b>Çizelge 6.4</b> : Numunelerin aşınma hızı değerleri. ....	<b>72</b>
<b>Çizelge 6.5</b> : Numunelerin korozyon potansiyeli, korozyon hızı ve korozyon akım yoğunluğu değerleri. ....	<b>76</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 2.1</b> : Yüksek kaliteli çelik üretim akış şeması .	<b>6</b>
<b>Şekil 2.2</b> : Toz metalurjisi üretim akış şeması	<b>9</b>
<b>Şekil 3.1</b> : Giydirme (cladding) yönteminin şematik gösterimi .	<b>16</b>
<b>Şekil 3.2</b> : AISI 321 kalite çeliğe uygulanan difüzyon tavlamasından (a) önce ve (b) sonra alüminyum kaplama tabakası kesitinin SEM fotoğrafı	<b>17</b>
<b>Şekil 3.3</b> : Difüzyon tavlaması uygulanmış AISI 321 kalite çeliğin kaplama tabakası kesitinin yüksek büyütme SEM fotoğrafı	<b>18</b>
<b>Şekil 3.4</b> : AISI H13 kalite çeliğin kaplama tabakası kesitinin SEM fotoğrafı	<b>19</b>
<b>Şekil 4.1</b> : Toz metalurjisi ile üretilen Vanadis 10 kalite takım çeliğinin kaplama tabakasındaki katmanların şematik gösterimi	<b>22</b>
<b>Şekil 4.2</b> : Farklı kaplama tabakalarına sahip su verilmiş ve temperlenmiş Vanadis 10 kalite takım çeliğinin yüzeyinin Rockwell C yapışma deneyi sonrası SEM fotoğrafları (a) film tabakalı, (b) %5 N <sub>2</sub> ve film tabakalı, (c) % 25 N <sub>2</sub> ve film tabakalı	<b>22</b>
<b>Şekil 4.3</b> : Farklı yüzey işlemleri uygulanan Vanadis 10 kalite takım çeliğinin aşınma katsayısı ve sürtünme katsayısının uygulanan işleme göre değişimi	<b>23</b>
<b>Şekil 5.1</b> : MF – 1000 elektrikli ergitme ocağı.	<b>26</b>
<b>Şekil 5.2</b> : Protherm PLF 120/5 elektrikli fırın.	<b>27</b>
<b>Şekil 5.3</b> : (a) Hitachi TM – 1000 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve (b) Nikon Eclipse LV150L optik mikroskop.	<b>28</b>
<b>Şekil 5.4</b> : GBC MMA 027 model X – Işınları cihazı.	<b>28</b>
<b>Şekil 5.5</b> : Wilson Tukon 1102 sertlik testi cihazı.	<b>29</b>
<b>Şekil 5.6</b> : TRIBOTester karşıt hareketli aşınma cihazı.	<b>29</b>
<b>Şekil 5.7</b> : Veeco Dektak 150 profilometre cihazı.	<b>30</b>
<b>Şekil 6.1</b> : ASP 2005 kalite çeliğin mikroyapı fotoğrafları (a) Optik mikroskop ve (b) SEM.	<b>31</b>
<b>Şekil 6.2</b> : ASP 2005 kalite çeliğin mikroyapısının SEM fotoğrafı ve EDS elementel haritalama analizi fotoğrafları.	<b>32</b>
<b>Şekil 6.3</b> : ASP 2005 kalite çeliğin XRD paterni.	<b>33</b>
<b>Şekil 6.4</b> : ASP 2012 kalite çeliğin mikroyapı fotoğrafları (a) Optik mikroskop ve (b) SEM.	<b>34</b>
<b>Şekil 6.5</b> : ASP 2012 kalite çeliğin mikroyapısının SEM fotoğrafı ve EDS elementel haritalama analizi fotoğrafları.	<b>35</b>
<b>Şekil 6.6</b> : ASP 2012 kalite çeliğin XRD paterni.	<b>36</b>
<b>Şekil 6.7</b> : SDA uygulanmış (a) ve (b) ASP 2005, (c) ve (ç) ASP 2012 kalite çeliklerin optik mikroskop fotoğrafları.	<b>36</b>
<b>Şekil 6.8</b> : SDA uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin XRD paterni.	<b>37</b>
<b>Şekil 6.9</b> : SDA uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin XRD paterni.	<b>37</b>

<b>Şekil 6.10</b> : SDA + DT uygulanmış (a) ve (b) ASP 2005, (c) ve (ç) ASP 2012 kalite çeliklerin optik mikroskop fotoğrafları. ....	<b>38</b>
<b>Şekil 6.11</b> : SDA + DT uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin XRD paterni. ....	<b>39</b>
<b>Şekil 6.12</b> : SDA + DT uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin XRD paterni. ....	<b>39</b>
<b>Şekil 6.13</b> : SDA uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin kesitinin SEM fotoğrafı. ....	<b>40</b>
<b>Şekil 6.14</b> : SDA uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin kesitinin SEM fotoğrafı. ....	<b>40</b>
<b>Şekil 6.15</b> : SDA uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin kesit mikroyapısının SEM fotoğrafı ve EDS elementel haritalama analizi fotoğrafları. ....	<b>42</b>
<b>Şekil 6.16</b> : SDA uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin kesitinden alınan noktasal EDS analizi konumlarını gösteren SEM fotoğrafları (a) Çelik, (b) İntermetalik bölge ve (c) İnterdifüzyon tabakası. ....	<b>43</b>
<b>Şekil 6.17</b> : SDA uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin kesit mikroyapısının SEM fotoğrafı ve EDS elementel haritalama analizi fotoğrafları. ....	<b>45</b>
<b>Şekil 6.18</b> : SDA uygulanmış ASP 2012 kalite takım çeliğinin kesitinden alınan noktasal EDS analizi konumlarını gösteren SEM fotoğrafları (a) Dış tabaka, (b) İnterdifüzyon tabakası, (c) İntermetalik ve (ç) Çelik. ....	<b>46</b>
<b>Şekil 6.19</b> : SDA + DT uygulanmış (a) ASP 2005 ve (b) ASP 2012 kalite çeliklerin kesitinin SEM fotoğrafları. ....	<b>47</b>
<b>Şekil 6.20</b> : SDA + DT uygulanmış (a) ASP 2005 ve (b) ASP 2012 kalite çeliklerin katman kalınlıklarını gösteren SEM fotoğrafları. ....	<b>48</b>
<b>Şekil 6.21</b> : SDA + DT uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin kesit mikroyapısının SEM fotoğrafı ve EDS elementel haritalama analizi fotoğrafları. ....	<b>50</b>
<b>Şekil 6.22</b> : SDA + DT uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin kesitinden alınan çizgisel EDS analizi konumunu gösteren (a) SEM fotoğrafı ve (b) çizgisel EDS analizi. ....	<b>51</b>
<b>Şekil 6.23</b> : SDA + DT uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin kesitinden alınan noktasal EDS analizi konumunu gösteren SEM fotoğrafı ve noktasal EDS analizi. ....	<b>51</b>
<b>Şekil 6.24</b> : SDA + DT uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin kesit mikroyapısının SEM fotoğrafı ve EDS elementel haritalama analizi fotoğrafları. ....	<b>53</b>
<b>Şekil 6.25</b> : SDA + DT uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin kesitinden alınan çizgisel EDS analizi konumunu gösteren (a) SEM fotoğrafı ve (b) çizgisel EDS analizi. ....	<b>54</b>
<b>Şekil 6.26</b> : SDA + DT uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin kesitinden alınan noktasal EDS analizi konumunu gösteren SEM fotoğrafı ve noktasal EDS analizi. ....	<b>54</b>
<b>Şekil 6.27</b> : SDA uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin kesitindeki sertlik ölçüm konumlarını gösteren optik mikroskop fotoğrafı ve sertlik değerleri. ....	<b>55</b>
<b>Şekil 6.28</b> : SDA + DT uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin kesitindeki sertlik ölçüm konumları ve ölçülen sertlik değerleri. ....	<b>55</b>
<b>Şekil 6.29</b> : SDA uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin kesitindeki sertlik ölçüm konumlarını gösteren optik mikroskop fotoğrafı ve sertlik değerleri. ....	<b>56</b>
<b>Şekil 6.30</b> : SDA + DT uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin kesitindeki sertlik ölçüm konumlarını gösteren optik mikroskop fotoğrafı ve sertlik değerleri. ....	<b>56</b>
<b>Şekil 6.31</b> : SDA uygulanmış (a) ASP 2005 ve (b) ASP 2012 kalite çeliğin yüzeyinin Rockwell C yapışma deneyi sonrası optik mikroskop fotoğrafı. ....	<b>58</b>
<b>Şekil 6.32</b> : SDA + DT uygulanmış (a) ASP 2005 ve (b) ASP 2012 kalite çeliğin yüzeyinin Rockwell C yapışma deneyi sonrası optik mikroskop fotoğrafı. ....	<b>58</b>
<b>Şekil 6.33</b> : ASP 2005 kalite çeliğin aşınma izi profili. ....	<b>59</b>

<b>Şekil 6.34</b> : ASP 2005 kalite çeliğın sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı olarak değişimi. ....	<b>59</b>
<b>Şekil 6.35</b> : ASP 2005 kalite çeliğın aşınma izinin SEM fotoğrafları (a) 50x, (b) 500x .....	<b>60</b>
<b>Şekil 6.36</b> : ASP 2012 kalite çeliğın aşınma izi profili.....	<b>61</b>
<b>Şekil 6.37</b> : ASP 2012 kalite takım çeliği mesafeye bağlı sürtünme katsayısı değişimi. ....	<b>61</b>
<b>Şekil 6.38</b> : ASP 2012 kalite çeliğın aşınma izinin SEM fotoğrafları (a) 50x, (b) 500x .....	<b>61</b>
<b>Şekil 6.39</b> : SV uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğın aşınma izi profili.....	<b>62</b>
<b>Şekil 6.40</b> : SV uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğın sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı olarak değişimi. ....	<b>62</b>
<b>Şekil 6.41</b> : SV uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğın aşınma izinin SEM fotoğrafları (a) 500x, (b) 2500x .....	<b>63</b>
<b>Şekil 6.42</b> : SV uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğın aşınma izi profili.....	<b>64</b>
<b>Şekil 6.43</b> : SV uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğın sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı olarak değişimi. ....	<b>64</b>
<b>Şekil 6.44</b> : SV uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğın aşınma izinin SEM fotoğrafları (a) 60x, (b) 2500x .....	<b>65</b>
<b>Şekil 6.45</b> : SDA uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğın aşınma izi profili.....	<b>65</b>
<b>Şekil 6.46</b> : Alüminyum kaplanmış ASP 2005 kalite mesafeye bağlı sürtünme katsayısı değişimi. ....	<b>66</b>
<b>Şekil 6.47</b> : SDA uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğın aşınma izinin SEM fotoğrafları (a) 60x, (b) 1000x .....	<b>66</b>
<b>Şekil 6.48</b> : SDA uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğın aşınma izi profili.....	<b>67</b>
<b>Şekil 6.49</b> : SDA yöntemiyle alüminyum kaplanmış ASP 2012 kalite çeliğın sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı olarak değişimi.....	<b>67</b>
<b>Şekil 6.50</b> : SDA uygulanmış ASP 2012 kalite çeliği aşınma izinin SEM fotoğrafları (a) 60x, (b) 2500x .....	<b>68</b>
<b>Şekil 6.51</b> : SDA + DT uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğın aşınma izi profili. ....	<b>69</b>
<b>Şekil 6.52</b> : SDA + DT uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğın sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı olarak değişimi.....	<b>69</b>
<b>Şekil 6.53</b> : SDA + DT uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğın aşınma izinin SEM fotoğrafları (a) 60x, (b) 250x .....	<b>69</b>
<b>Şekil 6.54</b> : SDA + DT uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğın aşınma izi profili. ....	<b>70</b>
<b>Şekil 6.55</b> : SDA + DT uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğın sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı olarak değişimi.....	<b>70</b>
<b>Şekil 6.56</b> : SDA + DT uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğın aşınma izinin SEM fotoğrafları (a) 60x, (b) 250x .....	<b>71</b>
<b>Şekil 6.57</b> : İncelenen numunelerin aşınma izi profillerinin karşılaştırılması. ....	<b>72</b>
<b>Şekil 6.58</b> : İncelenen numunelerin aşınma hızı değerlerinin karşılaştırılması. ....	<b>73</b>
<b>Şekil 6.59</b> : İncelenen numunelerin zamana bağlı OCP ölçüm grafikleri (a) ASP 2012, (b) SV ASP 2012, (c) SDA + DT ASP 2012, (ç) ASP 2005, (d) SDA + DT ASP 2005, (e) SV ASP 2005.....	<b>75</b>
<b>Şekil 6.60</b> : İncelenen numunelerin Tafel polarizasyon eğrileri.....	<b>77</b>



# SICAK DALDIRMA YÖNTEMİYLE ALÜMİNYUM KAPLANMIŞ TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN TAKIM ÇELİKLERİNİN AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

## ÖZET

ASP 2012 kalite takım çeliği plastik enjeksiyon kalıp makineleri, şekillendirme ve iş kalıp uygulamalarında sıklıkla tercih edilen ASP serisi toz metalurjisi ile üretilen bir takım çeliğidir. Mikroyapısında bulunan homojen dağılmış karbürler sayesinde, aşınma direnci, çekme dayanımı ve yüksek sıcaklık sertliği gibi mekanik özellikleri oldukça yüksektir. ASP 2005 kalite takım çeliği ise yüksek tokluğa sahip toz metalurjisi ile üretilen bir yüksek hız takım çeliğidir. Bununla beraber yüksek aşınma direnci ve sertliğe de sahiptir. Dövme kalıpları, plastik enjeksiyon kalıpları ve soğuk şekillendirme kalıplarında kullanımı tercih edilen bir malzemedir.

Toz metalurjisi ile üretilen takım çeliklerinin uygulama alanlarında uzun kullanım ömrü imkanı sağlaması ve bu sebeple ekonomik açıdan oldukça avantajlı olmaları, bu çeliklerin kullanım ömürlerinin daha uzun sürelere yayılması üzerine araştırmalar yürütülmesine sebebiyet vermiştir. Bu çalışmada ASP 2005 ve ASP 2012 kalite takım çeliklerine uygulanacak olan metalurjik işlemler sonucunda yüzey özelliklerinde aşınma ve korozyon davranışı açısından hangi yönde değişimler meydana geleceği incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında ASP 2005 ve ASP 2012 kalite takım çelikleri; sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplanarak kaplama morfolojisinin iki farklı kimyasal bileşime sahip takım çeliği üzerindeki değişimleri değerlendirilmiştir. Kaplama işlemi numunelerin 700 °C sıcaklıkta ergiyik halde Al – 12Si (ağ.%) alaşımının bulunduğu grafit pota içerisinde 3 dakika daldırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kaplanmış halde bulunan numunelere ASP 2005 kalite takım çeliği için 1100 °C'de ASP 2012 kalite takım çeliği için ise 1070 °C'de 1 saat difüzyon tavlama uygulanmıştır. Difüzyon tavlama işleminden sonra numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır.

Kaplama tabakalarında oluşan farklı intermetalik bileşiklerinin oluşturduğu fazların malzemelerin aşınma ve korozyon davranışlarında iyileştirme sağlayacak uygun parametreler ile elde edilebilirliği değerlendirilmiştir. Farklı kimyasal bileşime sahip iki takım çeliği ve difüzyon tavlama parametreleri ile bu çeliklerin aşınma, korozyon ve sertlik davranışları karşılaştırılmıştır.

Numunelerden alınan kesitler incelenerek difüzyon öncesi ve sonrası kaplama tabakasında gözlemlenen faz ve ara yüzey değişimleri noktasal, çizgisel ve elementel haritalama EDS analizleri aracılığıyla değerlendirilmiştir. Optik mikroskop altında kaplanmış ve kaplama işleminden sonra difüzyon tavlama yapılmış takım çeliklerinde farklı fazlarda yapılar gözlemlenmiş ve bu bölgelerin sertlik testleri yapılarak kaplamanın değişen morfolojisindeki sertlik değerleri elde edilmiştir. Aşınma testlerinde numune yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri incelenmiş ve bu izlerin profilometre analizi yapılarak derinliği, genişliği ve alanları

tespit edilmiştir. Bu sayede aşınma mekaniğinin kaplama tabakasının hangi bölgelerine kadar etkili olduğu değerlendirilmiştir. Yapışma deneyleri ile kaplama tabakalarının ana malzemeler üzerindeki yapışma dayanımları incelenmiştir. Difüzyon tavlamaının korozyon dayanımına olan etkisi ana malzemeler ve su verilmiş takım çelikleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.



## **INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOUR OF HOT DIP ALUMINIZED TOOL STEELS PRODUCED BY POWDER METALLURGY**

### **SUMMARY**

ASP 2012 tool steel is a ASP series powder metallurgy tool steel which is used for plastic injection molding machines, forming and hot work mold applications. Homogeneously dispersed carbides in the microstructure provide good mechanical properties (wear resistance and tensile strength).

ASP 2005 tool steel is a powder metallurgy high speed tool steel which can be used for polishing, hot forming and machining applications which require high toughness, hardness and wear resistance.

ASP 2005 and ASP 2012 tool steels contain a high percentage of spherical and angular morphology carbides in their microstructure. Carbide size and ratio in ASP 2005 quality steel is higher than ASP 2012 quality steel.

The surfaces of the materials are the only part that is interacting with the environment. Majority of the failures such as corrosion, wear, fatigue and oxidation is caused from the surface during the use of steels in engineering applications. Mechanical properties of the tool steels can be improved by subsequent metallurgical processes such as heat treatment and therefore their chemical composition is optimized to achieve at the desired properties.

Powder metallurgy process allows production the steels in desired specific compositions which are highly difficult to produce with standard melting and casting processes. It also enables the production of parts with complex geometries for metalworking applications, and therefore powder metallurgy is widely preferred in the production of tool steels. Due to the fact that tool steels produced by powder metallurgy method are desired to provide long service life in engineering applications to reduce costs, researches have been continued to extend the service life of these steels to much longer periods.

There is a wide variety of aluminium coating applications being applied for commercial purposes. These applications can be categorized as physical and chemical vapour deposition, electrolytic, pack cementation aluminizing, cladding, spray coating and hot dip aluminizing.

Hot dip aluminizing (HDA) is a diffusion controlled coating process which the surface of metallic materials is coated with a layer of aluminium. This process is also very economical when compared to other coating methods and allows to coat a variety of metallic materials easily in a short time. In hot dip aluminizing, the material is hold in a molten aluminium bath for a relatively short time to allow diffusion inwards. Outward diffusion from the substrate takes place at the same time. Despite the short-term duration of the process, the high thickness coatings can be grown by hot dip aluminizing.

The main purpose of this study is to characterize the coating microstructure produced on two grades of powder metallurgy tool steels by HDA in combination with a subsequent diffusion annealing and to investigate their wear and corrosion behaviours afterwards.

ASP 2005 and ASP 2012 tool steels produced by powder metallurgy were used as substrate. Samples measuring 10 mm x 10 mm x 55 mm were cut into cubes before they were coated in molten Al-12wt.%Si alloy by the HDA process. For this purpose, the samples were first ground by rubbing against emery papers from 80 to 400 mesh, cleaned ultrasonically to remove grease in phosphoric acid for 3 minutes, and tied with stainless steel wire to allow easy handle during dipping into and removal from the bath for the HDA process.

ASP 2005 and ASP 2012 tool steels were coated by the HDA process in molten Al-12wt.%Si alloy bath at 700°C for 3 min. The samples were removed the bath after the predefined coating time, cooled to room temperature in air, and transferred to an electric furnace for diffusion annealing. Diffusion annealing was applied at 1100 °C for ASP 2005 and 1070 °C for ASP 2012 in an electric furnace for one hour, and the samples were cooled to room temperature in air. It is aimed to modify the coating layers by diffusion annealing allowing further interdiffusion between the layers of the coating.

Following the diffusion annealing heat treatment, the coating structures were analysed by XRD and the elemental compositions of the layers were characterized by EDS. It was also determined by the SEM examinations that diffusion annealing process increased the coating thickness. The phases formed from the outermost layer to the substrate after the diffusion annealing process are FeAl and Fe<sub>3</sub>Al in ASP 2005 quality powder metallurgy tool steel, while FeAl<sub>2</sub>, FeAl ve Fe<sub>3</sub>Al phases in ASP 2012 quality steel. These phases are iron-based and no aluminum-rich phase was detected after diffusion annealing.

Microhardness measurement were applied from the cross section of the coatings to characterize different layers. Rockwell C adhesion tests were carried out to examine the adhesion strength between the substrate material and the coating layer.

In Rockwell C adhesion tests, it was observed that cracks were formed in the coating layer of both HDA + DA applied samples, and the coating layers in which the adhesion test was performed were brittle. However, the crack rate in ASP 2012 tool steel is lower, indicating that the coating layer of this steel is tougher than ASP 2005 grade steel.

Dry sliding wear tests were conducted at room temperature in reciprocating ball – on – disc configuration. The tests were performed against an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ball as the counterbody under a normal load of 3 N load, for a total sliding distance of 50 m and with a sliding velocity of 10 mm/s.

Wear tracks formed after the wear test were analysed with s stylus profilometer and depth, width and area of wear tracks were measured. Wear tracks were also examined with SEM to determine the dominant wear mechanism of the bare substrate, quenched substrate, HDA samples, and diffusion annealed samples.

Diffusion annealing samples have shown having a wear rate between the bare substrate and quenched tool steels. The highest wear resistance was obtained in quenched ASP 2005 quality tool steel with the highest hardness.

Potentiodynamic corrosion tests were carried out by using platinum (Pt) electrode, which acts as the counter electrode and silver / silver chloride (Ag / AgCl) electrodes, which act as the reference electrode in 3.5% NaCl aqueous solution. In order to ensure the conductivity of the samples used in the experimental studies, contact was made between the copper wire and the sample and moulding was carried out with the help of epoxy resin in such a way that only the surfaces that would be in contact with the electrolyte were exposed. As a result of corrosion tests, diffusion annealed ASP 2012 tool steel was found to have the highest corrosion resistance.





## 1. GİRİŞ

Takım çelikleri, el aletleri veya makine kalıpları gibi alet üretimi için uygun olan karbon alaşımlı çelik türleridir. Sertliği, aşınmaya karşı direnci ve yüksek sıcaklıklarda şeklini koruma yeteneği bu malzemenin temel özellikleridir. Takım çelikleri temel olarak daha yüksek sertlik sağlanmasına sebep olan ısıtma işlemi görmüş durumda kullanılır [1].

İsminden de anlaşılacağı gibi, takım çelikleri metal, plastik ve diğer endüstriyel malzemelerin işlenmesi ve şekillendirilmesi için imalat endüstrisi ve ticarete kullanılan aletlerin yapımında kullanılmaktadır. Takım çelikleri genel olarak diğer malzemelerin üzerlerinde oluşturduğu yüksek yüklere dayanıklı olmalıdır. Spesifik bir uygulama için gerekli özellikleri sağlamak amacıyla sertleştirilmiş ve temperlenmiş halde kullanılmalıdır [2].

Takım çeliklerinin büyük bir çoğunluğu yüksek sıcaklık stabilitesi, yüksek aşınma direnci, dayanım ve tokluk gerektiren kesme işlemi dışındaki alanlarda da kullanıma uygundur. Takım çelikleri ısıtma işlemleri ile daha sert hale getirilebilir. Kimyasal bileşimleri, uygun ısıtma işlemleriyle hedeflenen alanda etkin bir şekilde kullanılabilmesi için gereken özellikleri sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Modern takım çelikleri, sertlik, tokluk ve aşınma direncinin kombinasyonuna sahip olacak şekilde tasarlanmaktadır [3]. Toz metalurjisi ile üretilen takım çelikleri, geleneksel yöntemlerle üretilen takım çeliklerine oranla daha pahalı olmalarına rağmen, yukarıda sıralanan gelişmiş mekanik özellikleri sağlayacak niteliktedir [4].

Toz metalurjisi, oldukça yaygın olan geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla çok sayıda avantaja sahip olması nedeniyle endüstriyel üretimde giderek büyüyen bir sektördür [5]. Son yıllarda toz metalurjisi hızla gelişerek kompleks yapılara sahip mekanik parçaların üretiminde tercih edilmeye başlanmıştır. Toz metalurjisi ile üretim maliyetleri azaltılarak yüksek hassasiyete sahip malzeme üretimi sağlanabilmektedir [6]. Toz metalurjisinin bu avantajları, endüstriyel uygulamaların değişken gereksinimlerine kolaylıkla uyarlanabilmesini sağlar. Ayrıca toz metalurjisi, standart

ergitme ve döküm yöntemleriyle üretilmesi oldukça zor olan özel bileşimlerin elde edilmesine de olanak tanır.

Toz metalurjisinin sağladığı kazanımlar, sert metal üretimi ve kompleks kaplama işlemlerinin uygulanabilmesi ile kesme ve delme işlemlerine uzanan geniş bir alandaki uygulamalarda daha uzun kullanım ömrü sunmaktadır [7].

Kompleks geometrilere sahip parçaların üretilebilmesi, metal işleme uygulamaları ve aşındırıcı özelliklere sahip malzemelerin üretilmesine olanak sağlaması gibi özellikler toz metalurjisinin, takım çeliklerinin üretiminde oldukça yaygın olarak tercih edilmesine sebep olmuştur [9].

Bu çalışmada ASP 2005 ve ASP 2012 kalite olarak adlandırılan toz metalurjisi ile üretilmiş takım çelikleri kullanılmıştır. Sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Alüminyum kaplanmış haldeki ASP 2005 ve ASP 2012 kalite takım çelikleri sırasıyla 1100 °C ve 1070 °C sıcaklıkta bir saat süreyle difüzyon tavlmasına maruz bırakılmıştır. Daha sonra üretilen numunelerin yapısal, morfolojik, mekanik ve korozyon davranışı açısından karakterize edilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

## 2. TAKIM ÇELİKLERİ

### 2.1 Takım Çeliklerinin Genel Özellikleri

Takım çelikleri; soğuk veya sıcak şekil verme, kesme, ekstrüzyon, sıcak veya soğuk dövme işlemleriyle şekillenmesine yardımcı olan kalıp malzemelerinin ve takımların üretilmesinde kullanılan çeliklerdir.

Genellikle yüksek alaşım elementi içeren bu çelikler, sahip oldukları özellikler ve uygulama alanlarına bağlı olarak, yüksek hız takım çelikleri, soğuk iş takım çelikleri, sıcak iş takım çelikleri ve plastik kalıp takım çelikleri olarak dört farklı gruba ayrılmaktadır. Uygulama alanı ve özelliklerine göre birbirinden farklı özelliklere sahip olan takım çelikleri genel itibari ile aşağıda belirtilen özelliklere sahiptir [8].

- Yüksek aşınma direnci
- Yüksek tokluk
- Yüksek dayanım
- Yüksek sertleşebilirlik
- Yüksek işlenebilirlik
- Yüksek sertlik
- İyi yüksek sıcaklık özellikleri
- Yüksek termal iletkenlik
- Düşük termal genleşme
- Yüksek süneklik

Takım çelikleri, temel üretim malzemelerinin işlenmelerini ve uygun şekli almalarını sağlamak amacı ile tercih sebebidir. Aynı zamanda uygun tokluk ve yüksek sertliğe sahip olması bu çelikleri işlediği malzemelere göre daha avantajlı konuma getirmektedir. Bu özellikleri sayesinde takım çelikleriyle işlenen malzemeler aşınır iken takım çelikleri aşındıran kısımda yer almaktadır.

Genel bir ifade ile takım çelikleri, başka malzemelerin şekillenebilirliğini sağlamak amacıyla kullanılan çelik türleridir ve farklı alanlarda kullanımları söz konusudur. Farklı alanlarda kullanıma uygun olmasının temel sebebi bu çeliklerin kimyasal bileşiminde bulunan alaşım elementlerinin miktarının oldukça geniş bir yelpazede yer almasıdır.

## 2.2 Takım Çeliklerinin Sınıflandırılması

Takım çelikleri, tanımlanabilir özellikleri ve önemli karakteristikleri göze önüne alınarak Çizelge 2.1’de SAE – AISI standartlarına göre sınıflandırılmıştır.

**Çizelge 2.1** : Takım çeliklerinin sınıflandırılması [13].

Tanım	SAE – AISI gösterimi	Karakteristik Özelliği
Suda sertleştirilen	W	
	O	Yağda sertleştirme
Soğuk iş	A	Havada sertleştirme–Orta alaşımlı
	D	Yüksek karbon; yüksek kromlu
Şok dirençli	S	
	T	Tungsten esaslı
Yüksek hız	M	Molibden esaslı
	H	H1 - H19: Krom esaslı H20 - H39: Tungsten esaslı H40 – H59: Molibden esaslı
Sıcak iş		
Plastik kalıp	P	
	L	Düşük alaşımlı
Özel amaç	F	Karbon ve tungsten alaşımlı

W – grubu takım çeliği, adını su verme işleminin tanımından almaktadır. Bu grupta bulunan takım çeliklerinin, diğer takım çeliklerine kıyasla daha ekonomik olmasından dolayı sıklıkla kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklara maruz kalmayan alanlar ve uygulamalar için uygundur [10].

O, A ve D grubu, soğuk iş takım çelikleri olarak tanımlanmaktadır. Bu gruba ait takım çelikleri düşük sıcaklıklardaki malzemelere şekil vermek veya kesmek amacıyla kullanılmaktadır. W grubu takım çeliklerine oranla daha fazla alaşım elementi içermektedirler. Yüzey sertlikleri yüksektir bu sebeple kesici ağızların yapımında tercih edilirler [11].

S grubu, darbeye karşı dayanımını yüksek olan takım çelikleridir. Yüksek darbe tokluğu, yüksek şok dayanımı nispeten daha düşük aşınma direnci sergiler. İçerisinde bulunan alaşım elementlerinin oluşturdukları karbürler ile gerekli olan aşınma direncini sağlayabilirler. Matkap uçlarının üretiminde bu seriye ait takım çeliklerinden faydalanılmaktadır [3].

T ve M grubu, yüksek hız takım çelikleri olarak bilinmektedirler. Oldukça sert olan ve yüksek sıcaklıklarda dahi bu özelliklerini koruyarak çalışabilmeleri sayesinde kesici aletlerde kullanılan bu takım çelikleri yüksek karbon içeriğine sahip çeliklere göre daha kısa sürede kesme işlemi gerçekleştirmesi nedeniyle tercih sebebidir. Adını hızlı bir şekilde kesim işlemi yapabilmesinden almaktadırlar [10].

H grubu, sıcak iş takım çelikleri olarak adlandırılırlar. Yüksek sıcaklık değerlerinde malzemelere uygulanan şekillendirme ve kesme işlemlerinde kullanılırlar. Uzun süreli yüksek sıcaklık dayanımı ve sertliği sağlamak amacıyla geliştirilmişlerdir. H1 – H19 serisi krom esaslı, H20 – H39 tungsten esaslı, H40 – H59 ise molibden esaslı sıcak iş takım çelikleridir [13].

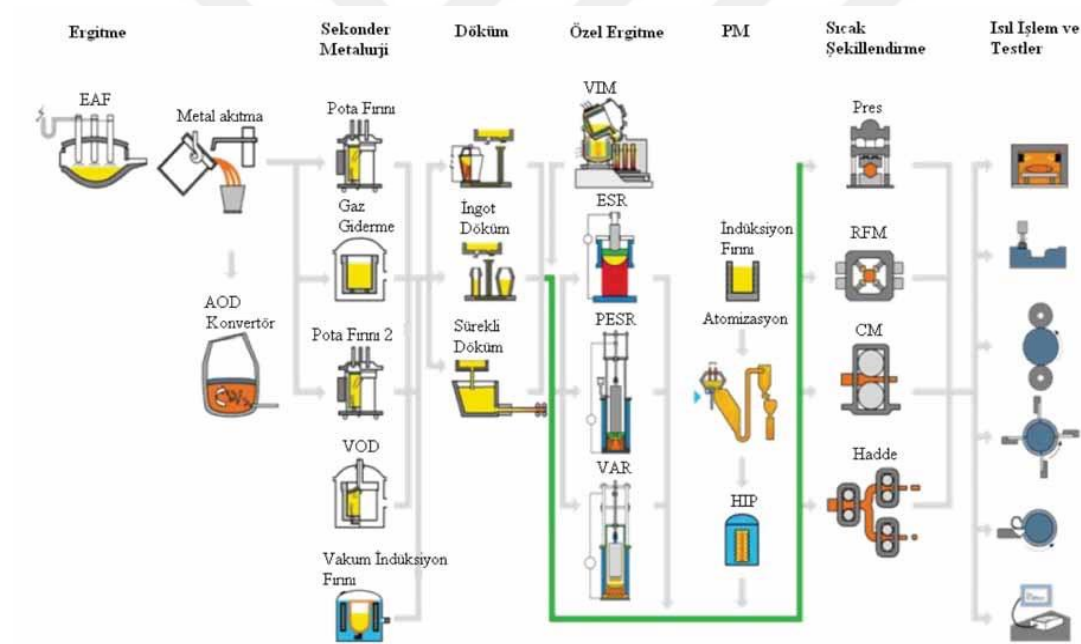
P grubu plastik kalıp takım çelikleri isimlerinden de anlaşılacağı üzere plastik malzemeleri şekillendirmek amacıyla kullanılan takım çelikleridir. Şekillendirilecek olan plastiğin özelliklerine göre korozyon direnci ve şekil verilen plastik malzemelerin aşındırıcı etkilerinden en az zarar görmesi için aşınma direnci yüksek olan takım çelikleridir [10].

L ve F ve grubu, özel amaçlar için üretilen takım çeliği grubudur. L grubu adını düşük alaşımlı olmasından almaktadır. W grubu takım çelikleri ile benzer karakteristiğe sahiptir. Yüksek aşınma dayanımı ve tokluğun büyük önem arz ettiği alanlarda tercih edilmektedirler. İçeriğinde bulunan kromun demir ile oluşturduğu karbürler ile malzeme yüksek aşınma direnci kazanmaktadır. F grubu, tungsten esaslı bir takım çeliğidir, su ile sertleştirilmiştir ve içeriğindeki yüksek karbondan dolayı oluşan sert

tungsten karbürler bu çeliğe W grubu takım çeliğinden daha yüksek aşınma direnci kazandırmaktadır [3].

## 2.3 Takım Çeliklerinin Üretim Prosesleri

Takım çelikleri, geleneksel yöntem, toz metalurjisi ve Osprey prosesi gibi yöntemlerle üretilmektedirler [14]. Toz metalurjisi, döküm veya dövme yöntemleriyle elde edilmesi zor veya imkansız olan spesifik bileşimler veya malzeme yapısında önemli iyileştirmeler sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. İnce tane boyutu, homojen olarak dağılmış karbür parçacıkları ile istenilen yoğunlukta malzemeler üretilmektedir. Kullanışlı tokluk miktarları ile geleneksel takım çeliklerine oranla üstün aşınma direnci sağlar [15]. Yüksek kalitedeki çeliklerin üretim sürecinin akış şeması Şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.1 : Yüksek kaliteli çelik üretim akış şeması [16].

Takım çelikleri dünya çapında çok sayıda üretici tarafından üretilmektedir. Bu çeliklerin üretim proseslerinde çok çeşitli üretim ekipmanları kullanılmaktadır [17].

### 2.3.1 Geleneksel takım çeliği üretimi

Takım çeliğinin dünya genelinde % 75'i geri dönüşümü yapılabilen hurdadan ergitme yöntemiyle diğer kısmı ise cevherden üretilen ingotların ergitilmesi işlemi ile yapılmaktadır. Takım çeliklerinin üretim proseslerinin ilk basamağı olarak ergitme işlemi gerçekleştirilmektedir. Ergitme işleminin ardından rafinasyon işlemi

gelmektedir [18]. Eritilen çeliğin kalitesi, uygun bir hammadde, son ürüne benzer kimyasal bileşime sahip yüksek kaliteli geri dönüştürülebilir hurda ve minimum istenmeyen element yüzdesi seçiminden başlayarak ergitme işlemi “temiz çelik” üretmek üzerine planlanmalıdır.

Bu temiz çelik üretme planı ile hurdaya cürufa alınamayacak metallerin bulaşmasının önüne geçilebilir. Elektro cüruf yeniden ergitme (ESR), içerisine yüklenen fırın şarjlarını elektrik arkı ile ısıtan ve çelik üretim sürecinin ilk adımında yer alan bir fırındır [13].

Tungsten, krom, manganez, silisyum, vanadyum ve molibden eklenmesi genel olarak Argon Oksijen Dekarbürizasyon (AOD) fırınlarında ferroalaşım formunda yapılmaktadır. Kobalt, vanadyum ve molibden aynı zamanda oksit halinde de eklenerek AOD’de redüklenebilmektedir [14].

Elektro cüruf yeniden ergitme veya rafine etme (ESR), EAF-AOD gibi önceki bir işlemde üretilen bir elektrotun ucunun, su soğutmalı bir bakır kalıpta bulunan reaktif, ergimiş bir cürufun içerisine daldırıldığı aşamalı bir ergitme işlemidir [17].

Vakum ark ergitme (VAR), çok fazla talep gören uygulamalar için yüksek oranda kimyasal ve mekanik homojenliğe sahip metal ingotların üretilmesini sağlayan ikincil ergitme işlemidir [19].

Takım çelikleri için vakum ark ergitme (VAR) metodunun uygulaması, belli başlı kritik rulman üretimleri ve bazı özel müşteri isteklerine bağlı olarak sınırlıdır. VAR, takım çeliklerinde sınırlı uygulaması olan ESR’ye eşlik eden bir işlemdir. ESR gibi VAR uygulaması da rafine bir makroyapı ve mikroyapı, mükemmel kimyasal homojenlik ve minimum sıcaklıkla sağlam ve düzgün bir ingot ile sonuçlanan aşamalı bir katılaştırma sürecidir. VAR prosesinde ısı kaynağı olarak rezistans görevi gören ergimiş cürufun yerini yüksek vakumda gerçekleşen ark almaktadır [14,17].

Takım çelikleri ingotlarının döküm prosedürleri son hallerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Çubuk şekilli uzun ürünlerin elde edilmesi amacıyla proses döndürerek dövme ya da açık kalıp hidrolik pres cihazlarında gerçekleşmektedir [14].

Takım çelikleri için gerçekleştirilen haddeleme işlemi yaklaşık olarak 1150 °C’de 10 dakika boyunca gerçekleşmektedir. Bu hızlı ısıtma işlemi, takım çeliklerinde dekarbürizasyonun engellenmesinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Bu sayede oda

sıcaklığından son halini almış nihai ürüne kadar tüm ısıtma ve haddeme işlemi 12 dakikadan daha kısa zamanda gerçekleştirilebilir [17].

Takım çeliklerinin sıcak şekillendirebilirliği, kimyasal bileşimin çok geniş bir çeşitliliğe sahip olmasından dolayı değişiklikler göstermektedir. Sıcak işlenebilirliği en zor olan takım çeliği yüksek alaşımli yüksek hız çelikleridir. Takım çeliklerinin şekillendirilebilirliği genel olarak orta seviyededir. Bu orta seviye işlenebilirlik, kolayca şekillendirilebilen alüminyum alaşımli çelikler ile işlenebilirliği daha zor olan nikel – demir esaslı süper alaşımlar arasında bir düzeydedir [18].

Sıcak işlemlerden sonra, işleme, taşlama veya farklı çalışma şartlarında kullanılmak üzere nihai ürün haline getirilen takım çelikleri, uygulama alanlarında kullanıldığı esnada yapısında oluşabilecek çatlama gibi tehlikeleri engellemek amacıyla genellikle ısıtma işleme maruz bırakılır [17].

### **2.3.2 Osprey prosesi**

Osprey prosesi, ergimiş metalin atomizasyonundan elde edilen damlacıkların bir toplayıcıya püskürtülerek toplayıcının üzerinde biriktirilmesi esasına dayanmaktadır [20].

Osprey takım çeliklerinin sağladığı avantajlar P/M ürünlerinin faydalarıyla benzerlik göstermektedir. Osprey metoduyla püskürtülen büyük hacimlerdeki gaz çok yüksek yoğunluk (>%98) değerindedir. Bu yüksek yoğunluk değeri Osprey yöntemiyle üretilen yüksek hız çeliklerinin, P/M ürünlerine benzer boyutlarda düzgün ve ince boyutlarda karbür dağılımı göstermesini sağlar [17].

### **2.3.3 Toz metalurjisi ile üretilen takım çelikleri**

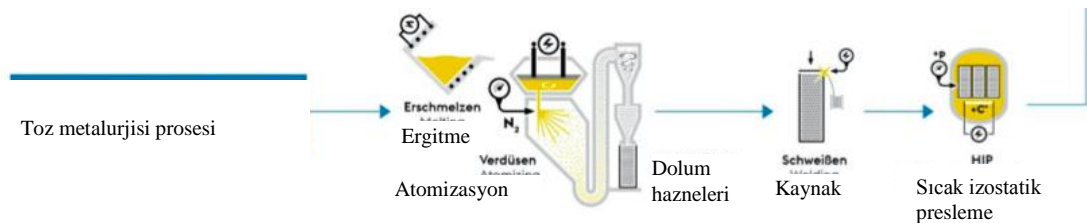
Toz metalurjisi, dövme ile elde edilen çeliklerle karşılaştırıldığında daha homojen bir mikroyapıya ve iyileştirilmiş mekanik özelliklere sahip takım çeliklerinin elde edilmesine olanak tanımaktadır [22].

Üretim proseslerinin 100 yılı aşmış geçmişine rağmen, geleneksel ingot metalurjisi prosesi ile yüksek alaşımli ve yüksek karbonlu takım çeliklerinin şekillendirilebilirliğinde zorluklar yaşanmaya devam edilmektedir. Geleneksel statik ingot döküm yönteminde nispeten yavaş gerçekleşen soğuma, sıcak işlenebilme esnasında ortadan kalkması zor olan kaba yapıdaki ötektik karbürlerin oluşumuna sebebiyet vermektedir. Bu süreç istenilen karbür yapısının oluşumunda önemli bir

engel teşkil etmektedir. Tane büyümesi, malzemenin homojen olmayan ısı işlem reaksiyonu ve düşük tokluk gibi problemler ortaya çıkmaktadır.

Toz metalurjisi bu gibi istenmeyen durumların ortadan kaldırılmasında oldukça etkili bir üretim sürecidir. Bunun nedeni homojenize, ince ve düzgün bir karbür dağılımını sağlama konusunda atomizasyon işleminin hızlı katılaşmaya sebebiyet verecek yetenekte bir uygulama olmasıdır.

Ergitilmiş halde olan metal, dar bir çapa sahip olan nozülünden, metal akışını ufak damlalar haline ayıran yüksek basınçlı gaz jetlerinin olduğu hazneye dökülür (Şekil 2.2). Haznenin dibine serbest olarak düşen her bir damlacık, düşüş esnasında katılaşmaya başlayan ufak bir ingot olarak kabul edilebilir. Metal tozunda bulunan oksijen miktarını minimize etmek oldukça önemlidir. Oksijen içeriğini en aza indirmek amacıyla azot en yaygın tercih edilen atomize edici gazdır. Küresel yapıda bulunan tozlar gaz atomizasyonu prosesi ile üretilmiştir. Bu yapıların geleneksel sinterleme ve pres yöntemleriyle, nihai ürün parçalarının yeterli dayanımı sağlayamamasından dolayı üretilmesi söz konusu değildir. Bu sebepten dolayı toz metalurjisi yöntemi ile üretilen takım çeliklerinin prosesinde sıcak izostatik presleme yöntemine başvurulur. Sıcak izostatik presleme yönteminde, yumuşak çelik kap, maksimum paketleme yoğunluğuna ulaşabilmek için titreşme halinde olan gevşek durumdaki toz ile doldurulur. Daha sonra yumuşak çelik, kabın içerisi boşaltılır ve hermetik olarak kapatılır. Sızdırmaz bir şekilde kapatılan kap direkt olarak sıcak izostatik preslenebilir ancak bazen termal açıdan iletkenliği iyileştirmek ve daha yüksek yoğunluğa ulaşmak için ara prosedür olarak soğuk izostatik presleme yöntemine de başvurulabilir. Sıcak izostatik presleme yöntemiyle elde edilen nihai ürünün geometrisine bağlı olarak döndürerek dövme, haddeleme veya pres işlemlerine maruz bırakılabilir.



**Şekil 2.2 :** Toz metalurjisi üretim akış şeması [21].

Sıcak izostatik presleme yöntemiyle %100 yoğunluğa ulaşılması mümkün olduğu için, HIP işleminden sonra herhangi bir ilave işleme ihtiyaç duyulmamaktadır. Su ile

atomize edilmiş takım çeliği tozları ise düzensiz yapıdadır. Bu yüzden tavlama işleminden sonra kalıpta presleme prosesleri için uygundur.

Gaz veya su ile atomize edilerek üretilen takım çeliği tozlarının soğuma hızı, geleneksel statik ingot dökümdeki soğuma hızından birkaç mertebe daha yüksektir. Bu hızlı katılaşma süreci sayesinde oldukça homojenize halde ve istenilen derecede ince karbür dağılımı elde edilmesi söz konusu olabilir.

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen takım çelikleri birçok açıdan oldukça yüksek kaliteli ürünler olarak değerlendirilse de yüksek hızlı çelik ürünleri pazarının sadece %10'luk bir kısmında bu üretim yöntemiyle üretilen ürünler tercih edilmektedir [17].

#### **2.4 Takım Çeliklerine Alaşım Elementlerinin Etkisi**

Takım çeliklerine alaşım elementi eklenmesi, bu çeliklerin kullanım alanlarındaki amaçlarına uygun mekanik özellikler sergilemelerine yardımcı olmaktadır. Takım çeliklerinin kimyasal bileşimindeki demir ile çözülen veya özel karbür oluşturulması amacıyla katılan alaşım elementlerinin bu çeliklere kazandırdığı başlıca özellikler şu şekilde sıralanabilir [23];

- Yüksek sertlik sağlamak
- Yüksek dayanım sağlamak
- Aşınma direncini artırmak
- Manyetik özellikleri iyileştirmek
- Yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı iyileştirmek
- Yüzeyden merkeze kadar sertleşebilmeyi sağlamak

Takım çeliklerinin yapılarında bulunan önemli alaşım elementlerinin etkisi aşağıda belirtilmiştir [23,24].

#### **Karbon (C)**

Karbon, çeliklerin sertliğini arttıran en etkili ve önemli alaşım elementlerindedir. Takım çelikleri de dahil olmak üzere diğer çeliklerde akma ve çekme dayanımını artırır, kaynaklanabilirlik, süneklik ve dövülebilirliği düşürür.

### **Manganez (Mn)**

Manganez çeliklerin sertleşebilirliğini geliştirir. Fakat sünekliği az miktarda düşürür. Çelik üretiminde demir sülfür (FeS) bileşiğinin oluşmasını engeller ve aynı zamanda oksit giderici olarak kullanılmaktadır.

### **Krom (Cr)**

Krom, takım çelikleri için en önemli alaşım elementlerinden birisidir. Çeliğe krom ilavesi ile korozyon direnci ve sertleşebilirlik önemli oranda artmaktadır. Krom, karbür oluşturunucudur ve oldukça karalı krom karbürler oluşturmaktadır. Çeliğin dayanım özelliklerine olumlu etkisi bulunmaktadır.

### **Wolfram (W)**

Wolfram (tungsten), yüksek sıcaklık sertliği sağlar ve kuvvetli bir karbür oluşturunucudur. Tane büyümesini engelleyerek tane inceltici bir rol oynar. Çeliğin termal iletkenliğini azaltarak ısıl işlemden çatlak oluşumuna neden olabilmesi dezavantaj olarak belirtilebilir.

### **Molibden (Mo)**

Tane büyümesinin önüne geçer, temperleme işlemiyle birlikte çelikte karbür oluşturunucudur ve ince tane oluşumunu destekleyici etkisi bulunmaktadır. Aşınma direncini iyileştirir. Isıya dayanıklı çeliklerin üretiminde kullanılmaktadır.

### **Vanadyum (V)**

Vanadyum, güçlü bir karbür yapıcıdır ve aşınma direncini olumlu yönde etkiler. Oluşturduğu karbürlerin çözünme sıcaklığı oldukça yüksektir. Bu sayede östenitleme sıcaklığına ulaşıldığında tane büyümesinin önüne geçer. Kesici takım uçlarının uzun süreli performans verebilmelerini sağlar.

### **Nikel (Ni)**

Çeliğin sertleşebilirliğini ve sünekliğini artırır.

### **Kobalt (Co)**

Yüksek hız takım çelikleri için büyük önem arz eden bir alaşım elementidir. Yüksek hız takım çeliklerinin yüksek sıcaklık uygulamalarında çalışırken sertliklerini kaybetmeden güvenli çalışmasını sağlar. Isı iletim yeteneğini iyileştirir, karbür oluşturunucudur alaşım elementlerinin östenit fazında çözünebilirliğine katkı sağlar.

## Silisyum (Si)

Sıcak iş takım çeliklerinde %1 oranında bulunması bu takım çeliklerinin uygulama alanlarında kullanılırken yapışma ihtimallerini düşürür. Çeliklerin yaylanma özelliğini arttırdığı için bu özelliğin istendiği takım çeliklerinde kullanılır.

### 2.5 ASP 2005 ve ASP 2012 Kalite Takım Çelikleri ve Uygulama Alanları

ASP 2005 kalite takım çeliği, toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş bir yüksek hız takım çeliğidir. Yüksek tokluk, aşınma direnci ve sertliğe sahiptir. Bu takım çeliği amacına uygun olarak taşlama, frezeleme, plastik şekil verme ve kaynak gibi proseslerde güvenilir bir şekilde kullanılabilir. Yumuşak tavllanmış halde sertliği 250 HB'dir [25]. ASP 2005 kalite takım çeliğinin kimyasal bileşimi Çizelge 2.2'de, fiziksel, mekanik ve termal özellikleri ise Çizelge 2.3'de belirtilmiştir.

**Çizelge 2.2 :** ASP 2005 kalite takım çeliğinin kimyasal bileşimi (% ağı.) [25].

C	Cr	Mo	W	Co	V
1,50	4,0	2,5	2,5	-	4

**Çizelge 2.3 :** ASP 2005 kalite takım çeliğinin fiziksel özellikleri [25].

Sıcaklık (°C)	20	400	600
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	7,8	7,7	7,6
Elastisite modülü (GPa)	220	195	175
Termal genişleme katsayısı (1/°C)	-	12,1x10 <sup>-6</sup>	12,7x10 <sup>-6</sup>
Termal iletkenlik (W/m°C)	24	28	27
Özgül ısı (J/kg°C)	420	510	600

ASP 2012 kalite takım çeliği, çok küçük ve homojenize halde olan karbürler vasıtasıyla oldukça yüksek çekme dayanımı, yüksek sıcaklık sertliği, yüksek aşınma direnci ve yüksek temperleme direncine sahiptir. Yumuşak tavllanmış haldeki sertliği 230 HB'dir. ASP 2012 kalite takım çeliğinin kimyasal bileşimi Çizelge 2.4'de, fiziksel, mekanik ve termal özellikleri ise Çizelge 2.5'de belirtilmiştir.

**Çizelge 2.4 :** ASP 2012 kalite takım çeliğinin kimyasal bileşimi (% ağırlık) [26].

C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V
0,60	1,0	0,3	4,0	2,0	2,1	1,5

**Çizelge 2.5 :** ASP 2012 kalite takım çeliğinin fiziksel özellikleri [26].

Sıcaklık (°C)	20	400	600
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	7,8	7,7	7,6
Elastisite modülü (GPa)	220	195	175
Termal genişleme katsayısı (1/°C)	-	12,1x10 <sup>-6</sup>	12,7x10 <sup>-6</sup>
Termal iletkenlik (W/m°C)	26	30	30
Özgül ısı (J/kg°C)	420	510	600

ASP 2005 kalite takım çeliği oldukça geniş alanlarda kullanıma uygun bir toz metalurjisi ile üretilmiş yüksek hız takım çeliğidir. Genel olarak uygulama alanları şu şekildedir:

- Plastik enjeksiyon kalıpları
- Soğuk şekil takımları
  - ◆ Soğuk şekillendirme kalıpları
  - ◆ Soğuk ekstrüzyon aletleri
  - ◆ İnce kesme aletleri
  - ◆ Toz sıkıştırma takımları
- Merdaneler
- Sıcak uygulamalar
  - ◆ Ekstrüzyon kalıpları
  - ◆ Dövme kalıpları
  - ◆ Zımparalar

ASP 2012 kalite takım çeliği sıcak iş uygulamalarında kullanılan ASP serisi toz metalurjisi ile üretilen bir takım çeliğidir. Kullanım alanları şu şekilde sıralanabilir:

- ❖ Plastik enjeksiyon kalıp makineleri
  - Enjektör pimleri
  - Broşlar
- ❖ Soğuk iş takımları
  - Toz sıkıştırma takımları
  - Soğuk şekillendirme kalıpları
  - İnce kesme aletleri
  - Soğuk ekstrüzyon takımları
- ❖ Makine bileşenleri ve rulolar
- ❖ Sıcak iş kalıp uygulamaları
  - Ekstrüzyon kalıpları
  - Dövme kalıpları
  - Sıcak şekillendirme kalıpları
  - Zımparalar

### 3. ALÜMİNYUM KAPLAMA İŞLEMLERİ

Malzemelerin yüzeyleri, içerisinde buldukları ortam ile etkileşim halinde olan tek bölümdür. Mühendislik ile ilişkili bulunan kusurların büyük bir bölümü bu yüzeylerden dolayı meydana gelmektedir ve malzemelerin tercih edildiği kullanım alanlarındaki çalışmaları sırasında, korozyon, aşınma, yorulma ve oksidasyon gibi hasarlara uğramasına sebebiyet vermektedir [27]. Alüminyum kaplama prosesi temel olarak metallerin yüzeylerinin Al ile kaplanması işlemine dayanmaktadır.

#### 3.1 Alüminyum Kaplama Yöntemleri

Ticari amaçlı uygulanmakta olan çok çeşitli alüminyum kaplama uygulamaları bulunmaktadır. Bu uygulamalar, fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme, elektrolitik kaplama, kutu sementasyonu, giydirme (cladding), spreycaplama ve sıcak daldırma ile alüminyum kaplama olarak sıralanabilir [28].

Fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme yöntemi (PVD – CVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD) ile alüminyum kaplama yöntemine endüstriyel alanda türbin kanatlarının kaplanması uygulamalarında sıkça rastlanmaktadır. Bu yöntemde harici jeneratör içerisinde üretilen alüminyumun halojenür haldeki buharları kaplama reaktörü yerine harici jeneratörde üretilir. Aktivatör olarak tercih edilen klorür ( $Cl_2$ ) veya hidrojen klorür (HCl) gazları 300 – 400 °C aralığında harici jeneratördeki alüminyum peletinin üzerinden aktarılmasıyla alüminyum klorür formu oluşur. Bu oluşan form taşıyıcı olarak görev yapan inert gaz aracılığıyla kaplama fırınına aktarılır. Alüminyum kaplama yapılacak malzemeler de bu fırın içerisinde bulunmaktadır [28].

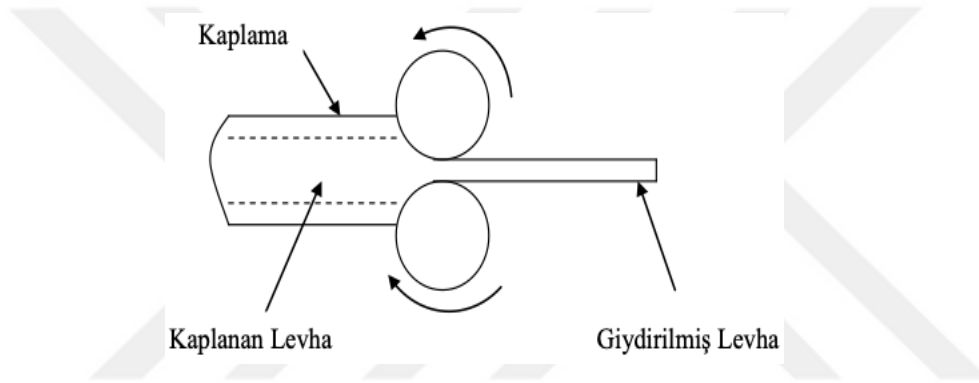
Elektrolitik alüminyum kaplama metodunda kaplanacak malzeme ilk olarak HCl çözeltisi içerisinde kir ve yağdan temizlenir. Bu işlemde kaplanacak olan altlık malzeme üzerinde alüminyumun kaplanma hızı oldukça düşüktür (20  $\mu m$  / saat). [29].

Kutu sementasyon, maliyet olarak çok yüksek ve zaman gerektiren bir kaplama yöntemidir. Düzgün olmayan geometrilere sahip malzemeler için önerilmektedir. Genel olarak nikel esaslı alaşımlara uygulanmaktadır. Kaplanacak olan altlık malzeme

yüzeyi temizlenir, daha sonra 30 saate kadar, hava sızdırmayan damıtıcı içerisinde ferro-aluminyum tozları içeren aluminyum karışımıyla beraber uygun sıcaklığına ısıtılır [29].

Sprey kaplama, temizlenmiş malzeme yüzeyine uygun basınçta hava jeti aracılığıyla aluminyum püskürtülerek metalin belirli bir kalınlıkta aluminyum kaplanması esasına dayanır. Ana malzeme yüzeyi ve spray ile püskürtülen aluminyum kaplaması arasındaki dayanımın sağlanabilmesi için işlem sonrasında tavlama uygulanabilir [29].

Giydirme (cladding) metodu (Şekil 3.1), metalik malzemelerin yüzeylerinin mekanik enerji ve yüksek basınç aracılığıyla haddelenmesi ile aluminyum kaplanması esasına dayanır. Levhaların kaplanmasında tercih edilen bir yöntemdir [30].



**Şekil 3.1 :** Giydirme (cladding) yönteminin şematik gösterimi [30].

Sıcak daldırma yöntemiyle aluminyum kaplama işleminde, ergimiş aluminyum içerisine daldırılan malzemelerin yüzeyi aluminyum ile kaplanmaktadır. Altlık malzeme ve aluminyum kaplama arasında kuvvetli bir bağlanma söz konusudur. Kısa süreli kaplama işlemine rağmen kaplama kalınlığı yüksek seviyelere ulaşabilir.

### **3.2 Sıcak Daldırma Yöntemi ile Aluminyum Kaplama**

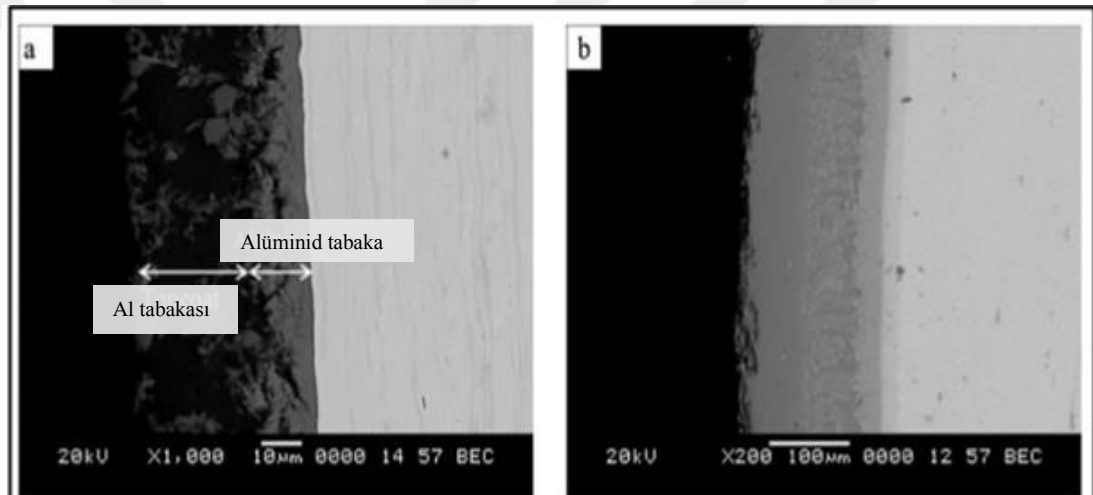
Sıcak daldırma ile aluminyum kaplama işleminde, aluminyum kaplaması ve kaplanan altlık malzeme olan ana metal arasında oluşan kaplama ara yüzeyinin kalınlığı, profili ve morfolojisi, sıvı aluminyum banyosunun kimyasal bileşimi, altlık malzemenin mikroyapısı ve kimyasal bileşimine göre değişmektedir [31].

Sıcak daldırma işleminin gerçekleştirildiği pota içerisindeki ergimiş aluminyumun kimyasal bileşimi (özellikle Si oranı), altlık malzeme ve kaplama tabakası arasında oluşan Fe-Al intermetalik katmanının kalınlığını ve morfolojisini önemli bir şekilde etkiler. Kaplama malzemesi olarak kullanılan aluminyumun Si oranı arttırıldığında ara

tabaka ile alt tabaka arasındaki intermetalik ara yüzey daha düzgün ve pürüzsüz hale gelirken ara tabakanın kalınlığı da azalır [31].

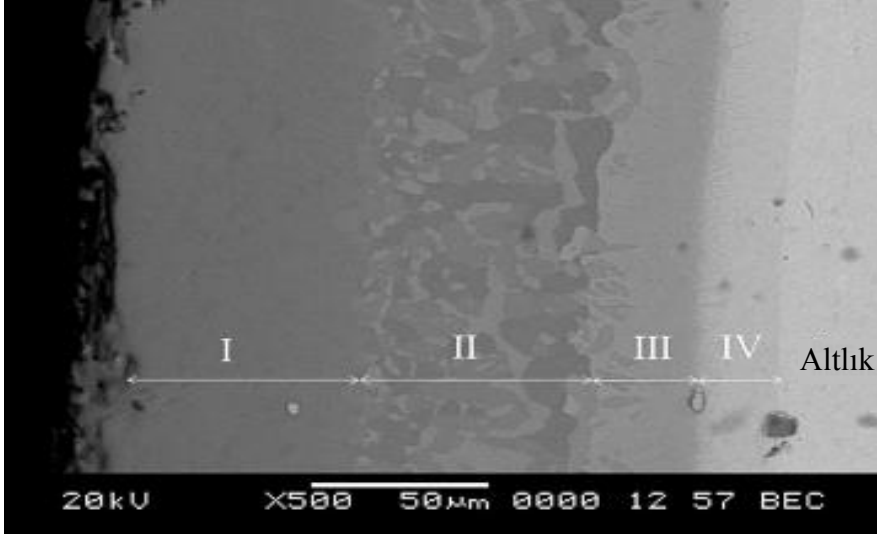
Sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplanan malzemelere, daha sonra difüzyon tavlama işlemi uygulandığında, kaplama tabakası boyunca oluşan metallerearası fazların türü değişebilmektedir. Böylece, kaplama sonrası kullanım amacına uygun olarak, difüzyon tavlama işleminde uygun parametrelerin belirlenmesi önemlidir.

AISI 321 kalite paslanmaz çeliğe uygulanan sıcak daldırma alüminyum kaplama işleminden sonra 900 °C’de 3 saat difüzyon tavlama uygulanmıştır. Söz konusu numunenin difüzyon tavlama öncesi ve sonrasındaki kesit mikroyapı fotoğrafı Şekil 3.2’de görülmektedir [32].



**Şekil 3.2 :** AISI 321 kalite çeliğe uygulanan difüzyon tavlamasından (a) önce ve (b) sonra alüminyum kaplama tabakası kesitinin SEM fotoğrafı [32].

Sıcak daldırma yöntemiyle yapılan alüminyum kaplama işleminden sonra, kaplama tabakasında Fe ve Al’den ibaret bir faz (alüminid), dış yüzeyde ise alüminyumdan ibaret bir tabaka mevcuttur. Sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplanmış AISI 321 kalite çeliğin SEM fotoğrafında (Şekil 3.2a) kaplama kalınlığı yaklaşık 43 µm’dir. Difüzyon tavlama işleminden sonra kaplamanın toplam kalınlığı ise yaklaşık 190 µm olup, kaplama tabakasında dört katmanlı bir yapı oluşmuştur (Şekil 3.2b). Her bir katman, Şekil 3.3’de görülmektedir. Bu veriler difüzyon tavlama işleminin sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplama işleminden sonra farklı metallerearası bileşiklerin oluşmasına ve altlık malzeme ile alüminyum ara yüzeylerinin değişimine neden olabildiğini göstermiştir.



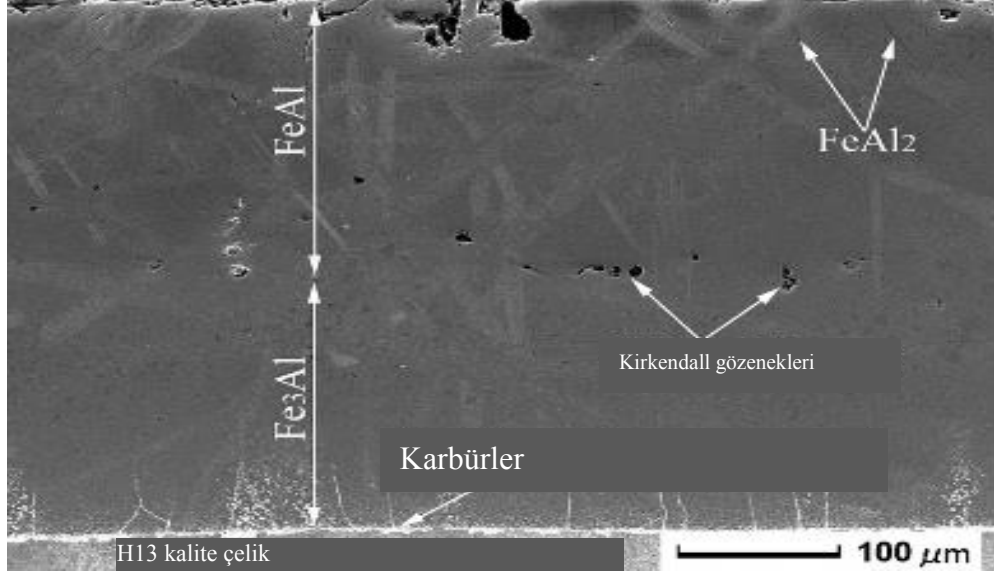
**Şekil 3.3** : Difüzyon tavlaması uygulanmış AISI 321 kalite çeliğin kaplama tabakası kesitinin yüksek büyütme SEM fotoğrafı [32].

Difüzyon tavlaması işleminden sonra kaplama tabakasının en üst bölgesinde oluşan ve I olarak numaralandırılan katmanın bileşimi, % 71,5 Al, % 26,5 Fe ve % 2 Cr bileşimindedir. Bu bileşim bu fazın  $Fe_2Al_5$  olduğunu göstermektedir [32].

Sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplanmış takım çeliklerinde oluşan intermetalik yapılara bağlı olarak aşınma davranışları ve mekanizmaları da araştırılması devam eden çalışmalardandır.

AISI H13 kalite takım çeliğine sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplama işlemi uygulanmış ve ardından yüksek sıcaklıkta difüzyon tavlaması işlemi gerçekleştirilmiştir. Fe – Al metallerarası fazlarından ibaret kaplamanın farklı sıcaklıklarda uygulanan aşınma testlerine ne ölçüde etki ettiği incelenmiştir. Kaplama işlemi sonrası H13 kalite takım çeliğinde oluşan kaplamanın kesitinin SEM fotoğrafı, Şekil 3.4’de görülmektedir.

Şekil 3.4’de görülen kaplama tabakasının kalınlığı yaklaşık  $300 \mu m$ ’dir. Temel olarak kaplama dış katmanda  $FeAl$  ve iç katmanda  $Fe_3Al$  fazlarından oluşmaktadır. Kirkendall gözenekleri olarak adlandırılan bölge kaplamanın iç ve dış katman olarak bölündüğü kısımlarda yer almaktadır. Ayrıca kaplama tabakasında şerit morfolojisinde olan  $FeAl$  ve  $FeAl_2$  fazları bulunmaktadır.  $FeAl$  ve  $Fe_3Al$  fazlarının mikrosertliği sırasıyla 580 ve 420 HV olarak belirlenmiştir. Sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplanmış olan H13 kalite takım çeliği yüzeyi çeşitli aşınma test koşulları için farklı aşınma davranışları göstermiştir [33].



Şekil 3.4 : AISI H13 kalite çeliğin kaplama tabakası kesitinin SEM fotoğrafı [33].

### 3.3 Kaplama İşleminde Etkili Olan Faktörler

Sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplama işleminin parametreleri, kaplama işlemi sonrasında oluşan kalınlık, kaplama morfolojisi, altlık malzeme ve kaplama arayüzündeki yapışma dayanımı ve kaplamanın mekanik özelliklerini etkilemektedir. Söz konusu parametrelerin etkisi aşağıda sıralanmıştır:

- Kaplama sıcaklığı arttıkça altlık malzeme ve alüminyum arasındaki karşılıklı difüzyon hızlanmakta ve kaplama yapısı ile morfolojisini etkilemektedir [34]. Kaplama süresi, kaplama morfolojisini önemli ölçüde etkilemezken kaplama kalınlığını önemli ölçüde arttırmaktadır [35].
- Kaplamanın yapışma dayanımını arttırmak amacıyla altlık malzemenin yüzeyi, işlem öncesi yağ ve kirden arındırılarak temizlenmelidir [35].
- Kaplama malzemesi olarak kullanılan alüminyumun kimyasal bileşimi, oluşan metallerarası fazların türü ve miktarını etkilemektedir [35].

### 3.4 Uygulama Alanları ve Avantajları

Kimya, uçak, enerji endüstrilerinde sıklıkla tercih edilen malzemelerin yüzeyi çalıştıkları agresif ortam koşulları nedeniyle bozunuma uğramaktadır. Bu malzemelere uygulanan koruyucu kaplamalar genel olarak yüksek sıcaklıkta oksidasyon, korozyon, erozyonu ve aşınma mekanizmalarıyla uğrayacakları hasarları engellemek ya da azaltmak amacıyla kullanılmaktadır [36]. Metalik kaplamaların yüzeyinde koruyucu

alumina fazının oluşması nedeniyle alüminyum kaplamalar sıklıkla tercih edilen kaplamalardır. Uygulanması oldukça basit bir tekniktir ve düşük maliyetlidir. Kısa sürelerde diğer kaplama yöntemleriyle elde edilebilen kaplama kalınlığı seviyeleri elde edilebilmektedir. Sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplanmış çelikler, nükleer sanayide hidrojen geçirgenlik bariyerleri olarak kullanılabilir [37].



#### **4. TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN TAKIM ÇELİKLERİNE UYGULANAN KAPLAMALAR**

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen Vanadis 10 kalite takım çeliği, soğuk şekil verme takımlarından ekstrüzyona kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu takım çeliğinin yüzeyi farklı mekanik uygulamalara maruz kalabilmektedir. Bu çeliğin uygulama alanlarında kullanım ömrünü uzatmak amacıyla çeşitli yüzey işlemleri gerçekleştirmek gereklidir. Vanadis 10 kalite takım çeliği, sıcak izostatik presleme yöntemiyle şekillendirilir. Bu işlem, mikro kusurlar ve gözenekli yapı olmadan homojen bir şekilde dağıtılmış mikroyapı elde edilmesine olanak tanır. Takım çeliğinin mikroyapısındaki homojen karbür dağılımı, bu çeliklerin optimum yorulma dayanımı, aşınma direnci ve dayanım değerlerine sahip olmasını sağlar. Vanadis 10 takım çeliği yüksek Cr ve V nedeniyle, ledeburitik çelikler sınıfındadır. Karbon ile birleşen Cr ve V, MC tipi kararlı ve çok sert aşınmaya dayanıklı karbürler meydana getirmektedir. Bu malzeme sınıfı için, kalıntı östeniti azalttığı için derin kriyojenik işlem önem kazanmıştır. Ayrıca, toz metalurjisi ile üretilen takım çeliklerinin aşınma hızını ve sürtünme katsayısını düşürmek amacıyla plazma nitrüleme işlemi uygulanmaktadır [38]. Bu amaçla takım çeliğine derin kriyojenik işlem, plazma nitrüleme ve çok katmanlı film TiCN / AlTiN / CrAlTiN /CrN kombinasyonu işlemleri uygulanarak, mekanik özellikleri, aşınma direnci ve yapısal özellikleri incelenmiştir. TiN endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan kaplamalardandır. Aşınma ve oksidasyon direncinin daha iyi özellikler göstermesi istenilen yerlerde önerilmektedir. CrN ve AlN kaplama yüzeyinde oksidasyona karşı iyi bir kararlılık gösterdiği için aşındırıcı ortamlarda çalışan takım çelikleri için uygun ve umut verici bir çözümdür [39].

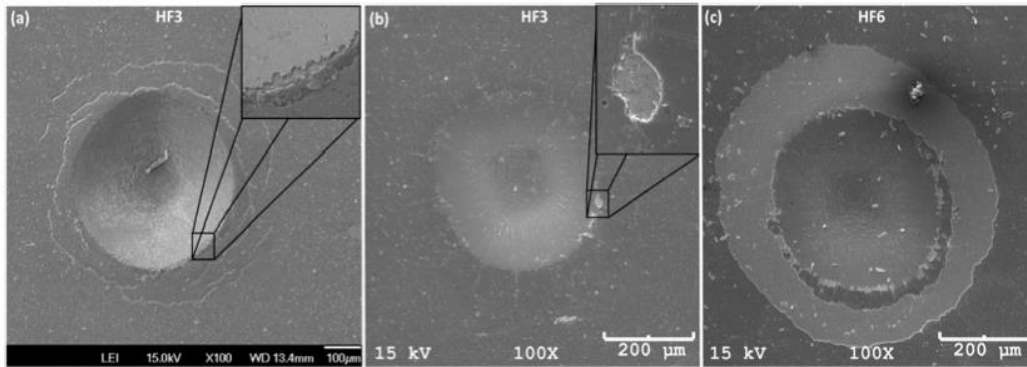
Vanadis 10 takım çeliğinin kimyasal bileşimi, % 2,9 C, % 0,5 Si, % 0,5 Mn, % 8 Cr, % 1,5 Mo, % 9,8 V elementlerinden oluşmaktadır. Çeliğin, Rockwell C yapışma deneyi, sürtünme ve aşınma direncini incelemek amacıyla, su verme ve temperleme (östenitleme, su verme, derin kriyojenik işlem ve çift temperleme) işlemini takiben, film kaplama, 3 farklı atmosferde (% 5 N<sub>2</sub>, % 75 H<sub>2</sub> ve % 20 Ar; % 25 N<sub>2</sub>, % 55 H<sub>2</sub> ve

% 20 Ar; % 5 N<sub>2</sub>) plazma nitrürleme ve çok katmanlı film kaplama olmak üzere farklı yüzey işlemleri uygulanmıştır. Çeliğin yüzeyinde ilk olarak daha sonraki çok katmanlı kaplama tabakalarının yapışma özelliğini arttırmak amacıyla CrN tabakası oluşturulmuştur. Daha sonra üstün mekanik özellikler göstermesi amacıyla AlTiN ve CrAlTiN tabakaları katmanlı bir şekilde yüzey üzerinde biriktirilmiştir. TiAlN filmine oksidasyon direncini arttırmak ve yüksek sıcaklıklarda termal kararlılığa sahip olmak amacıyla Cr ilavesi yapılmıştır. Şekil 4.1’de Vanadis 10 kalite çeliğe uygulanan yüzey işlemleri görülmektedir. En dış katman olarak çoklu katman yapısının dışında takım çeliği ile üzerinde çalışan iş parçası arasındaki sürtünme katsayısını azaltmak amacıyla TiCN biriktirilmiştir [40].



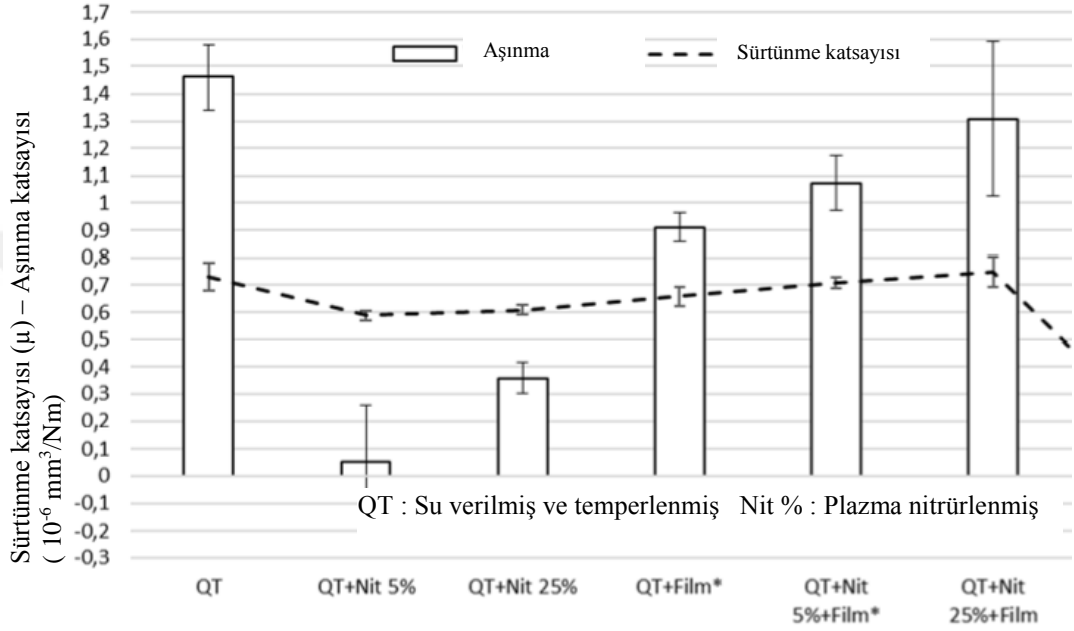
**Şekil 4.1 :** Toz metalurjisi ile üretilen Vanadis 10 kalite takım çeliğinin kaplama tabakasındaki katmanların şematik gösterimi [40].

Kaplama tabakasının ortalama kalınlığı film kesitleri üzerinden yapılan SEM incelemesi ile 1,64 µm olarak belirlenmiştir. Rockwell C yapışma deneyinin sonucu Şekil 4.2’de görülmektedir.



**Şekil 4.2 :** Farklı kaplama tabakalarına sahip su verilmiş ve temperlenmiş Vanadis 10 kalite takım çeliğinin yüzeyinin Rockwell C yapışma deneyi sonrası SEM fotoğrafları (a) film tabakalı, (b) %5 N<sub>2</sub> ve film tabakalı, (c) % 25 N<sub>2</sub> ve film tabakalı [40].

Rockwell C yapışma deneyi sonunda, % 25 N<sub>2</sub> içeren atmosferde plazma nitrüleme uygulanmış numunede çatlak gözlemlenmiştir. Bu durum, % 25 N<sub>2</sub> atmosferindeki plazma nitrüleme işleminin çok katmanlı filmin yapışma dayanımı kötü etkilediğini göstermektedir. Şekil 4.3’de farklı yüzey işlemleri uygulanan Vanadis 10 kalite takım çeliğinin aşınma deneyi sonunda oluşturulan sürtünme katsayısı ve aşınma katsayısındaki değişim görülmektedir.



**Şekil 4.3 :** Farklı yüzey işlemleri uygulanan Vanadis 10 kalite takım çeliğinin aşınma katsayısı ve sürtünme katsayısının uygulanan işleme göre değişimi [40].

Çalışma sonucunda % 5 N<sub>2</sub> atmosferi altında plazma nitrüleme işlemi gerçekleştirilen deney numunesinin en iyi aşınma direncine sahip olduğu belirtilmiştir. Bununla beraber % 25 N<sub>2</sub> atmosferi altında yapılan plazma nitrüleme ve çok katmanlı film tabakasının zayıf yapışma dayanımından dolayı aşınma direncinin düştüğü (aşınma katsayısının arttığı) görülmüştür. % 25 N<sub>2</sub> atmosferi altında plazma nitrüleme işlemi yapılan numuneden daha iyi yapışma özelliği gösteren % 5 N<sub>2</sub> azot atmosferi altından plazma nitrüleme işlemi uygulanan numune bu özelliğini aşınma deneylerinde de sergilemiştir [40].

Toz metalurjisi ile üretilen takım çeliklerinin çalışma ortamlarında sergilediği mekanik özelliklerini geliştirmeyi amaçlayan yüzey işlemleri çalışmaları literatürde hala devam etmektedir. Tüm bu yüzey modifikasyonlarının araştırılma nedeni takım çeliklerinin buldukları çalışma koşullarında hizmet ömürlerini uzatmak ve özelliklerini optimize etmektir.



## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada toz metalurjisi ile üretilen ASP 2005 ve ASP 2012 kalite takım çelikleri altlık malzeme olarak kullanılmıştır. Kimyasal bileşimleri farklı bu iki takım çeliği sıcak daldırma alüminyum metodu ile kaplanmıştır. Farklı kimyasal bileşim ve ısıl işlem sıcaklığının, kaplama yapısı, aşınma direnci, korozyon direnci ve sertliğe olan etkisi incelenmiştir. Altlık olarak kullanılan çelikler ile kaplanmış ve kaplandıktan sonra ısıl işleme maruz bırakılmış takım çeliği numunelerine metalografik işlemler uygulandıktan sonra optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu, EDS analizi, XRD analizi, sertlik, aşınma ve korozyon testleri sıra ile yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar malzemelerin herhangi bir yüzey işlem kombinasyonuna maruz bırakılmayan ve sadece su verilmiş halleri ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

### 5.1 Numune Hazırlama İşlemleri

ASP 2005 ve ASP 2012 kalite takım çeliklerinden hazırlanan numuneler sıcak daldırma alüminyum kaplama işleminden önce 10 mm x 10 mm x 55 mm ölçülerinde kesilmiştir. Kaplama işlemi için bağlanacak olan paslanmaz çelik tel için uygun çapta delik delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kesme işleminden kaynaklanan izlerin yok edilmesi ve her bir numune yüzeyinin kaplama kalitesinin azalmasına etki etmeyecek şekilde uygun yüzey pürüzlülüğüne sahip olması için kesilen numunelerin bütün yüzeyleri sırası ile 80, 120, 320, 400 mesh SiC zımparalar yardımıyla zımparalanmış ve aseton ile yüzey temizleme işlemi yapılmıştır. Uygun yüzey pürüzlülüğü, sıcak daldırma alüminyum kaplama işlemi sırasında kaplanan altlık malzeme olan takım çeliklerinin kaplama ile olan yapışma dayanımını arttırmak amacıyla sağlanmıştır. Zımparalanma ve ilk yüzey temizleme işlemi tamamlanmış olan numuneler ultrasonik banyoda hidroklorik asit çözeltisi yardımı ile kirden ve yağdan arındırılmak amacıyla 5 dakika süreyle temizlenmiş ardından alkol ve saf su ile yıkanarak kurutulmuştur.

## 5.2 Sıcak Daldırma Yöntemi ile Alüminyum Kaplama İşlemi

Sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplama işleminde Al-ağ. % 12Si alaşımı Şekil 5.1’de görülen MF – 1000 elektrikli ertitme fırını içerisinde ertitilmiştir. Kaplama işleminde kullanılan alüminyum alaşımının kimyasal analizi Çizelge 5.1’de belirtilmiştir.

**Çizelge 5.1 :** Kaplama işleminde kullanılan alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (% ağ).

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Zn
Kalan	12	0,45	0,08	0,55	0,15

Alüminyum alaşımı, fırın içerisinde yer alan grafit potada 700°C sıcaklıkta ertitilmiştir. Pota içerisinde yer alan ertimiş alüminyum alaşımının sıcaklığı termokupl ile kontrol edilerek uygun sıcaklık değerindeki ertimiş alaşımın yüzeyinde cüruf oluşturmak amacıyla % 60 NaCl ve % 40 KCl karışımı toz halinde ertimiş alaşımın üzerine dökülmüş ve 10 dakika beklenmiştir. Oluşan cüruf kaplama işleminden önce temizlenerek uzaklaştırılmıştır.



**Şekil 5.1 :** MF – 1000 elektrikli ertitme ocağı.

## 5.3 Difüzyon Tavlaması

Sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplanmış ASP 2005 ve ASP 2012 kalite takım çelikleri grafit pota içerisinde Şekil 5.2’de görülen Protherm PLF – 120/5 model elektrikli fırın yardımıyla difüzyon tavlamasına maruz bırakılmıştır. Malzemelerin yüzeyinden dekarbürizasyonun engellemek amacıyla, numuneler dökme demir talaşı için gömülmüştür. Isıl işlem sıcaklığı, çelik üreticisinin verdiği östenitleme

sıcaklığından hareketle ASP 2005 kalite için 1100°C, ASP 2012 kalite için 1070°C olarak uygulanmıştır. Fırının 1000°C sıcaklığa ulaşma süresi yaklaşık olarak 80 dakikadır. Numuneler oda sıcaklığından itibaren fırın içerisinde belirlenen ısı işlem sıcaklığına kadar bekletilmiş ve 1 saat bu sıcaklıkta tutularak daha sonra havada oda sıcaklığına soğutulmuştur.



Şekil 5.2 : Protherm PLF 120/5 elektrikli fırın.

#### 5.4 Metalografik İşlemler

Sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplanan ve difüzyon tavlama uygulanmış numunelerde kaplama kalınlığını belirlemek ve kaplama tabakasının karakterizasyonunu yapmak için numunelerin kesitleri soğuk olarak kalıplanmış, sonra metalografik olarak hazırlanmıştır. Bu amaçla, numuneler önce, 80, 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1200 ve 2500 mesh SiC zımpara kağıdı ile kademeli olarak zımparalanmış, daha sonra sırasıyla alümina, koloidal silika ve elmas solüsyon yardımıyla parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Optik mikroskop altında yapılan incelemelerde, leke ve yüzeyde istenmeyen kalıntıların olmaması için numuneler son olarak alkol ile temizlenerek incelemeye hazır hale getirilmiştir.

Aşınma deneyi uygulanan numunelerin yüzeyindeki aşınma izleri ise HITACHI – TM 1000 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Şekil 5.3’de Nikon Eclipse LV150L model optik mikroskop ve SEM cihazlarının görüntüleri verilmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 5.3 :** (a) Hitachi TM – 1000 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve (b) Nikon Eclipse LV150L optik mikroskop.

### 5.5 XRD Analizleri

Farklı metalurjik işlemler uygulanan numunelerin yüzey karakterizasyon analizleri X-ışınları difraktometresi ile incelenmiştir. XRD analizleri  $CuK\alpha$  tüp aracılığıyla,  $10 - 90^\circ$  arasında  $0,02^\circ$ lik adımla ile taranarak yapılmıştır. Şekil 5.4’de GBC MMA 027 model X-ışınları difraktometresi görülmektedir.



**Şekil 5.4 :** GBC MMA 027 model X – Işınları cihazı.

### 5.6 Mikrosertlik Deneyleri

Mikrosertlik ölçümleri, Şekil 5.5’de görülen Wilson Tukon 1102 model mikrosertlik cihazında Vickers uç kullanılarak ve 100 g yük altında yapılmıştır.



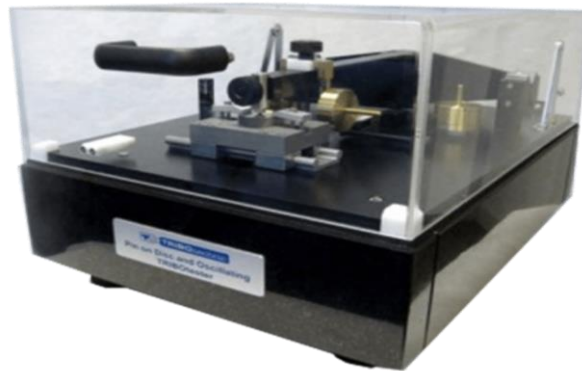
**Şekil 5.5 :** Wilson Tukon 1102 sertlik testi cihazı.

### **5.7 Yapışma Deneyleri**

Rockwell C yapışma deneyi, HDA ve HDA + DT uygulanmış takım çeliklerinin yüzeylerine uygulanmıştır. Deney sonunda, yüzeylerin yapışma dayanımı kalitatif olarak HF skalasına göre değerlendirmiştir.

### **5.8 Aşınma Deneyleri**

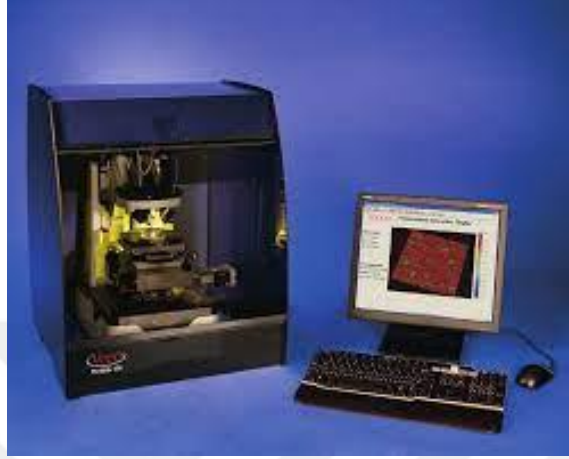
Aşınma deneyleri, herhangi bir işlem uygulanmayan takım çeliklerinin yanı sıra, HDA, HDA + DT işlemi uygulanan numunelere ve su verilmiş numunelere uygulanmıştır. Aşınma deneylerinde Şekil 5.6'da görülen Tribotechnic marka karşıt hareketli aşınma deney cihazı kullanılmıştır. Aşındırıcı olarak, 6 mm çapında alumina bilyanın kullanıldığı deneyler, 3N yük, 50 m toplam kayma mesafesi, 10 mm/s kayma hızı altında ve karşıt hareket genliği 5 mm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 5.6 :** TRIBOtester karşıt hareketli aşınma cihazı.

## 5.9 Profilometre Ölçümleri

Aşınma deneyi sonrası numune yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin genişlik, derinlik ve alanı Şekil 5.7'de görülen Veeco Dektak 150 model profilometre cihazı ile ölçülmüştür.



Şekil 5.7 : Veeco Dektak 150 profilometre cihazı.

## 5.10 Korozyon Deneyleri

Potensiyodinamik korozyon deneyleri, % 3,5 NaCl sulu çözeltisi içinde, karşıt elektrot olarak Pt, referans elektrot olarak ise gümüş / gümüş klorür ( Ag / AgCl) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin iletkenliğini sağlamak amacıyla bakır tel ile numune arasında temas sağlanarak yalnızca elektrolit ile temasta olacak yüzeyleri açıkta kalacak şekilde epoksi reçine yardımıyla kalıba alma gerçekleştirilmiştir.

## 6. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

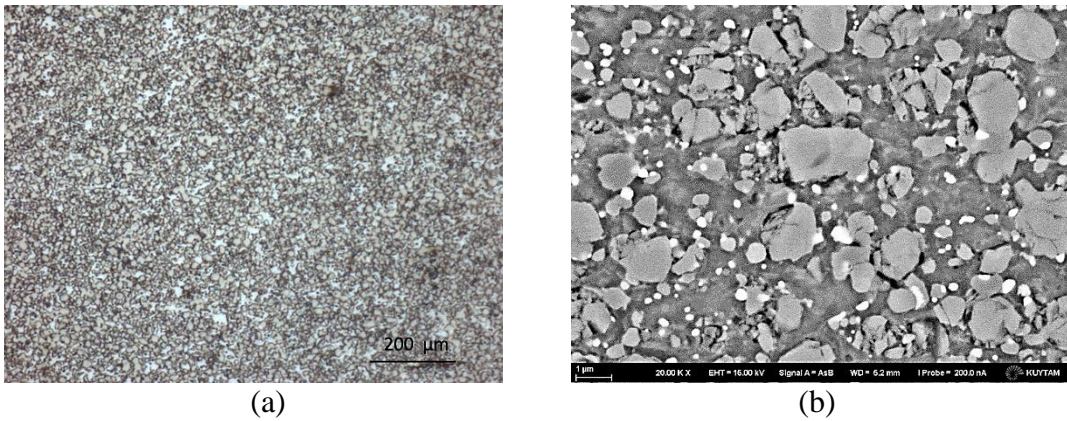
ASP 2005 ve ASP 2012 kalite takım çeliklerine uygulanan HDA ve HDA + DT işlemlerinin, kaplama yapısı ve morfolojisi ile sertlik, yapışma dayanımı, aşınma ve korozyon direncine etkisi incelenmiştir.

### 6.1 Takım Çelikleri ve Kaplama Tabakalarının Mikroyapısı

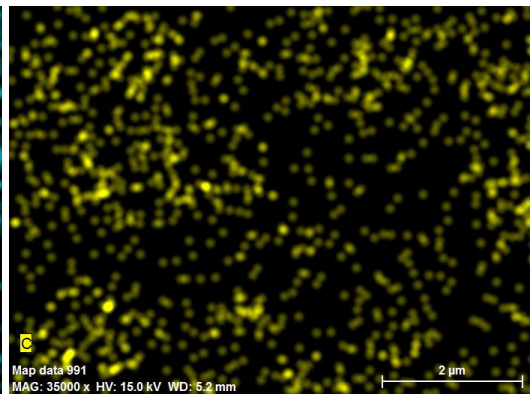
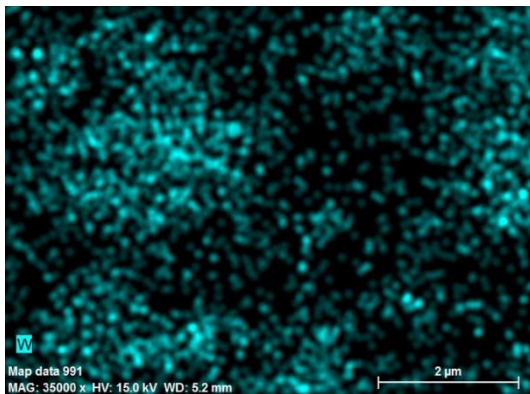
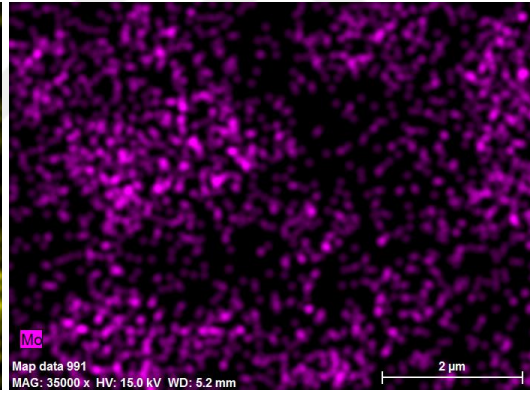
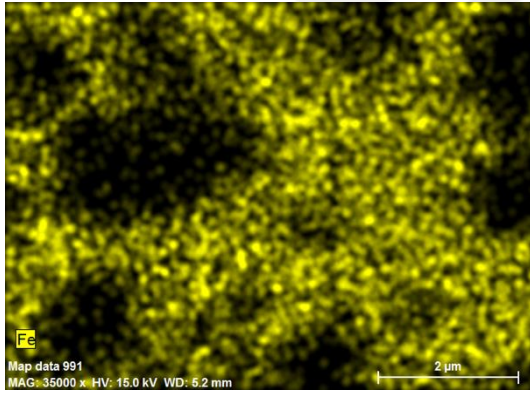
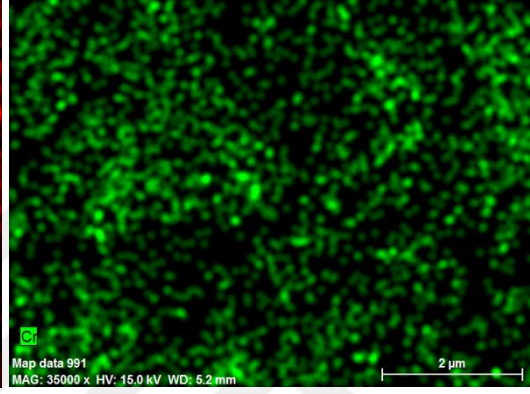
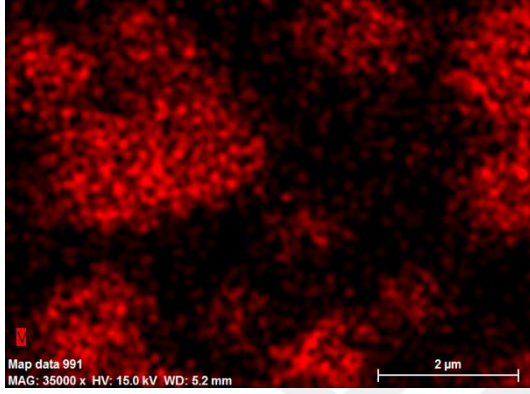
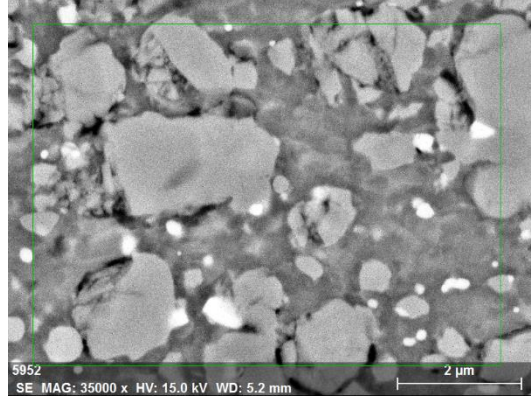
ASP 2005 kalite takım çeliğinin kimyasal bileşimi Çizelge 6.1’de, optik mikroskop fotoğrafı Şekil 6.1’de, SEM-EDS haritalama analizi ise Şekil 6.2’de verilmiştir. Şekil 6.3’de bu takım çeliğinin XRD paterni görülmektedir. ASP 2012 kalite takım çeliğinin kimyasal bileşimi ise Çizelge 6.2’de, optik mikroskop fotoğrafı Şekil 6.4’de, SEM-EDS haritalama analizi ise Şekil 6.5’de verilmiştir. Şekil 6.6’da bu takım çeliğinin XRD paterni görülmektedir.

**Çizelge 6.1** : ASP 2005 kalite çeliğin nominal kimyasal bileşimi (% ağırlık) [25].

C	Cr	Mo	W	V	Fe
1,50	4,0	2,5	2,5	4,0	Kalan

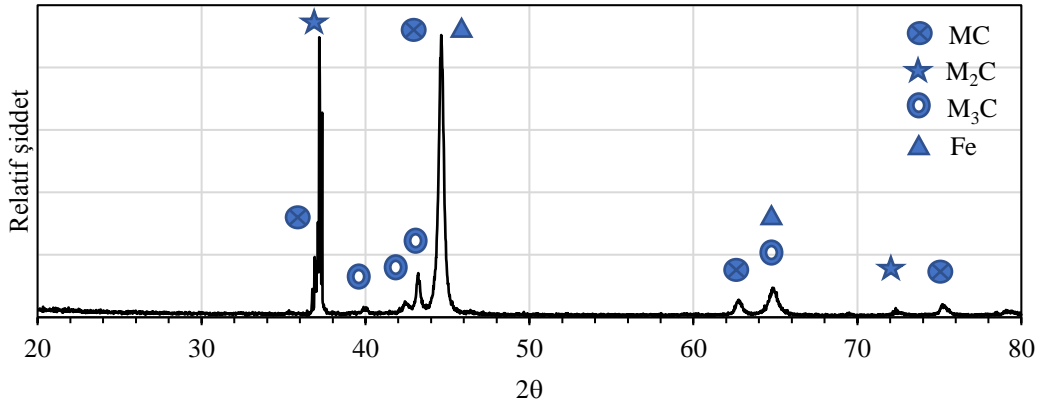


**Şekil 6.1** : ASP 2005 kalite çeliğin mikroyapı fotoğrafları (a) Optik mikroskop ve (b) SEM.



Şekil 6.2 : ASP 2005 kalite çeliğin mikroyapısının SEM fotoğrafı ve EDS elementel haritalama analizi fotoğrafları.

ASP 2005 kalite takım çeliği yoğun karbürler içeren bir takım çeliğidir. Karbür morfolojisi genellikle köşelidir, ancak az miktarda küresel karbür de bulunmaktadır. Karbürlerin boyut aralığı 0,2-2 µm olarak belirlenmiştir. Mikroyapıda gözlenen karbürlerin tipini kalitatif olarak belirlemek amacıyla SEM-EDS haritalama analizi yapılmıştır (Şekil 6.2). Buna göre boyutu yaklaşık 2 µm olan ve köşeli morfolojideki karbürlerin (Şekil 6.2’de gözlenen en büyük boyutlu karbürler), SEM-EDS haritalama analizi yüksek sinyal şiddetinden düşük sinyal şiddetine göre değerlendirildiğinde, söz konusu karbürlerin büyük ölçüde V olmak üzere W, Mo ve Cr de içerdiği belirlenmiştir. Mikroyapıdaki daha küçük boyutlu ve parlak görünen karbürlerin ise Fe içerdiği görülmektedir. ASP 2005 kalite takım çeliğinin XRD analizi, mikroyapıdaki karbürlerin, MC, M<sub>2</sub>C ve M<sub>3</sub>C tipinde olduğunu göstermektedir. Ayrıca XRD paterninde, matriksten kaynaklanan Fe pikleri de gözlenmektedir.

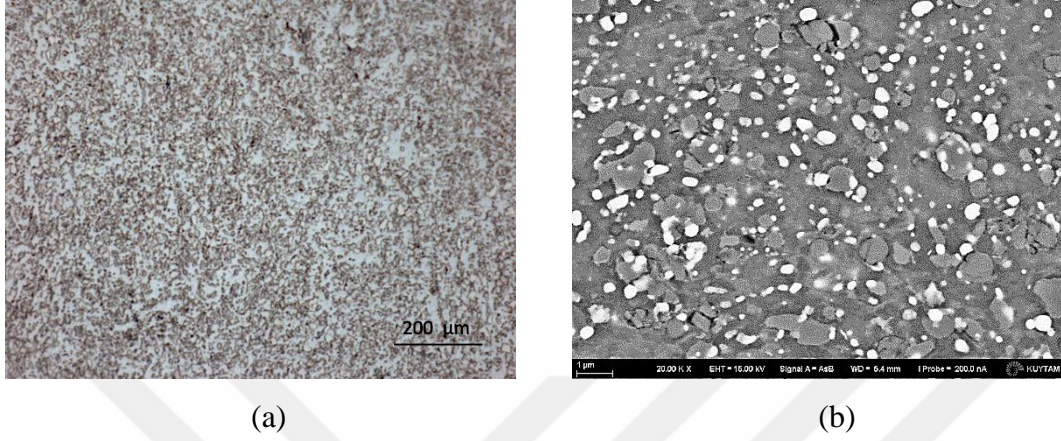


**Şekil 6.3 :** ASP 2005 kalite çeliğin XRD paterni.

ASP 2012 kalite takım çeliğinin Çizelge 6.2’deki kimyasal analizi, çeliğin Cr, Mo, W ve V gibi güçlü karbür yapıcı elementlerin yanı sıra, Si ve Mn içerdiğini göstermektedir. ASP 2012 kalite çeliğin mikroyapısının Şekil 6.4’de görülen optik mikroskop ve SEM fotoğrafları, çeliğin yüksek oranda karbür içerdiğini (Şekil 6.4a), karbürlerin köşeli ve küresel morfolojide olduğunu ortaya çıkarmıştır. Karbür boyutu 0,2 – 1 µm arasında değişmektedir. ASP 2005 kalite takım çeliği ile kıyaslandığında (Şekil 6.1b), ASP 2012 kalite takım çeliğinde karbür yoğunluğunun ve karbür boyutunun daha düşük olduğu görülmektedir.

**Çizelge 6.2 :** ASP 2012 kalite çeliğin nominal kimyasal bileşimi (% ağı.) [26].

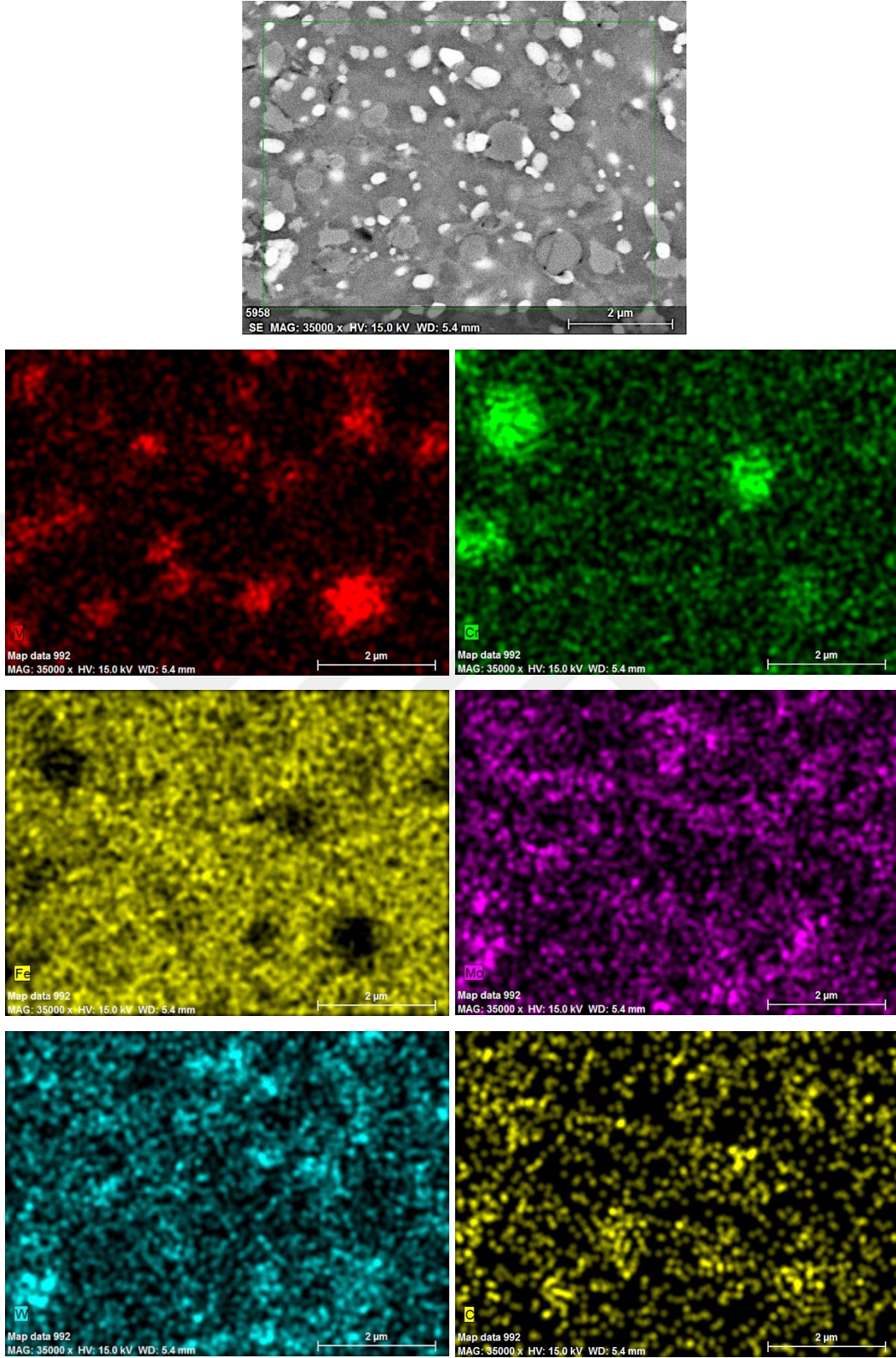
C	Cr	Mo	W	Si	V	Mn	Fe
0,60	4,0	2,0	2,1	1,0	1,5	0,3	Kalan



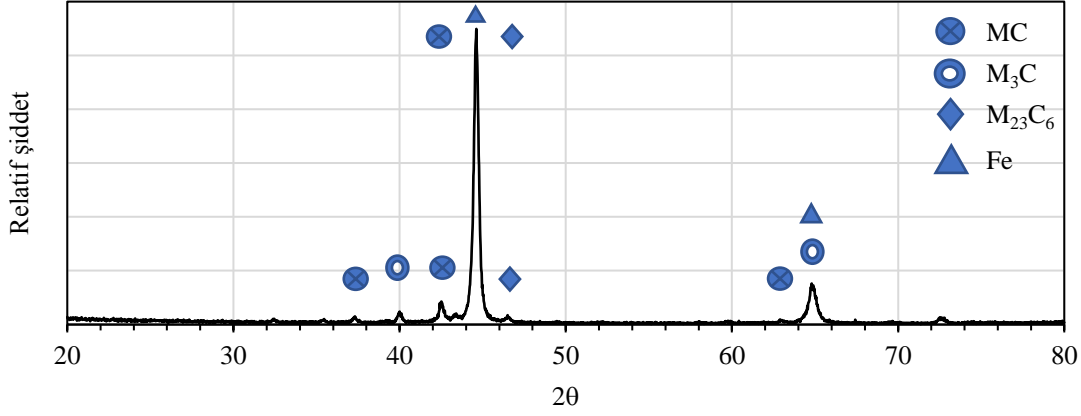
**Şekil 6.4 :** ASP 2012 kalite çeliğin mikroyapı fotoğrafları (a) Optik mikroskop ve (b) SEM.

ASP 2012 kalite takım çeliğinin mikroyapısındaki karbürlerin tipini belirlemek amacıyla yapılan SEM-EDS haritalama analizi sonuçlarına göre (Şekil 6.5), büyük boyutlu karbürlerin (~1 mm) nispeten yüksek oranda V ile bunun yanı sıra W, Mo ve Cr içerdiği, küçük boyutlu ve SEM fotoğraflarında parlak görünen küresel karbürlerin ise daha çok Fe içerdiği belirlenmiştir. Bu nedenle, ASP 2005 ve ASP 2012 kalite takım çeliklerinin mikroyapısındaki karbürlerin benzer kimyasal bileşimde olduğu, aralarındaki farkın ASP 2012 kalite takım çeliğindeki karbürlerin daha küçük boyutlu olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

Şekil 6.6'da görülen XRD paterni, ASP 2012 kalite çeliğin mikroyapısında, MC, M<sub>3</sub>C ve M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> tipi karbürler bulunduğunu göstermektedir. Ancak, MC ve M<sub>3</sub>C tipi karbürlerin pik şiddetleri ASP 2005 kalite takım çeliğindekiyle göre nispeten düşüktür. M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> tipi karbürün pik şiddeti ise ASP 2005 kalite takım çeliğinde görülmez iken, ASP 2012 kalite takım çeliğinde yüksektir. Bu nedenle, her iki çeliğin kimyasal bileşimi arasındaki farkın, oluşan karbür tipi ve oranını önemli ölçüde etkilediği, ASP 2005 kalitede daha yüksek oranda bulunan V, W ve Mo elementlerinin M<sub>2</sub>C, MC ve M<sub>3</sub>C tipi karbürlerin oluşumunu teşvik ettiği, ASP 2012 kalite takım çeliğinde bulunan daha yüksek oranda bulunan Cr elementinin ise M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> tipi karbür oluşumunu teşvik ettiği sonucuna varılmıştır.

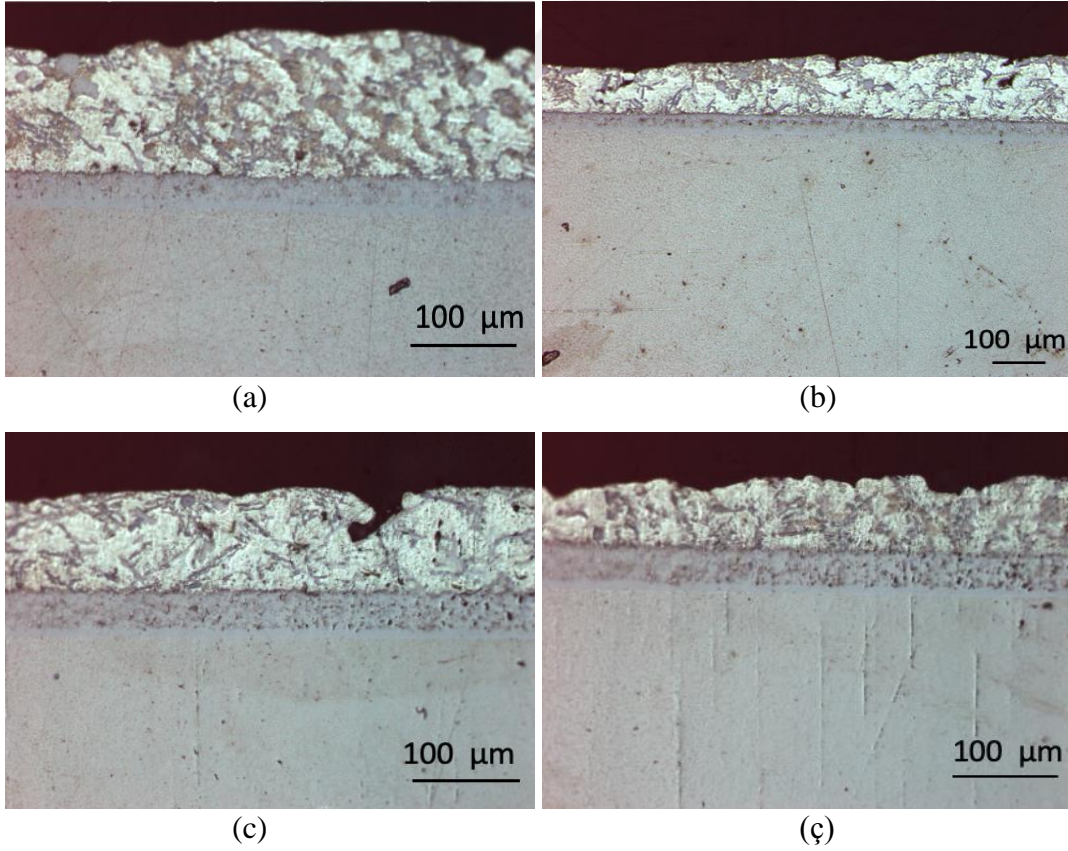


Şekil 6.5 : ASP 2012 kalite çeliğin mikroyapısının SEM fotoğrafı ve EDS elementel haritalama analizi fotoğrafları.



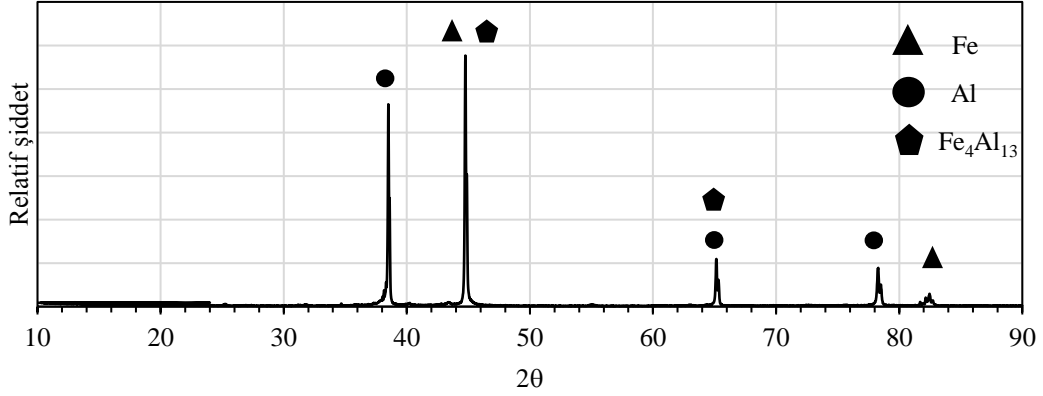
**Şekil 6.6 :** ASP 2012 kalite çeliğin XRD paterni.

Şekil 6.7’de ASP 2005 (Şekil 6.7a ve b) ve ASP 2012 (Şekil 6.7 c ve ç) kalite takım çeliklerinin kesitinin SDA sonrası optik mikroskop fotoğrafları görülmektedir. Her iki kalite takım çeliğinde de altlık çeliğin üzerinde 2 katman bulunmaktadır. Her bir katmanın kimyasal olarak incelenmesi amacıyla, XRD analizleri ve noktasal EDS analizleri yapılmış olup, sonuçları ilerleyen bölümlerde belirtilmiştir.

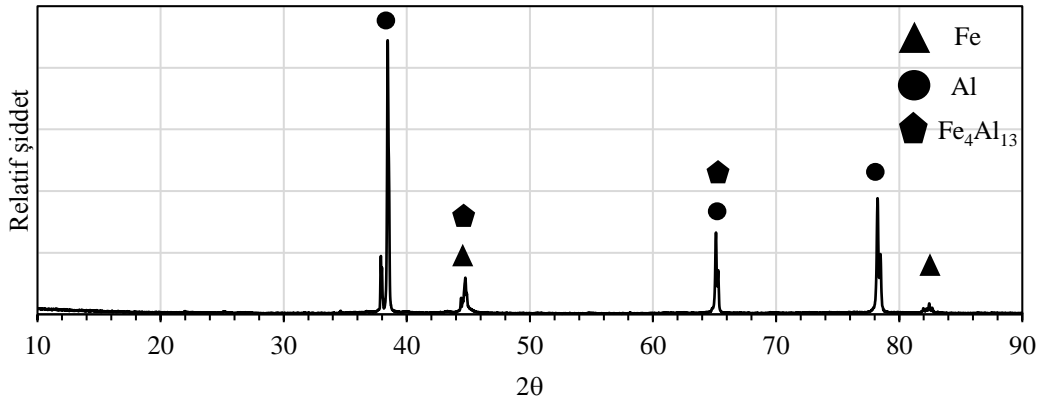


**Şekil 6.7 :** SDA uygulanmış (a) ve (b) ASP 2005, (c) ve (ç) ASP 2012 kalite çeliklerin optik mikroskop fotoğrafları.

Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’da sırasıyla ASP 2005 ve ASP 2012 kalite takım çeliklerinin SDA sonrası XRD paterni görülmektedir. SDA işlemi sonunda oluşan yaklaşık 100 µm kalınlığındaki alüminyum tabakasından dolayı XRD paterninde alüminyumca zengin faz ve altlık çelikten kaynaklanan Fe esaslı faza ait pikler görülmektedir.



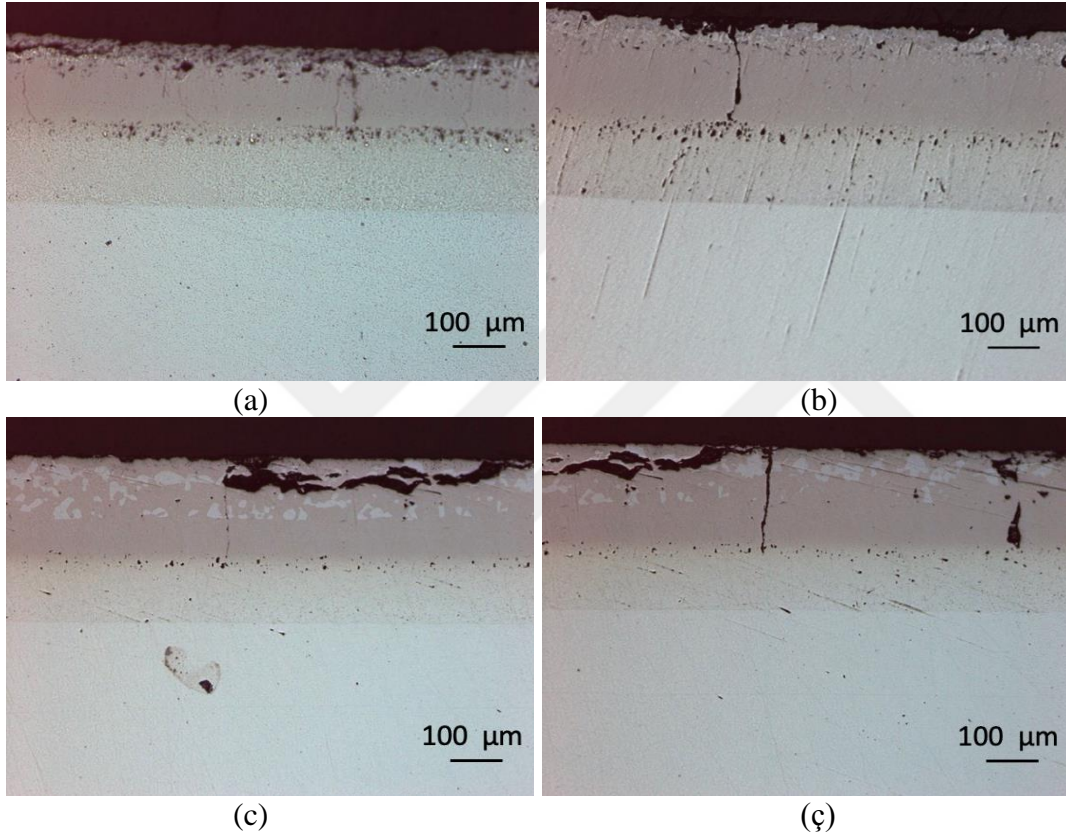
Şekil 6.8 : SDA uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin XRD paterni.



Şekil 6.9 : SDA uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin XRD paterni.

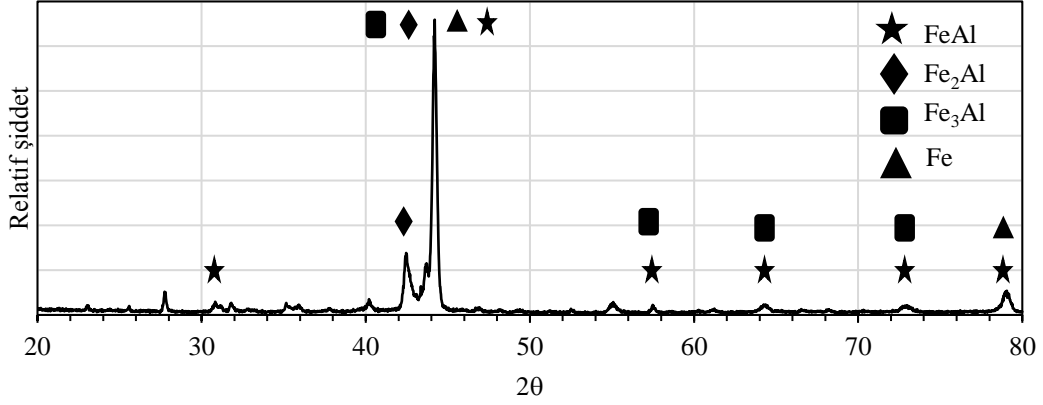
Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de sırasıyla SDA+DT uygulanan ASP 2012 ve ASP 2005 kalite takım çeliklerinin kesitlerinin optik mikroskop fotoğrafları görülmektedir. Difüzyon tavlaması (DT) işleminden sonra kaplama tabakasının kalınlığı, SDA sonrasına göre önemli ölçüde artmıştır. Her iki çelikte de SDA sonrası yaklaşık 100 µm olan kaplama kalınlığı DT işleminden sonra ASP 2005 kalite çelikte 360 µm, ASP 2012 kalite çelikte yaklaşık 310 µm olarak belirlenmiştir. Toplam kaplama kalınlığının artmasının yanı sıra, DT işlemiyle difüzyon bölgesinin de (altlık üzerindeki 1. katman) kalınlığının arttığı ve homojenliğinin arttığı görülmektedir. Ancak altlık malzemenen itibaren ilk katman olan difüzyon bölgesi ile en dış katman arasında Kirkendall

porozite olarak tanımlanan süreksizlikler görülmektedir. ASP 2005 kalite çelikte Kirkendall porozite oranı bir miktar daha fazladır. Ayrıca her iki çeliğin en dış katmanında da kaplama tabakasına dik çatlaklar ve ASP 2012 kalite çeliğin en dış katmanında yüzeye paralel konumlanmış büyük boşluklar görülmektedir. ASP 2005 kalite çelik için en dış katmanda büyük boyutlu süreksizliklerin görüldüğü bölgede, optik mikroskopta beyaz olarak görülen bir faz belirlenmiştir. Bu fazın kimyasal bileşimi, SEM-EDS ile analiz edilmiş olup, ilerleyen bölümlerde belirtilecektir.

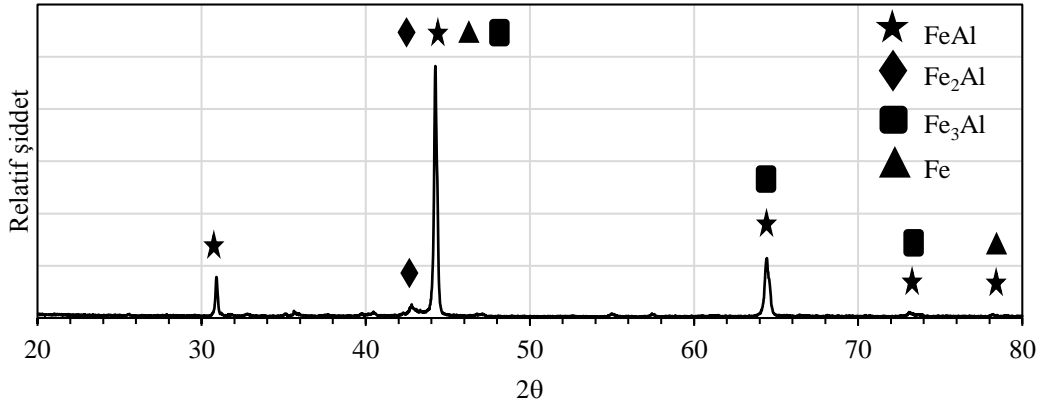


**Şekil 6.10 :** SDA + DT uygulanmış (a) ve (b) ASP 2005, (c) ve (d) ASP 2012 kalite çeliklerin optik mikroskop fotoğrafları.

Şekil 6.11 ve Şekil 6.12’de sırasıyla ASP 2005 ve ASP 2012 kalite çeliklerin SDA+DT işlemi sonrası XRD paternleri verilmiştir. Buna göre, ASP 2005 kalite çelikte kaplama tabakasının FeAl ve Fe<sub>3</sub>Al fazlarını, ASP 2012 kalite çelikte ise FeAl<sub>2</sub>, FeAl ve Fe<sub>3</sub>Al fazlarını içerdiği görülmektedir.



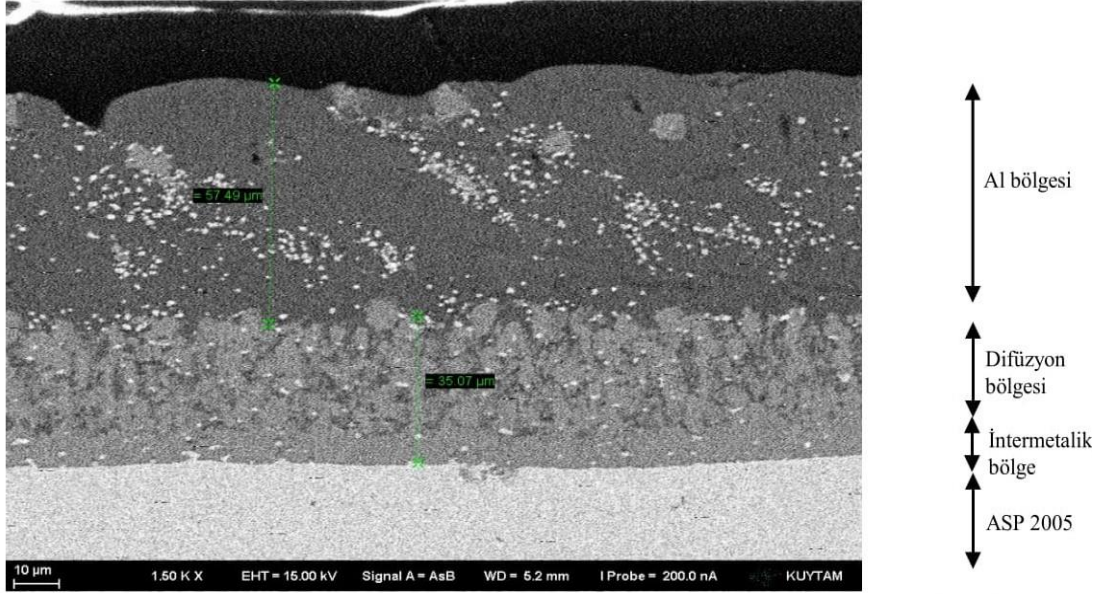
Şekil 6.11 : SDA + DT uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin XRD paterni.



Şekil 6.12 : SDA + DT uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin XRD paterni.

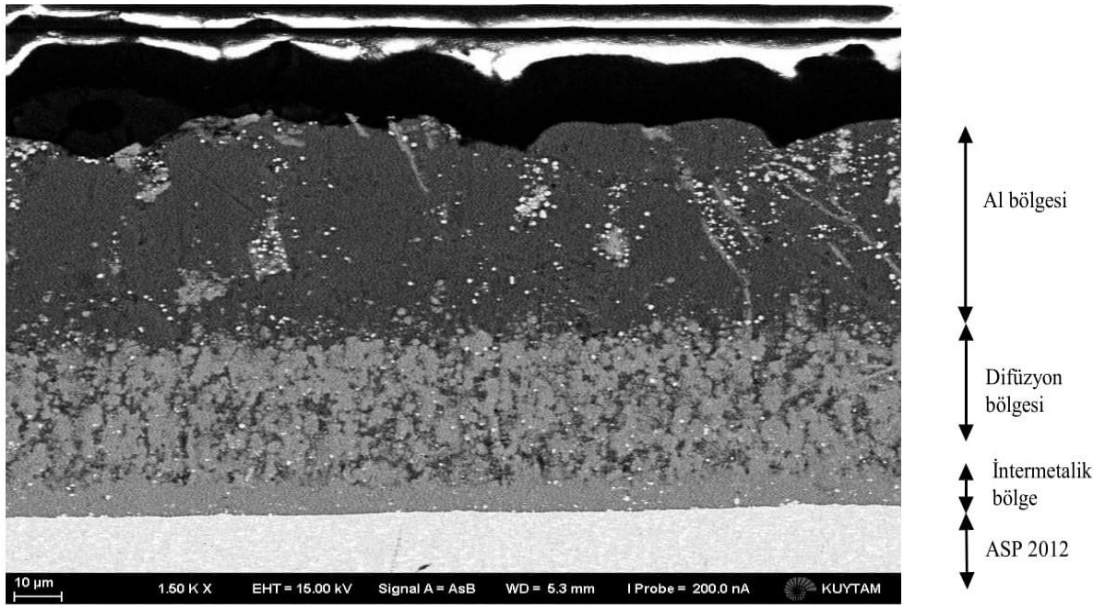
ASP 2005 ve ASP 2012 takım çelikleri için toplam kaplama kalınlığı parametrelere bağlı olarak farklılıklar göstermiştir. Buna bağlı olarak difüzyon tavlaması işleminden sonra kaplama morfolojisinde sadece sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplanmış numunelere kıyasla farklı fazlar da ortaya çıkmıştır. Kapsama yapısının morfolojisi difüzyon tavlaması işlemiyle tamamen farklılık göstererek kaplama kalınlığını arttırmıştır. SDA işleminden sonra gerçekleştirilen difüzyon tavlaması işleminin, ASP 2005 ve ASP 2012 kalite takım çeliklerinde farklı kalınlıkta ve morfolojide kaplama tabakası üretecek nitelikte önemli bir süreç olarak görülmüştür.

Şekil 6.13’de verilen SEM fotoğrafında ASP 2005 kalite takım çeliğinde en dış katmanda yer alan koyu bölgeler alüminyum açısından zengin olan bölge, en alt katmanda yer alan açık gri bölgeler altlık malzeme olan ASP 2005 kalite takım çeliği ve bu iki bölge arasında yer alan bölge ise difüzyon bölgesi olarak tanımlanmıştır.



Şekil 6.13 : SDA uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin kesitinin SEM fotoğrafı.

Şekil 6.14’de ASP 2012 takım çeliğinin alüminyum kaplanmış SEM kesiti görüntüsü gösterilmektedir. ASP 2012 kalite takım çeliğinin sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplanmış halinin kesit görüntüsünde gözlenen farklı fazlar ana metal, intermetalik ve difüzyon bölgesi ile alüminyumca zengin olan Al bölgesi olarak sınıflandırılmıştır.



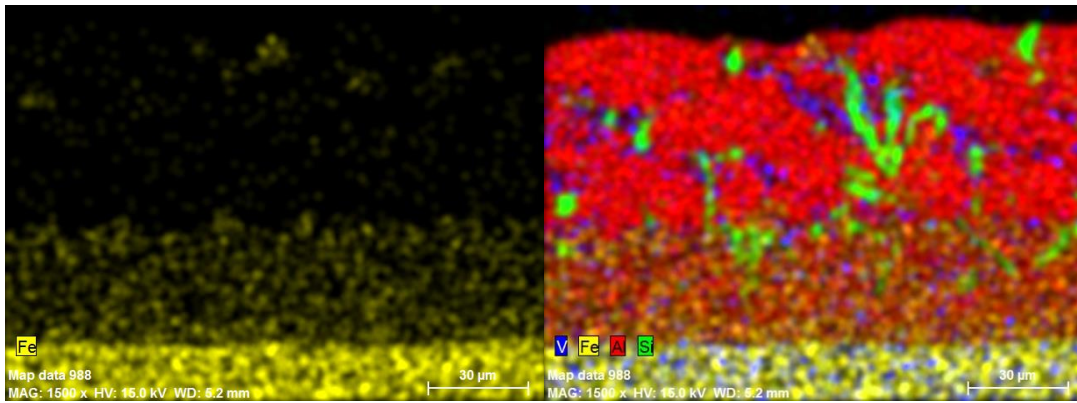
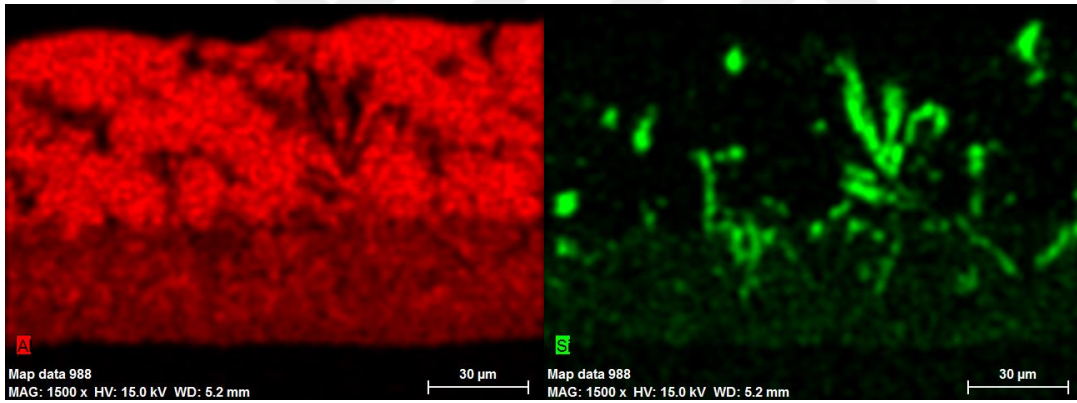
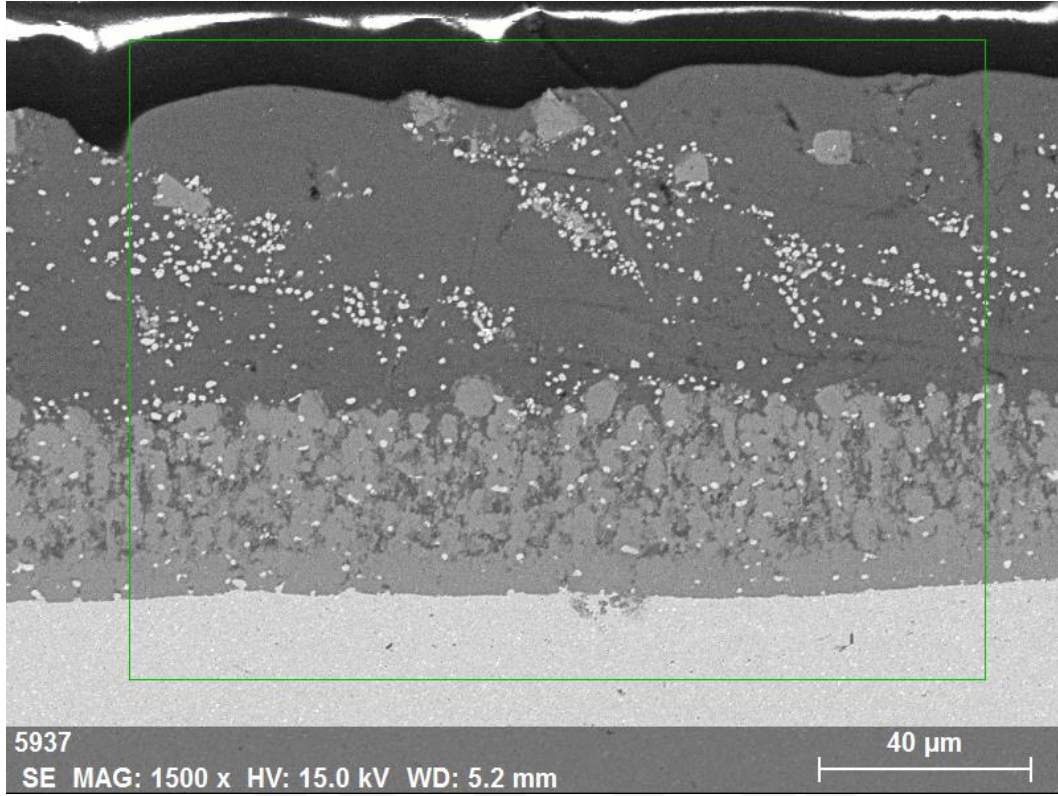
Şekil 6.14 : SDA uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin kesitinin SEM fotoğrafı.

İki farklı takım çeliği arasında kaplama kalınlığı olarak büyük farklılıklar gözlenmemiştir. Alüminyumca daha zengin olan bölgelerdeki kaplama kalınlıkları ASP 2005 kalite takım çeliğinde 57 μm ASP 2012 kalitede ise 50 μm olarak

belirlenmiştir. İntermetalik ve difüzyon bölgelerinin kalınlıkları ASP 2012 kalite için 40 µm ve ASP 2005 kalite için ise 35 µm değerlerinde hesaplanmıştır. ASP 2012 kalite takım çeliğinin intermetalik bölgesinin ASP 2005 kalite takım çeliğinde göre daha düzgün ve homojen bir yapıda olduğu görülmektedir. Alüminyumun ergime derecesinin hemen üzerindeki sıcaklık değerinde yapılan kaplama işlemi sonucunda takım çeliklerimizin üzerinde oluşan kaplama kalınlıkları birbirine yakın ve benzer bir faz dağılımı görüntüsü vermiştir. İnce ve düz bir intermetalik ve difüzyon bölgesine sahip olan her iki takım çeliği için de dış katmanlarda Al açısından daha zengin olan bölgeler oluşmaktadır.

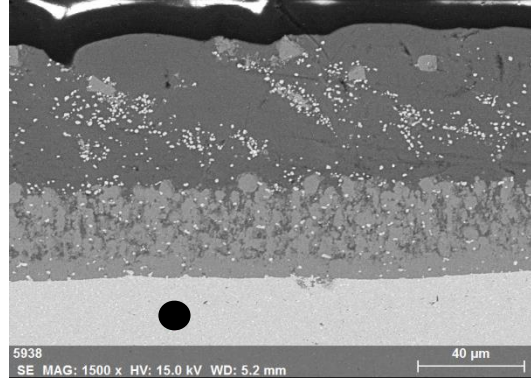
Şekil 6.15’de ASP 2005 kalite çeliğin kesit mikroyapısında gerçekleştirilen SEM-EDS haritalama analizi görülmektedir. Buna göre, kaplama tabakasından altlık malzemeye doğru ilerlendiğinde Al sinyal şiddetinin azaldığı ve Fe sinyal şiddetinin ise arttığı belirlenmiştir.

Şekil 6.16’da alüminyum kaplanmış ASP 2005 kalite takım çeliğinin noktasal EDS analizi verileri yer almaktadır. Buna göre noktasal EDS analizi ile demir ve alüminyumun kaplama bölgesinde oluşturduğu intermetalik bölgenin ve diğer alaşım elementlerinin atomik oranları belirtilmiştir. Alüminyum kaplama işleminden sonra kaplama kesitinin farklı bölgelerinde gerçekleştirilen noktasal EDS analizi sonucunda kaplamanın en dış katmanında alüminyumca daha zengin olan bölgeler SEM görüntülerindeki koyu renkli olarak görünmektedir. Bu bölgede gerçekleştirilmiş analizlerde ağırlıkça at. % 99,14 Al ve at. % 0,86 Si oranları belirlenmiştir. Kplama tabakasından intermetalik bölge olarak adlandırılan bölgenin Fe % 16,71, Al % 69,84 bileşiminde olduğu belirlenmiştir. Takım çeliğinin içeriğinde bulunan alaşım elementlerinin ASP 2005 kalite çeliğinden kaplamanın dış katmanlarına doğru difüzyon işlemi gerçekleştirdiği noktasal analiz verileriyle de gözlemlenmiştir.



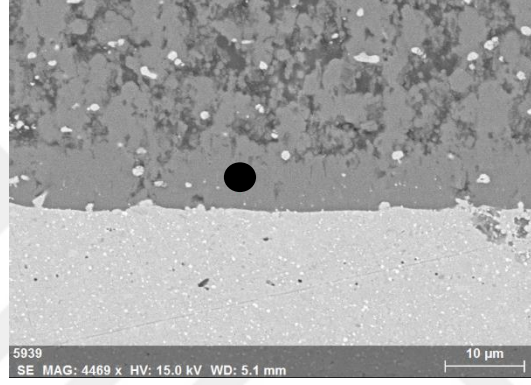
Şekil 6.15 : SDA uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin kesit mikroyapısının SEM fotoğrafı ve EDS elementel haritalama analizi fotoğrafları.

(a)



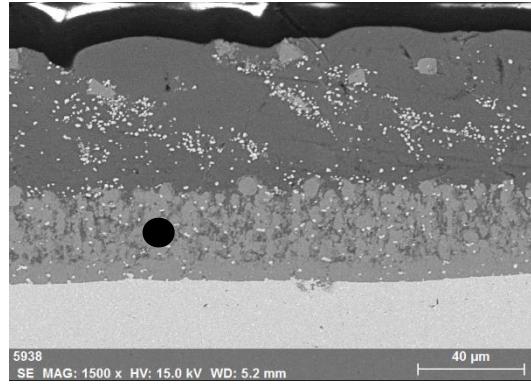
Element	Al	O	Si	Fe	V	Mo	Cr	W
% At.	0,39	2,33	0,89	87,51	2,90	1,25	4,06	0,66

(b)



Element	Al	Si	Fe
% at.	69,84	13,45	16,71

(c)



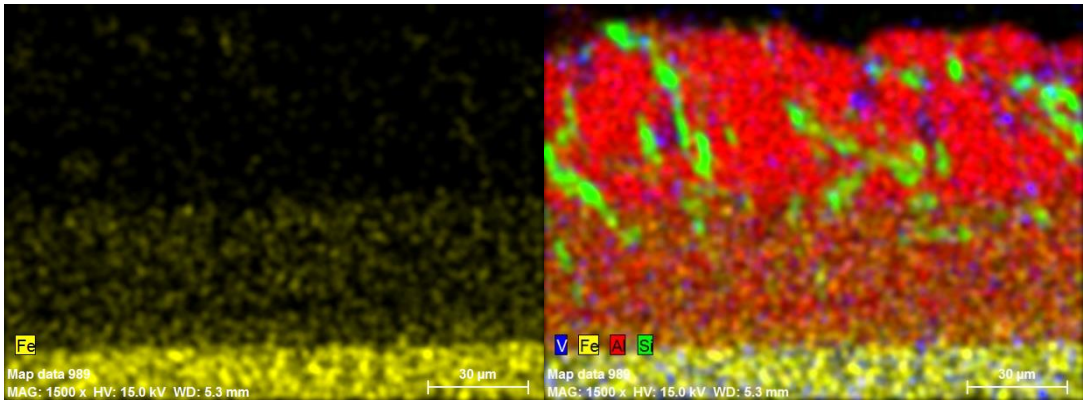
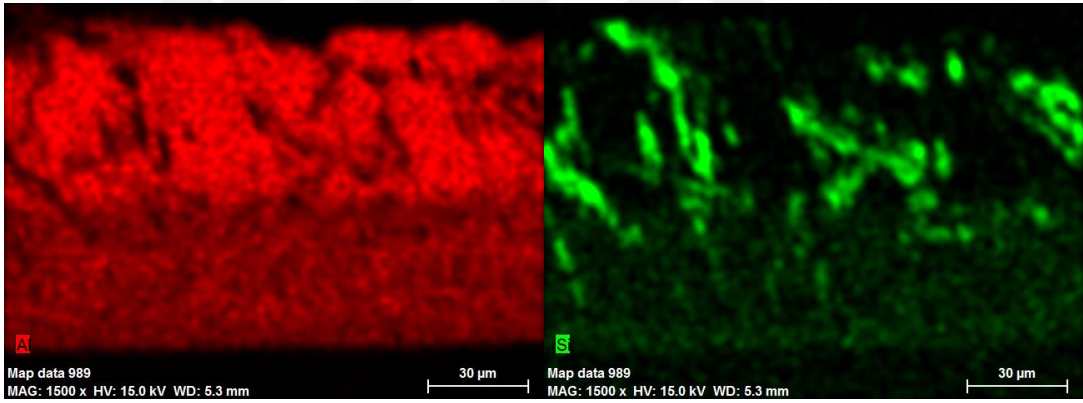
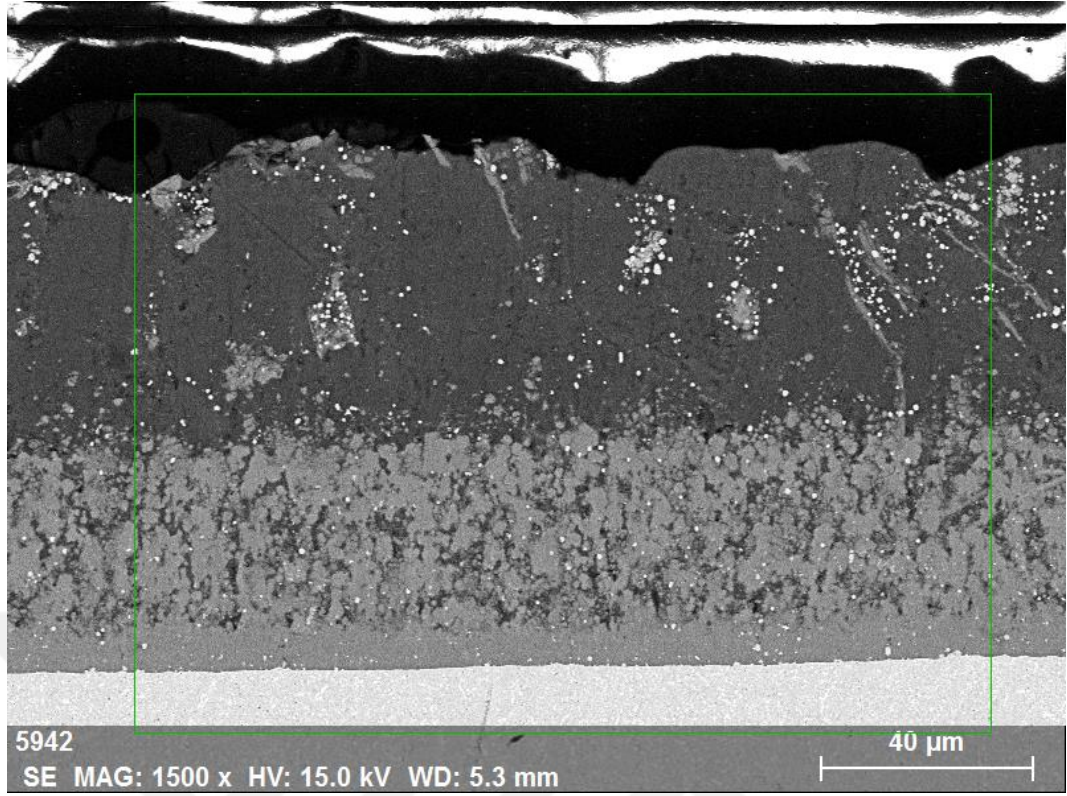
Element	Al	O	Si	Fe	V	Mo	Cr
% at.	51,54	4,04	8,47	11,71	17,55	2,05	2,89

**Şekil 6.16** : SDA uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin kesitinden alınan noktasal EDS analizi konumlarını gösteren SEM fotoğrafları (a) Çelik, (b) İntermetalik bölge ve (c) İnterdifüzyon tabakası.

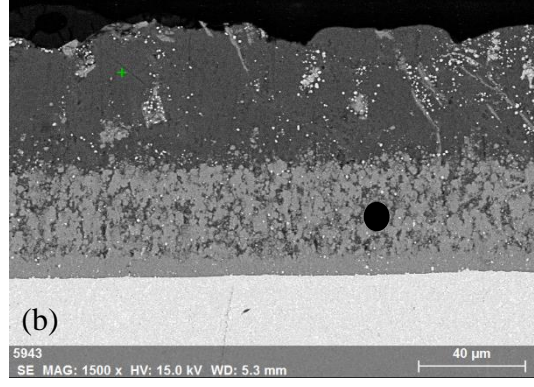
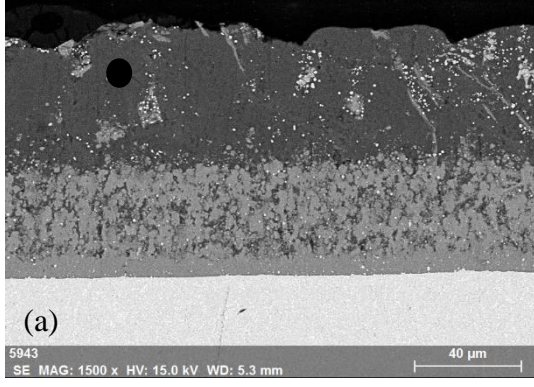
Şekil 6.17’de ASP 2012 kalite çeliğın kaplama kesitine uygulanan EDS haritalama analizi yer almaktadır. Aluminyum kaplanmış ASP 2012 kalite takım çeliğının aluminyum açısından zengin olan dış kaplama bölgesinden difüzyon bölgesine doğru ilerlendiğinde Fe-Al intermetalik fazlarının oluşumuna bağılı olarak demir içeriğinin giderek arttığı ve aluminyumun ise dış katmana göre azaldığı görülmektedir. En dış katmandaki ince ve uzun fazın Si bakımından zengin olduğu görülmektedir.

ASP 2012 kalite çeliğinin SDA sonrası oluşan kaplama tabakasının farklı bölgelerinin noktasal EDS analizi ise Şekil 6.18’de görülmektedir. Buna göre kaplama dış katmanında numaralı yüksek oranda Al içeriğı (at. % 98.85 ) belirtilmiştir. Difüzyon bölgesinin koyu renkli alanlarının aluminyumca zengin olduğu görülmüştür. Bu bölgedeki açık renkli alanların koyu renkli bölgelere kıyasla daha fazla demir içeriğine sahip olduğu tespit edilmiştir. İntermetalik bölgesi olarak adlandırılan bölgede ise at. % 19,59 Fe ve at. % 65,66 Al tespit edilmiştir. Bu bileşim kaplamaların bu bölgelerinde  $Fe_4Al_{13}$  fazının varlığına işaret etmektedir. İntermetalik bölgesinin üzerinde yer alan difüzyon tabakalarında koyu renkli bölgelerin aluminyumca zengin içeriğe sahip oldukları tespit edilmiştir. Daha açık renkte intermetalik bölgesinin ise  $Fe_4Al_{13}$  fazına yakın oranda demir ve aluminyum içerdiği görülmektedir.

ASP 2012 kalite takım çeliğinde koyu renkli ince ve uzun yapıdaki intermetalik bölgeler demirce zengin fazları açık renkteki homojen dağılmış halde bulunan bölgeler ise aluminyumca zengin faz bölgelerinden oluşmaktadırlar. Yüksek sıcaklıklara çıkıldığında kaplanmış haldeki takım çeliklerinin kaplama kesitindeki faz dağılımlarının farklılık gösterdiği incelenmiştir.

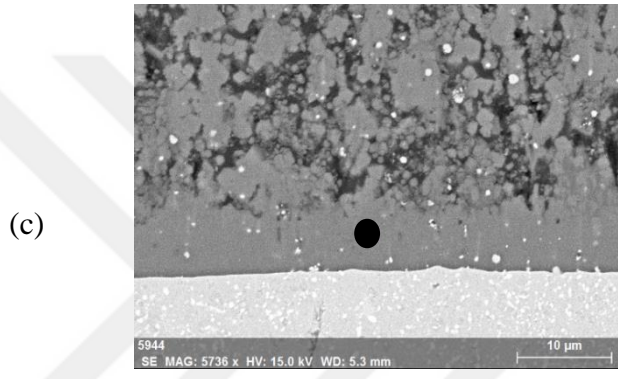


Şekil 6.17 : SDA uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin kesit mikroyapısının SEM fotoğrafı ve EDS elementel haritalama analizi fotoğrafları.

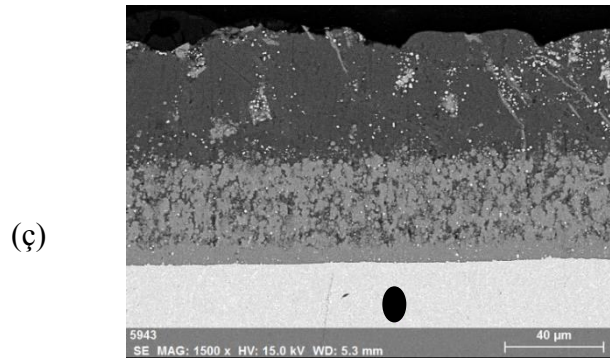


Elementler	Al	Si
% At.	98,85	1,15

Elementler	Al	Si	Fe	Cr
% At.	93,67	2,83	3,02	0,48



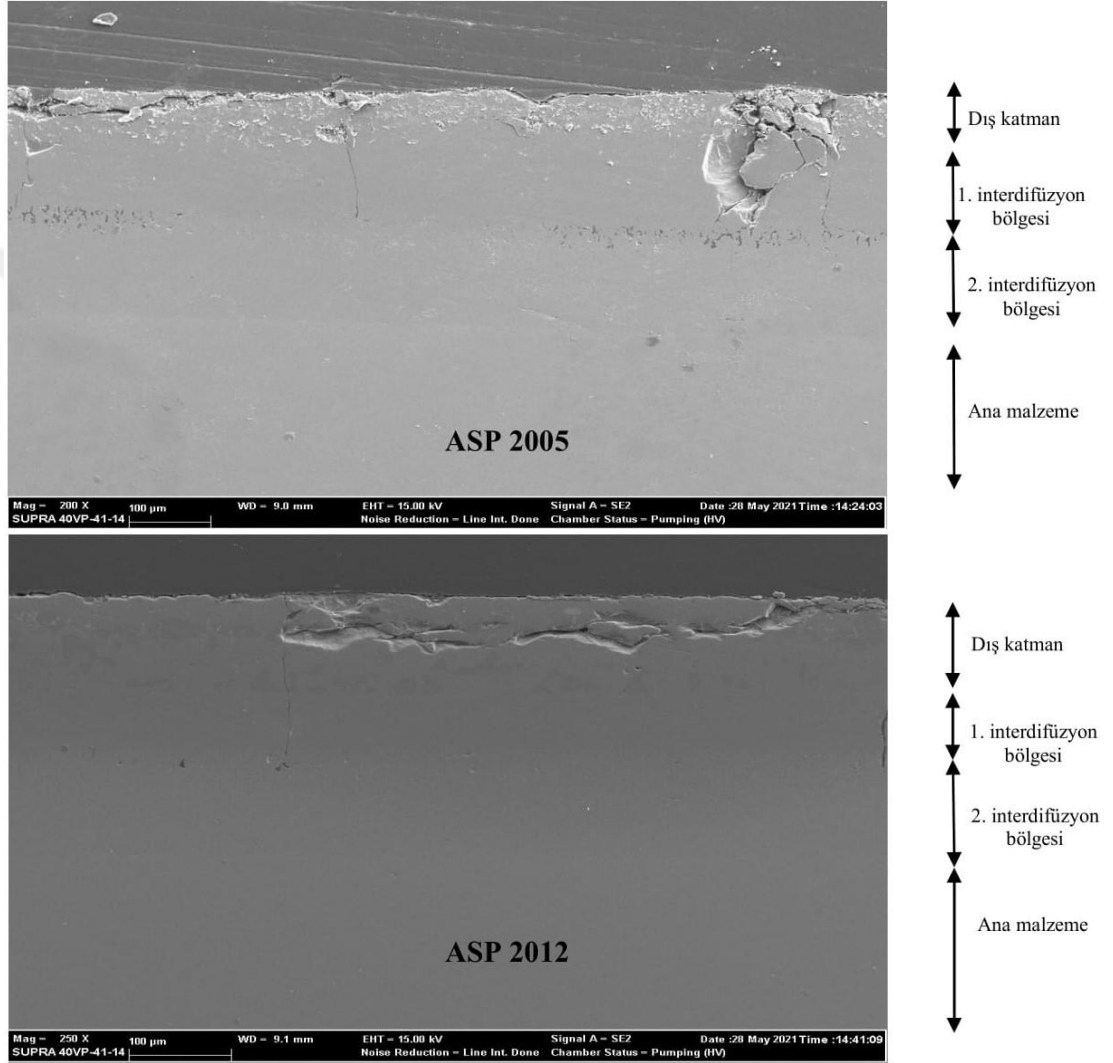
Elementler	Al	Si	Fe	Cr	Mo
% At.	65,66	13,27	19,59	0,97	0,52



Elementler	Si	Fe	Cr	V	Mo
% At.	3,04	90,92	4,15	0,94	0,95

**Şekil 6.18** : SDA uygulanmış ASP 2012 kalite takım çeliğinin kesitinden alınan noktasal EDS analizi konumlarını gösteren SEM fotoğrafları (a) Dış tabaka, (b) İnterdifüzyon tabakası, (c) İntermetalik ve (ç) Çelik.

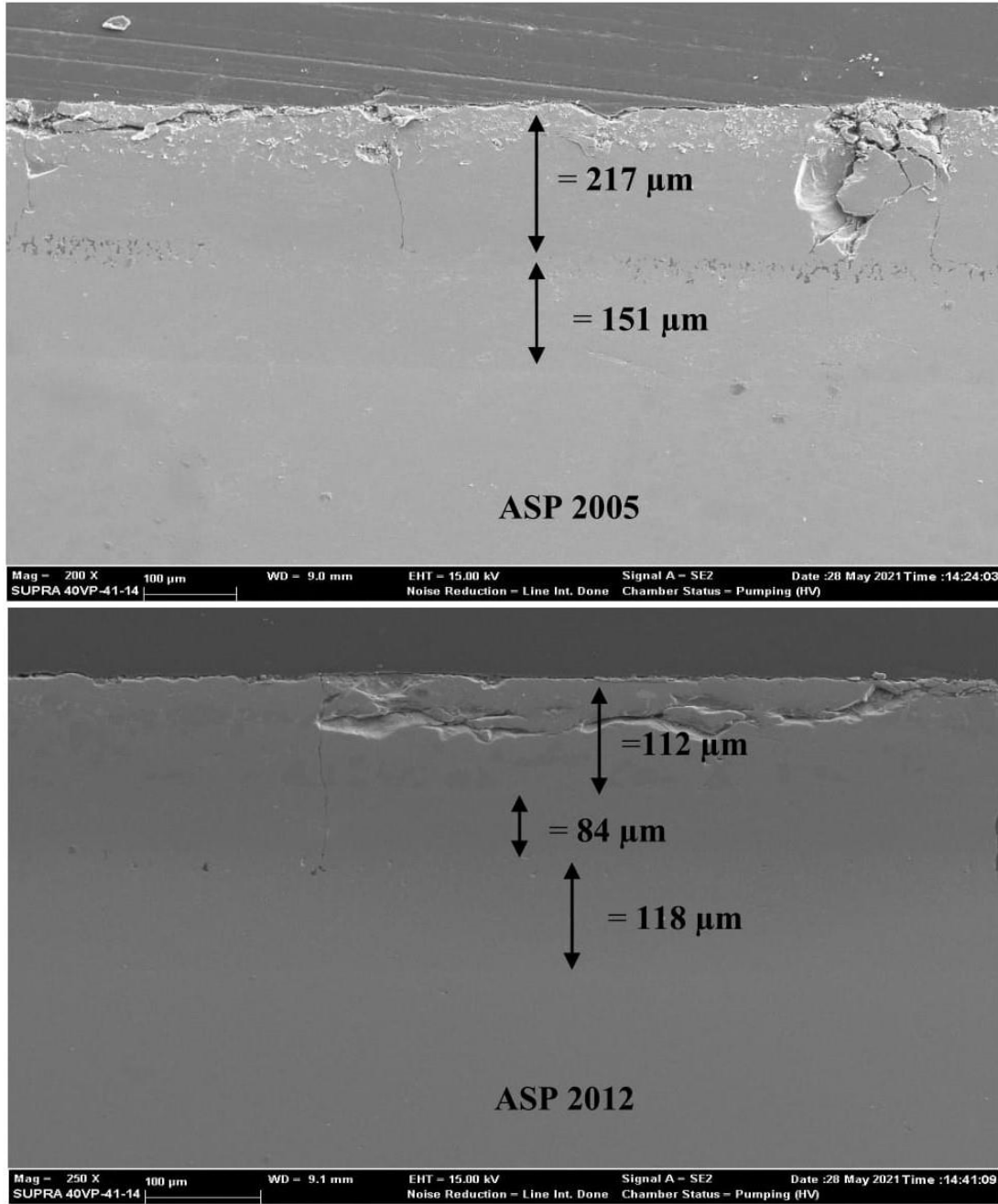
Şekil 6.19’da difüzyon tavlaması sonrasında ASP 2005 ve ASP 2012 kalite takım çeliklerinde oluşan kaplama tabakasının farklı bölgelerini gösteren SEM fotoğrafları görülmektedir. Buna göre tavlama işleminden önce kaplamanın dış katmanında yer alan iki farklı demir oranına sahip bölgelerin kaplamanın en dış katmanı olan 1. interdifüzyon bölgesinde yer aldığı gözlemlenmiştir. 2. interdifüzyon bölgesi en dış katmana göre daha açık renkte gösterilmektedir.



Şekil 6.19 : SDA + DT uygulanmış (a) ASP 2005 ve (b) ASP 2012 kalite çeliklerin kesitinin SEM fotoğrafları.

Her iki takım çeliği için kaplama tabakasının farklı tabakalarının kalınlıkları Şekil 6.20’de görülmektedir. Her bir takım çeliği için kaplamanın farklı bölgelerinden alınan kalınlık ölçümlerinin ortalaması SEM fotoğraflarında görülmektedir. Buna göre ASP 2005 kalite takım çeliğinde 2. interdifüzyon bölgesine kadar olan kısım yaklaşık 220 µm kalınlığında olup, bu bölgenin kalınlığı ASP 2012 kalite çelikte yaklaşık 200 µm’dir.

Yüksek sıcaklık değerlerinde alüminyumca zengin olan dış kaplama katmanı ve difüzyon bölgesindeki fazların interdifüzyonla demir açısından zengin fazlara dönüştüğü görülmektedir. Farklı sıcaklık değerlerinde difüzyon tavlama işlemine maruz kalan takım çeliklerinde kaplama morfolojisi kalınlık ve oluşan fazların dağılımı açısından birbirlerinden farklılık göstermektedir. ASP 2005 kalite için 1100°C, ASP 2012 kalite için 1070°C sıcaklıkta gerçekleştirilmiş olan difüzyon tavlama işlemi sonrası her bir kaplama katmanının kalınlığının arttığı belirlenmiştir.

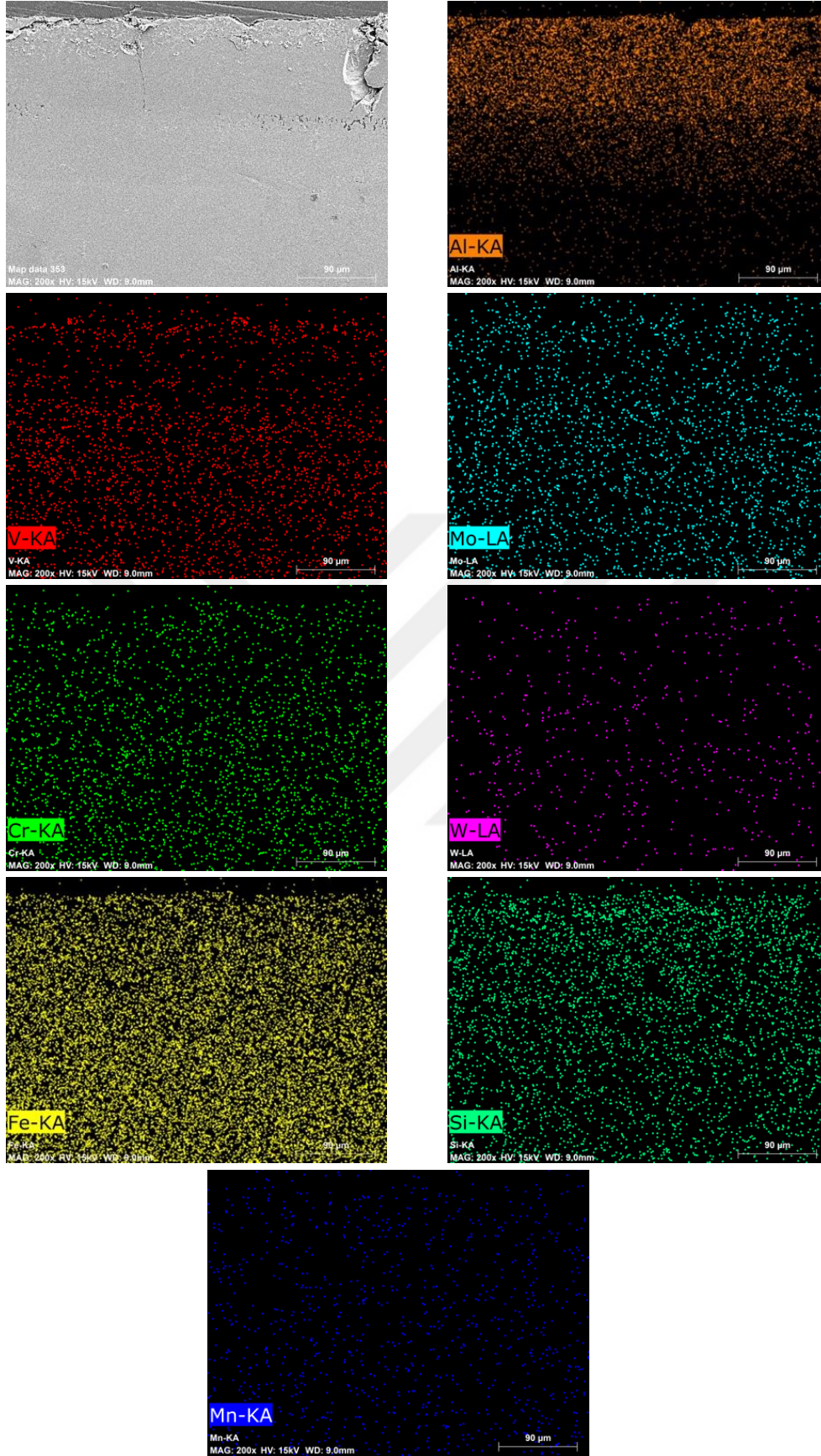


Şekil 6.20 : SDA + DT uygulanmış (a) ASP 2005 ve (b) ASP 2012 kalite çeliklerin katman kalınlıklarını gösteren SEM fotoğrafları.

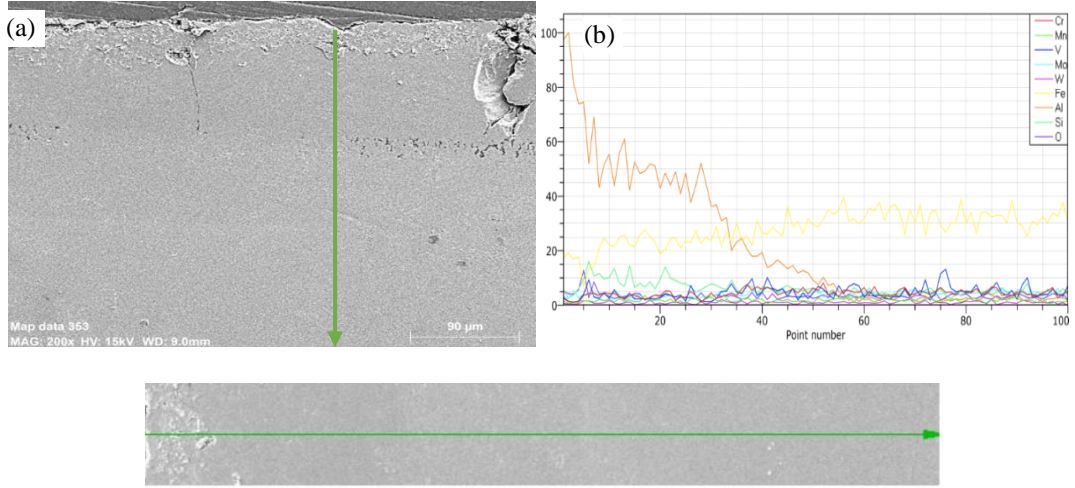
Difüzyon tavlamaşı uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğın EDS haritalama analizi fotoğrafları Şekil 6.21’de görölmektedir. Buna göre alaşıım elementlerinin yüksek sıcaklıkta çeliğın içerisinden kaplama tabakasına doğru farklı hızlarda difüze olduğu belirlenmiştir. Difüzyon süresinin sıcak daldırma işlemeine göre daha fazla olduğu tavlama işleminde alüminyumun kaplama tabakasından altlık malzemeye doğru difüze olarak kaplama tabakası boyunca geniş bir bölgede yer aldığı belirlenmiştir. Altlık ASP 2005 kalite takım çeliğının kimyasal bileşiminde bulunan Fe, V, Mo ve Cr elementlerinin kaplama tabakasına doğru difüze olduğu ve kaplama tabakasında homojen bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Ancak çeliğın kimyasal bileşiminde yer alan W elementinin diğer elementlere göre daha az miktarda difüze olduğu görölmektedir. Al ve Si oranı kaplamanın en dış tabakasında daha yükseldir. Ancak Si’nin altlık malzemeye doğru difüze olduğu ve kaplama tabakası boyunca daha homojen bir dağılım sergilediği belirlenmiştir.

ASP 2005 kalite takım çeliğının kaplama kesitinin en üst tabakasından altlık malzemeye doğru uygulanan çizgisel EDS analiz sonuçları Şekil 6.22’de görölmektedir. Kaplama tabakasından ana malzemeye doğru Al oranı azalmaktadır. Dış yüzeyden itibaren yaklaşık 165 µm derinlikten sonra Al oranı oldukça azalmaktadır. Bu durum, difüzyon tavlamaşı sonrasında, Al esaslı intermetaliklerin kaplamanın sadece en dış tabakasında bulunduğunu, altlık malzemeye doğru sırayla yer alan diğer tabakalarda ise bulunmadığını göstermektedir. Öte yandan altlık malzemenin ana elementi olan Fe, diğer alaşıım elementlerine (V, Mo, Cr, W) göre tüm kaplama boyunca en yüksek oranda (at. % 20-30) bulunan bir elementtir. Çeliğın kimyasal bileşimindeki diğer alaşıım elementlerinin de kaplama tabakasında yer aldığı, ancak oranlarının Al ve Fe’ye göre oldukça düşük olduğu (<at.% 5) görölmektedir.

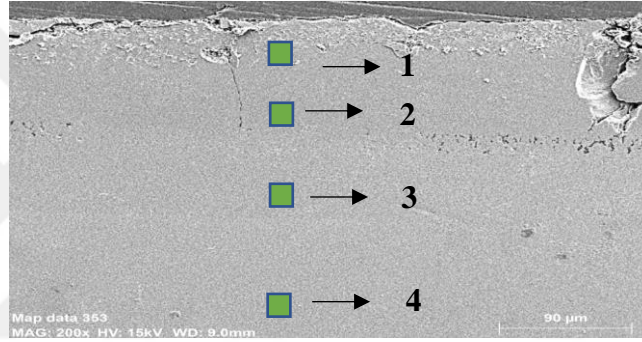
Difüzyon tavlamaşı sonrası kaplama tabakasında gerçekleştirilen noktasal EDS analiz sonuçları Şekil 6.23’de verilmiştir. Kaplamanın en dış katmanı olan 1 numaralı bölgede at. % 44,04 Fe ve at. % 41,98 Al bulunmakta olup, bu bölgede FeAl fazının oluştuğu tespit edilmiştir. 2 numaralı bölgenin kimyasal bileşimi at. % 45,66 Fe ve at. % 41,72 Al olarak belirlenmiş olup, bu bölgede de FeAl intermetalığının bulunduğu sonucuna varılmıştır. 3 numaralı bölgede 1 ve 2 numaralı bölgelere göre Fe oranı Al’ye göre daha yüksek olup, noktasal EDS analizine göre at. % 65,6 Fe ve at. % 14,98 Al belirlenmiştir. Bu kimyasal bileşim nedeniyle 3 numaralı bölgede Fe<sub>3</sub>Al fazının bulunduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 6.21 : SDA + DT uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin kesit mikroyapısının SEM fotoğrafı ve EDS elementel haritalama analizi fotoğrafları.



**Şekil 6.22 :** SDA + DT uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin kesitinden alınan çizgisel EDS analizi konumunu gösteren (a) SEM fotoğrafı ve (b) çizgisel EDS analizi.



Bölge	EDS analizi, at.%								
	V	Cr	Fe	Mo	Al	Si	O	W	Mn
1	0,24	1,69	44,04	0,49	41,98	4,39	5,71	1,03	0,49
2	0,38	1,44	45,66	0,47	41,72	4,94	3,90	1,17	0,32
3	2,77	3,67	65,54	1,33	14,98	1,84	7,60	1,68	0,57
4	0,85	3,57	84,43	1,0	0,22	0,67	7,25	1,54	0,48

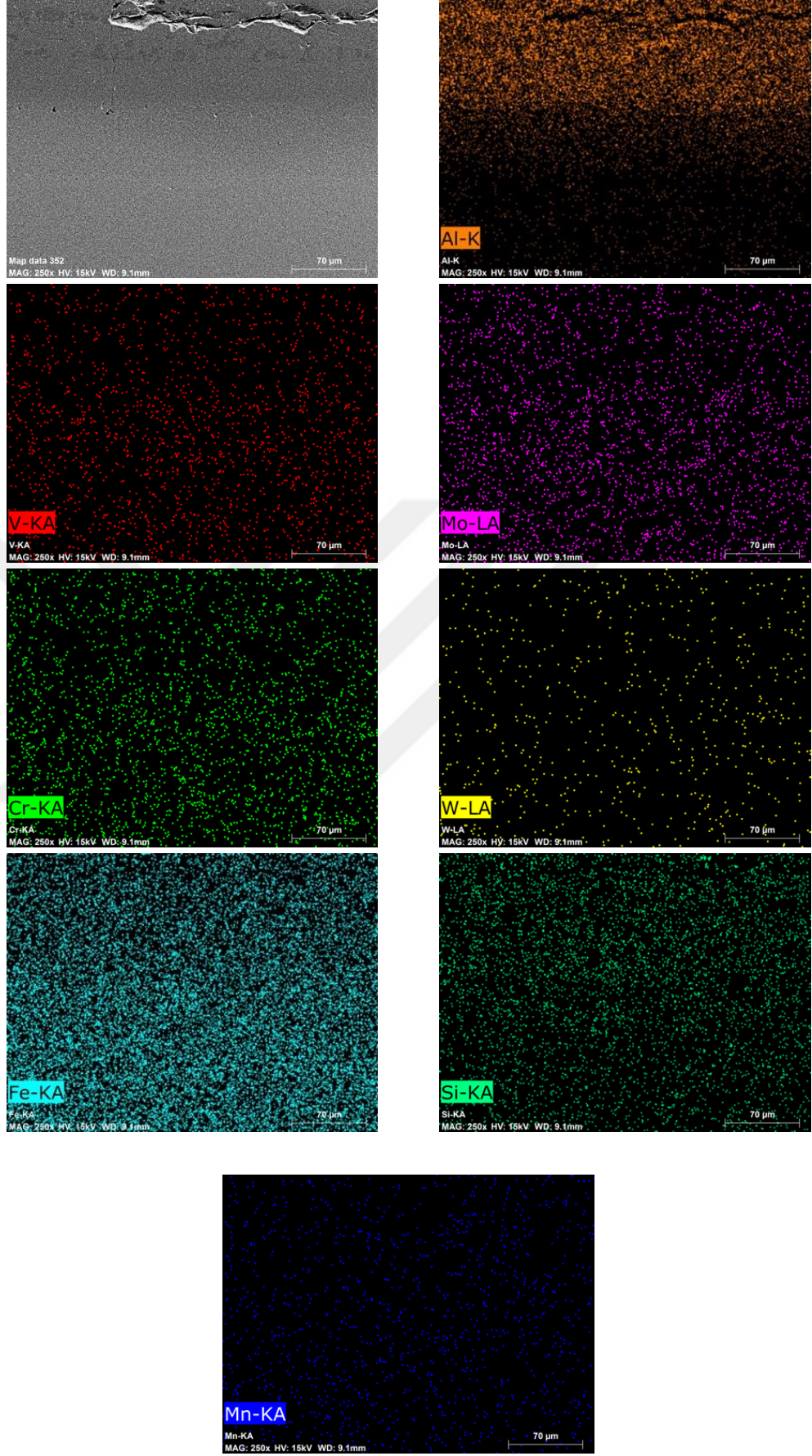
**Şekil 6.23 :** SDA + DT uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin kesitinden alınan noktasal EDS analizi konumunu gösteren SEM fotoğrafı ve noktasal EDS analizi.

Difüzyon tavlama yapılan alüminyum kaplanmış ASP 2012 kalite çeliğin elementel haritalama yöntemiyle EDS analizi Şekil 6.24’de verilmiştir. Buna göre altlık malzeme olarak kullanılan ASP 2012 kalite çeliğin kimyasal bileşiminde bulunan alaşım elementlerinin kaplama tabakasına doğru difüze olduğu ve tabaka içinde homojen olarak bulunduğu görülmektedir. Bunlar içinde V, Cr, Mo elementlerinin sinyalleri daha şiddetli, ancak W sinyallerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Al ve Si sinyalleri ise kaplamanın en dış tabakasında daha yüksek olup, altlık malzemeye doğru ise azalmaktadır. Altlık malzemenin ana elementi olan Fe’nin ise altlık malzemeye yakın bölgede daha şiddetli sinyaller verdiği, ancak sinyallerin kaplamanın en dış

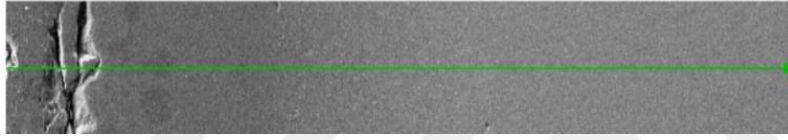
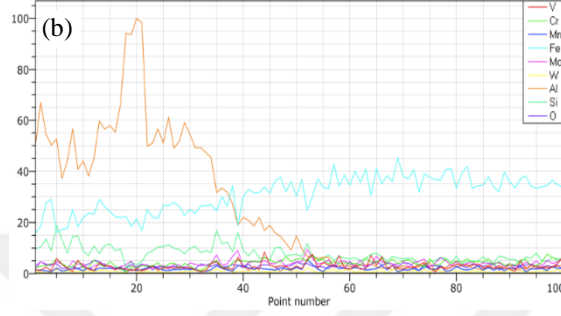
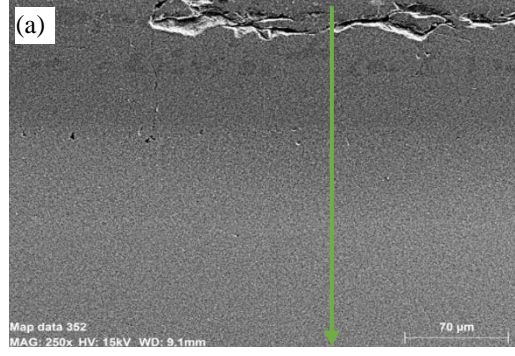
tabakasına doğru azaldığı görülmektedir. Bu tespitlere göre, ASP 2005 ve ASP 2012 kalite çeliklerin kaplama tabakasında elementlerin dağılımı önemli ölçüde benzerlik gösterdiği belirlenmiştir.

Şekil 6.25’de kaplama tabakasından ana malzemeye doğru gerçekleştirilen çizgisel EDS analizi yer almaktadır. ASP 2012 kalite takım çeliğine kaplamanın dış bölgesinden ana malzeme doğrultusunda yapılan çizgisel EDS analizinde kaplamanın en dış tabakasında yüksek oranda bulunan Al’nin oranının yüzeyden yaklaşık 165 µm mesafeden sonra, altlık çeliğe doğru önemli ölçüde azaldığı (<at.% 5), dolayısıyla ASP 2005 kalite çeliğe benzer şekilde Al bakımından zengin fazların kaplamanın yüzeyine yakın bölgelerde bulunduğu görülmektedir. Öte yandan Si elementi de kaplamanın en dış tabakasında en yüksek oranda bulunmaktadır (~at. %10) ve oranı ana metale doğru azalmaktadır. Fe, ana element olarak tüm kesit boyunca yüksek oranda bulunmaktadır. Kaplamanın en dış tabakasındaki Fe oranı at.% 20 düzeyindedir ve altlık metale yakın kaplama bölgelerinde ise Fe oranı at. % 35 düzeyinde belirlenmiştir.

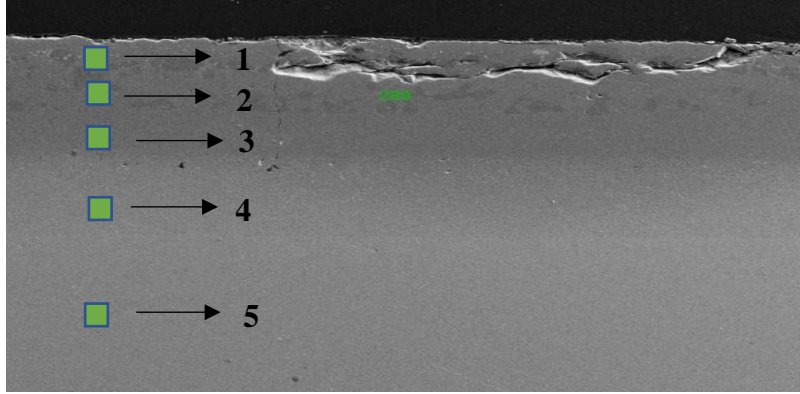
Difüzyon tavlama uygulanmış ASP 2012 kalite takım çeliğinin kaplama tabakasının farklı bölgelerinden alınan noktasal EDS analizi sonuçları Şekil 6.26’da yer almaktadır. Kaplama tabakasının dış yüzeyine yakın 1 ve 2 numaralı bölgelerde, Al ve Fe oranının yüksek olduğu, altlık metale doğru Al oranının azalırken, Fe oranının arttığı görülmektedir. Altlık malzeme olan ASP 2012 kalite çeliğin kimyasal bileşimindeki elementlerden Cr, diğer alaşım elementlerine göre oranı kaplama boyunca en yüksek oranda değişen elementtir. Cr oranı, altlık malzemeye yakın bölgelerde at. % 3,72 olarak belirlenmiş iken, en dış yüzeyde at. % 0,65 değerine kadar azalmıştır. Cr dışında W elementi de altlık malzemeden en dış yüzeye doğru at. % 1,43 değerinden at. % 0,86 değerine azalmıştır. V ve Mo ise kaplama tabakası boyunca at. % 1’den daha az oranda bulunmaktadır. 1 numaralı bölgenin kimyasal bileşimi at. % 27,65 Fe ve at. % 64,99 Al olarak belirlenmiştir. Bu kimyasal bileşim kaplamanın üst bölgesinde FeAl<sub>2</sub> fazının varlığına işaret etmektedir. 2 numaralı bölgede at. % 42,40 Fe ve at.% 43,77 Al kimyasal bileşimi ise FeAl fazını olarak değerlendirilmiştir. 3 numaralı bölgenin kimyasal analizi 2 numara ile benzer olup, bu bölgede de FeAl fazının oluştuğu belirlenmiştir. Altlık malzeme ASP 2012 kalite takım çeliğinin hemen üzerindeki 4 numaralı bölgede ise at. % 68,95 Fe ve at. % 15,62 Al bulunmaktadır ve Fe bakımından zengin Fe<sub>3</sub>Al fazının varlığı ile ilişkilendirilmiştir. Noktasal EDS analizi sonuçlarına göre tespit edilen fazlar, XRD analizinde belirlenen fazlarla uyumludur.



Şekil 6.24 : SDA + DT uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin kesit mikroyapısının SEM fotoğrafı ve EDS elementel haritalama analizi fotoğrafları.



**Şekil 6.25** : SDA + DT uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin kesitinden alınan çizgisel EDS analizi konumunu gösteren (a) SEM fotoğrafı ve (b) çizgisel EDS analizi.

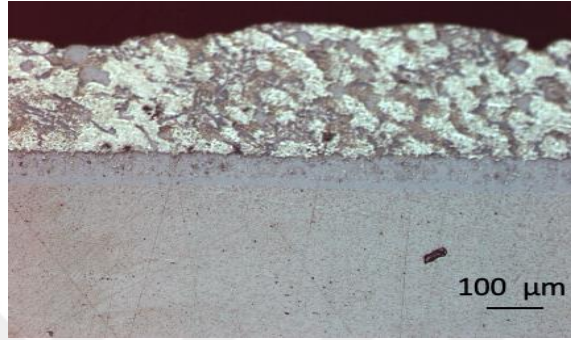


Bölge	EDS analizi, at. %							
	V	Cr	Fe	Mo	Al	Si	O	W
1	0,03	0,65	27,65	0,77	64,99	1,13	3,92	0,86
2	0,21	1,92	42,40	0,54	43,44	6,29	3,76	1,11
3	0,08	1,79	42,14	0,55	42,98	6,41	4,90	1,15
4	0,61	3,84	68,95	0,87	15,62	4,02	4,71	1,39
5	0,57	3,72	85,13	1,07	0,57	2,40	1,42	1,43

**Şekil 6.26** : SDA + DT uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin kesitinden alınan noktasal EDS analizi konumunu gösteren SEM fotoğrafı ve noktasal EDS analizi.

## 6.2 Sertlik Deneyi Sonuçları

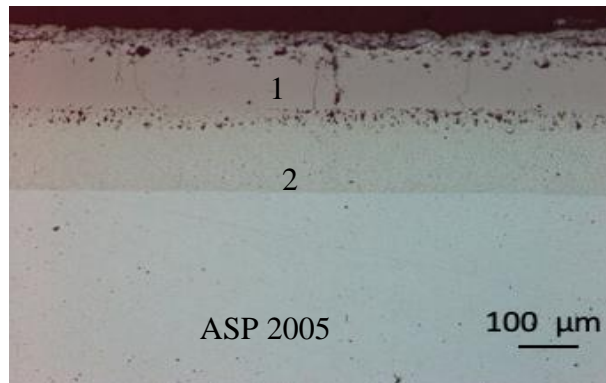
Sertlik ölçümleri, alüminyum kaplanmış ASP 2005 ve ASP 2012 kalite takım çelikleri ile bu çeliklerin kaplama işlemi yapıldıktan sonra difüzyon tavlama gerçekleştirilmiş numunelerinin kesitlerinden alınmıştır. Şekil 6.27’de ASP 2005 kalite takım çeliğinin optik mikroskop altında alınmış kesit görüntüsü ve bu kesitlerin farklı bölgelerinde gerçekleştirilmiş sertlik deneyi sonuçları görülmektedir.



Bölge	Sertlik ( HV <sub>0.1</sub> )
Alüminyumca zengin dış katman	99 ± 8
İntermetalik	448 ± 24
Ana malzeme	260 ± 13

**Şekil 6.27 :** SDA uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin kesitindeki sertlik ölçüm konumlarını gösteren optik mikroskop fotoğrafı ve sertlik değerleri.

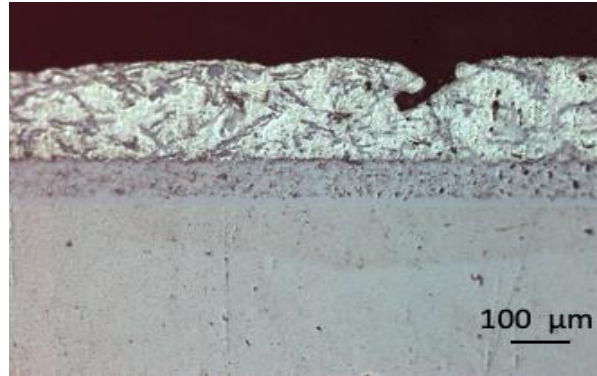
Şekil 6.28’de kaplama işlemi uygulandıktan sonra difüzyon tavlama uygulanmış ASP 2005 kalite takım çeliği optik mikroskop görüntüsü ve sertliklerin alındığı kaplama bölgeleri gösterilmiştir.



Bölge	Sertlik ( HV <sub>0.1</sub> )
1	937 ± 20
2	475 ± 35
ASP 2005	1014 ± 57

**Şekil 6.28 :** SDA + DT uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin kesitindeki sertlik ölçüm konumları ve ölçülen sertlik değerleri.

Şekil 6.29’da ASP 2012 kalite takım çeliğinin alüminyum kaplanmış halinin optik mikroskop altında alınmış kesit görüntüsü ve sertlik değerleri gösterilmiştir.



Bölge	Sertlik ( HV <sub>0.1</sub> )
Alüminyumca zengin dış bölge	95 ± 8
İntermetalik	400 ± 69
ASP 2012	215 ± 5

**Şekil 6.29 :** SDA uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin kesitindeki sertlik ölçüm konumlarını gösteren optik mikroskop fotoğrafı ve sertlik değerleri.

Şekil 6.30’da sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplandıktan sonra difüzyon tavlaması işlemi gerçekleştirilmiş ASP 2012 kalite takım çeliğinin optik mikroskop altındaki kesit görüntüleri ve sertlik ölçümleri yer almaktadır.



Bölge	Sertlik ( HV <sub>0.1</sub> )
1	897 ± 113
2	469 ± 45
ASP 2012	980 ± 50

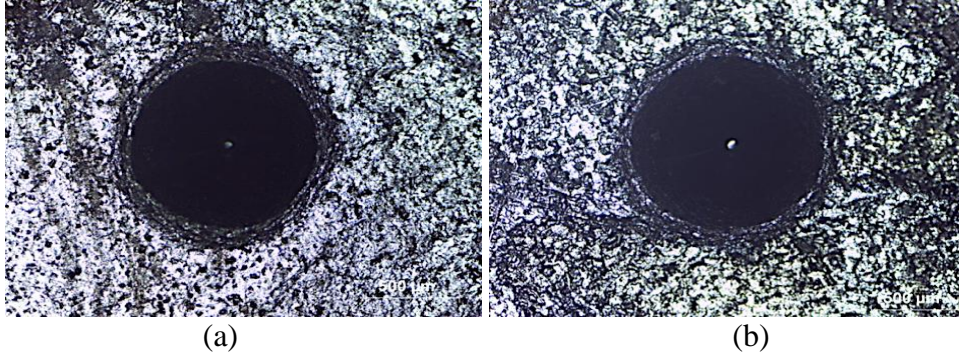
**Şekil 6.30 :** SDA + DT uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin kesitindeki sertlik ölçüm konumlarını gösteren optik mikroskop fotoğrafı ve sertlik değerleri.

İntermetalik kaplama tabakalarının kesitlerinde gerçekleştirilen sertlik deneyi ölçümleri Yürektürk ve Baydoğan'ın [41] intermetalik tabakalar üzerinden gerçekleştirdiği sertlik değerleri ile benzerlik göstermiştir. Buna göre  $FeAl_2$  ve  $FeAl$  intermetalikleri sırasıyla ASP 2005 için  $937 \pm 20 HV_{0.1}$  ve  $475 \pm 35 HV_{0.1}$ , ASP 2012 için  $897 \pm 113 HV_{0.1}$  ve  $469 HV_{0.1}$  sertlik değerlerindedir. Alüminyum açısından zengin fazların demir bakımından zengin fazlardan daha yüksek sertlik gösterdiği gözlemlenmiştir.

### 6.3 Yapışma Deney Sonuçları

Yapışma deneyleri, standart Rockwell C ucu (elmas koni) ve 150 kg yük kullanılarak numune yüzeylerinde bir sertlik izi oluşturarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonunda, yüzey optik mikroskop altında görüntülenerek iz etrafında herhangi bir süreksizlik oluşup oluşmadığı belirlenmiş, standart tablolar referans alınarak kaplamanın yapışma dayanımı derecelendirilmiştir.

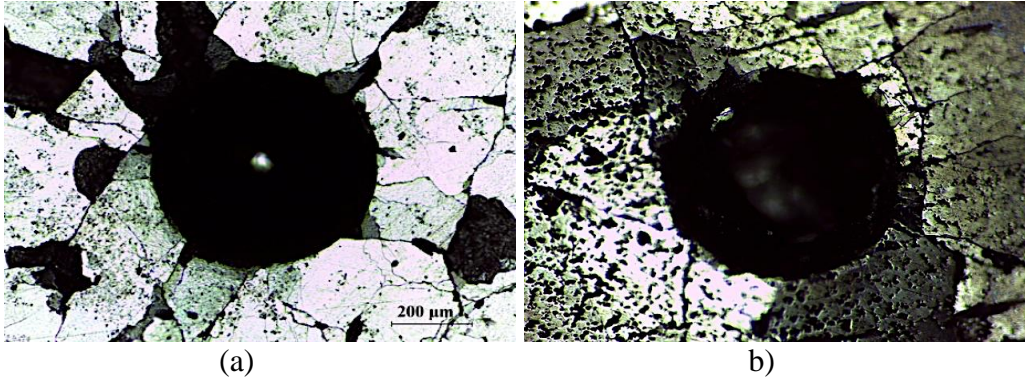
Kaplama yapılan malzemelerin uygulama alanlarında kullanılabilirliği ve aşınma koşullarında yüke maruz kalabilmesi için kaplama tabakası ile altlık malzeme arasındaki yapışmanın iyi olması istenmektedir. Rockwell C yapışma deneyi farklı tekniklerle kaplanmış malzemelerin yapışma dayanımını kalitatif olarak tespit etmek için kullanılan bir yöntemdir. Buna göre malzeme yüzeyindeki izin etrafında oluşan süreksizlikler HF 1 – HF 6 arasında bir değerlendirme skalası ile 6 farklı sınıfta karakterize edilmektedir. HF 1 sınıfında yer alan izlerde yüzeyde oluşan girintilerin kenarlarında ince çatlak oluşumu görülür ve tabakalar arasında ayrılma söz konusu olmamalıdır. HF 2 birbirleriyle bağlantısı olmayan küçük boyuttaki mikroçatlaklar ile tanımlanır. HF 3 sınıfında yüzeyde oluşan mikro çatlakların boyutu daha geniş ve bu çatlakların birbirleriyle bağlantıları olması beklenir ancak iz girintisinin bazı alanlarında ayrışma gözlemlenmemelidir. HF 4 sınıfı HF 3'e göre yüzeyde oluşan batıcı uç izinin her tarafında tabakalar arası ayrışma gözlemlenebilmesiyle ayırt edilmektedir. HF 5 ve HF 6 yapışma sınıfları yeterli yapışma özelliği gösterilmediğini işaret etmektedir. Buna göre batıcı uç izi etrafındaki alanda büyük ölçüde yüzeyden ayrılmış tabakalar yetersiz yapışma özelliği sergilemektedir [42]. Şekil 6.31'de SDA işlemi uygulanmış ASP 2005 ve ASP 2012 kalite takım çeliklerinin yapışma deneyi sonrası optik mikroskop fotoğrafları görülmektedir.



**Şekil 6.31** : SDA uygulanmış (a) ASP 2005 ve (b) ASP 2012 kalite çeliğin yüzeyinin Rockwell C yapışma deneyi sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

Sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplanmış takım çeliklerinin yüzeylerinde oluşan batıcı uç izlerinin çevresel olarak geniş bir alanı kapsamayacak şekilde çatlaklar içermesi ve altlık malzeme ile kaplama arasında ayrışma gözlemlenmemesi nedeniyle bu izler HF 2 sınıfı olarak tanımlanmıştır (Çizelge 6.3).

Difüzyon tavlaması uygulanmış numunelerde kaplama tabakasının belirli bölgelerde iyi yapışma özelliği göstermediği ve batıcı uç izi etrafında malzeme yüzeyinden ayrıştığı gözlemlenmiştir (Şekil 6.32). Bu nedenle difüzyon tavlaması uygulanmış örnekler HF 3 sınıfı olarak tanımlanmıştır (Çizelge 6.3). Her iki numune de HF 3 olarak tanımlanmakla birlikte, difüzyon tavlaması uygulanmış ASP 2005 kalite çelik yüzeyinin daha gevrek karakterde olduğu görülmektedir.



**Şekil 6.32** : SDA + DT uygulanmış (a) ASP 2005 ve (b) ASP 2012 kalite çeliğin yüzeyinin Rockwell C yapışma deneyi sonrası optik mikroskop fotoğrafı.

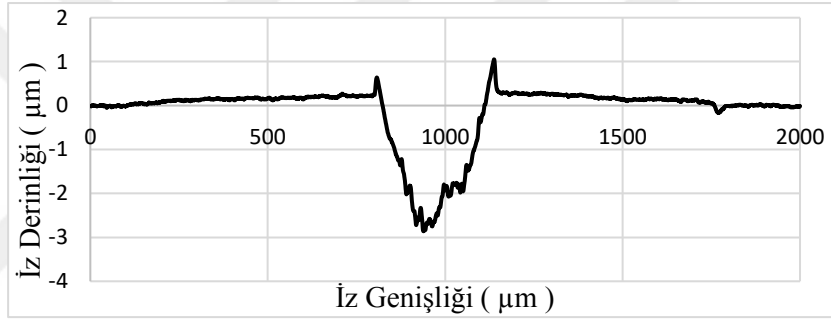
**Çizelge 6.3** : Yapışma deneyi sonuçlarının HF skalasına göre gösterimi.

<b>Deney numuneleri</b>	SDA ' lı ASP 2005	SDA ' lı ASP 2012	Difüzyon tavlaması ASP 2005	Difüzyon tavlaması ASP 2012
<b>HF skalası</b>	HF - 2	HF - 2	HF - 3	HF - 3

#### 6.4 Aşınma Deneyi Sonuçları

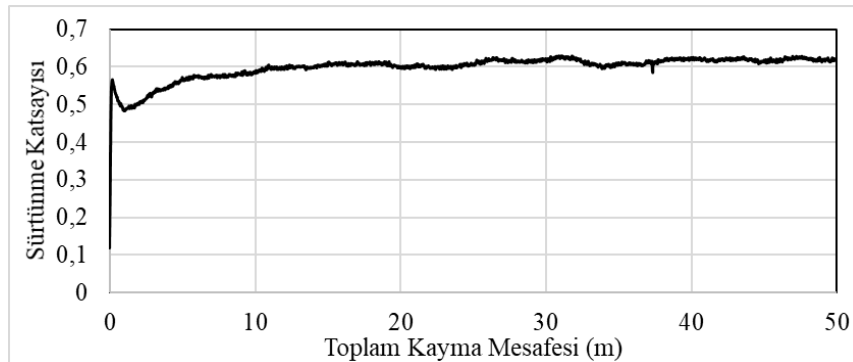
Aşınma deneyleri, ASP 2005 ve ASP 2012 kalite takım çeliklerinin sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplanmış, kaplama işlemi uygulanmamış, alüminyum kaplama işlemi sonrasında difüzyon tavlaması gerçekleştirilmiş ve bu takım çeliklerinin su verilmiş numunelerine uygulanmıştır. Difüzyon tavlaması uygulanmış numunelerde aşınma deneyinden önce yüzey yaklaşık 200 µm zımparalanarak yüzeydeki boşluk şeklinde süreksizlik içeren bölgeler kaldırılmıştır.

Şekil 6.33'de alüminyum kaplama işleminde altlık malzeme olarak kullanılan ASP 2005 kalite takım çeliğinin aşınma izinin profili yer almaktadır. Takım çeliğinin yüzeyindeki aşınma izinin farklı bölgelerinden yapılan profilometre ölçümlerinde iz genişliği ortalama 285 µm, iz derinliği ise ortalama 2,75 µm olarak belirlenmiştir.



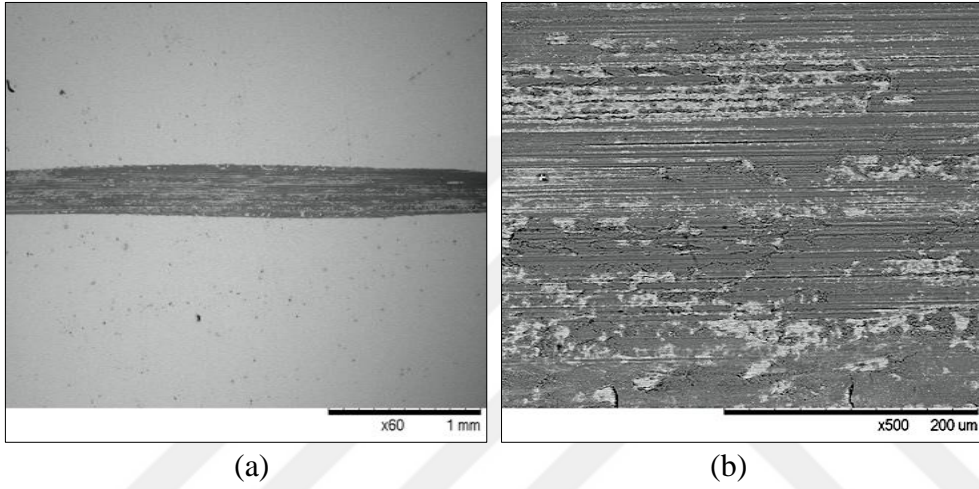
Şekil 6.33 : ASP 2005 kalite çeliğin aşınma izi profili.

ASP 2005 kalite takım çeliğinin kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı değişimi Şekil 6.34'de görülmektedir. Sürtünme katsayısı, deneyin başlangıcında 0,55 değerine ani olarak artmış, yaklaşık 0,5 değerine azaldıktan sonra tekrar artmıştır. Aşınma deneyinde 10 m sonunda sürtünme katsayısı kararlı hal değerine (0,6) ulaşmış ve deneyin sonuna kadar bu değer önemli bir değişim göstermemiştir.



Şekil 6.34 : ASP 2005 kalite çeliğin sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı olarak değişimi.

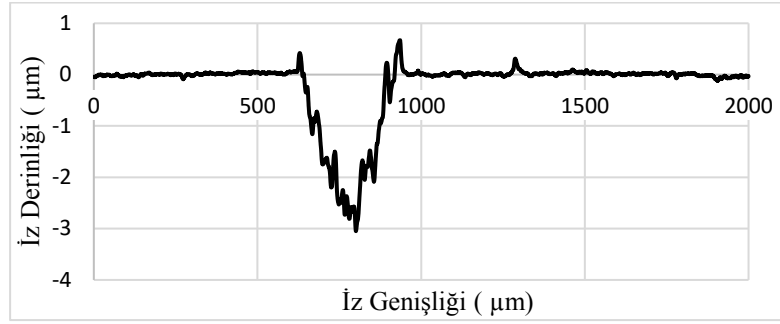
ASP 2005 kalite takım çeliğinin yüzeyindeki aşınma izlerinin SEM fotoğrafları Şekil 6.35’de görülmektedir. Aşınma yüzeyinde kayma yönüne paralel belirgin ve derin çizikler ile birlikte açık renkli bölgeler bulunmaktadır. Derin çizikler abrasiv aşınma mekanizmasının etkili olduğunu göstermekte olup, SEM fotoğrafları geri saçılan elektron modunda çekildiği için, açık renkli bölgeler sürtünme sırasında meydana gelen sıcaklık artışından dolayı oluşan oksitler olarak değerlendirilmiştir. Buna göre ASP 2005 kalite çeliğin aşınmasında, abrasiv ve oksidasyon aşınmasının baskın aşınma mekanizmaları olduğu sonucuna varılmıştır.



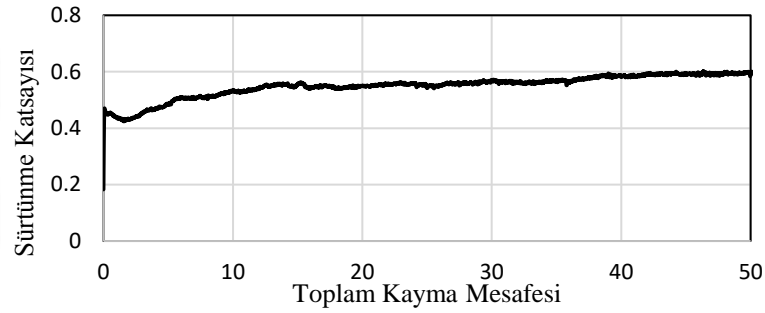
**Şekil 6.35 :** ASP 2005 kalite çeliğin aşınma izinin SEM fotoğrafları (a) 50x, (b) 500x .

ASP 2012 kalite takım çeliğinin aşınma iz profil ölçüm grafiği Şekil 6.36’da verilmiş olup, aşınma iz genişliği ortalama 278  $\mu\text{m}$ , iz derinliği ise ortalama 2,75  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Şekil 6.37’de verilen sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı değişim grafiğinde, sürtünme katsayısının deneyin başlangıcında yaklaşık 0,48 değerine ani olarak arttığı, sonrasında 0,42 değerine azalarak en düşük değerine ulaştığı görülmektedir. Kayma mesafesinin ilk 2 m’si içinde gerçekleşen bu değişimin ardından sürtünme katsayısı tekrar artmakta ve deneyin sonuna kadar artarak deney sonunda 0,6 sabit değerine ulaşmaktadır. Sürtünme katsayısının değişimi 15 m kayma mesafesinden itibaren oldukça yavaş gerçekleşmektedir. ASP 2005 kalite çelikle karşılaştırıldığında her iki çeliğin de benzer bir sürtünme davranışı gösterdiği, ancak ASP 2012 kalite çeliğin sürtünme katsayısının daha uzun kayma mesafeleri sonunda kararlı hale ulaştığı ve aşınma deneyinin büyük bölümünde (son 5 m’ye kadar) ASP 2005 kalite çeliğe göre daha düşük sürtünme katsayısı sergilediği görülmektedir. Bu

durumun ASP 2012 kalite çeliğin mikroyapısındaki karbürlerin daha küçük boyutlu olmasıyla ilişkilendirilebileceği değerlendirilmiştir.

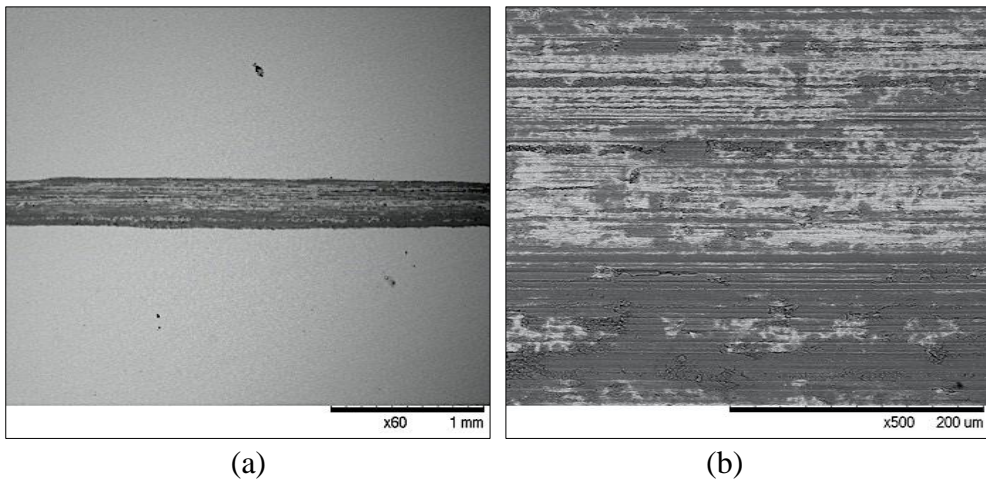


Şekil 6.36 : ASP 2012 kalite çeliğin aşınma izi profili.



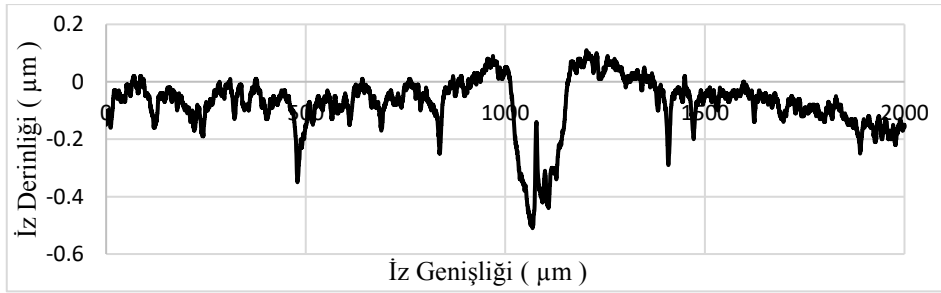
Şekil 6.37 : ASP 2012 kalite takım çeliği mesafeye bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

ASP 2012 kalite çeliğinin aşınma izinin SEM fotoğrafları Şekil 6.38'de görülmektedir. Genel olarak aşınma izlerinin karakteristikleri ASP 2005 kalite çelik ile benzerdir. Aşınma yüzeyinde derin ve belirgin aşınma çizikleri ile oksit olduğu değerlendirilen açık renkli bölgeler bulunmaktadır. Ancak, oksit bölgeleri ASP 2005 kalite çeliğe göre aşınma izinin daha geniş bir bölgesini kapsamaktadır.

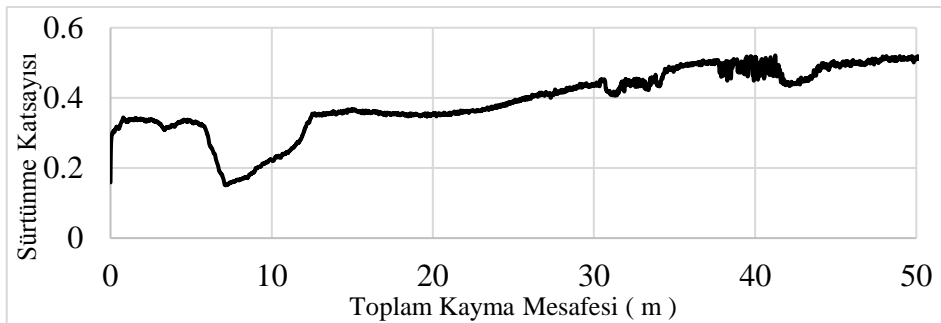


Şekil 6.38 : ASP 2012 kalite çeliğin aşınma izinin SEM fotoğrafları (a) 50x, (b) 500x .

Su verilmiş ASP 2005 kalite takım çeliğinin aşınma iz profili Şekil 6.39'da verilmiştir. Takım çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin farklı bölgelerinde gerçekleştirilen profil ölçümleri sonucu iz genişliği 165 µm, iz derinliği ise ortalama 0,40 µm olarak belirlenmiştir. Su verme işlemi sonrasında ASP 2005 kalite çeliğin aşınma izinin genişlik ve derinliği önemli ölçüde azalmış olup, aşınma direnci artmıştır. Bu durum çeliğin su verme sonrası ulaştığı yüksek sertlik ( $1014 \pm 57 \text{ HV}_{0,1}$ ) ile uyumludur. Öte yandan su verme işlemi, çeliğin sürtünme katsayısını da düşürmüştür (Şekil 6.40). Aşınma deneyinin başlangıcında ani olarak artan sürtünme katsayısı (0,35), çeliğin su verme öncesindeki halinde gözlenen başlangıç sürtünme katsayısından yaklaşık % 50 daha düşüktür. Sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı olarak değişimi, su verme öncesi duruma benzer olup, deneyin ilk 10 metresi içinde sürtünme katsayısı 0,15 değerine azalmış, daha sonra deneyin sonuna kadar sürekli bir artış göstermiştir. Sürtünme katsayısının genel düzgün bir şekilde değişmektedir, ancak deneyin 30 - 40. metreleri arasında kısmi bir dalgalanma görülmektedir. Bu durumun aşınma izi üzerinde biriken aşınma ürünlerinden kaynaklanmış olabileceği değerlendirilmiştir. Ancak daha sonra deneyin sonuna kadar sürtünme katsayısında herhangi bir saçılma gözlenmemiştir. Aşınma deneyinin sonunda sürtünme katsayısı 0,5 olarak gerçekleşmiş, ancak su verme öncesi durumda gözlenen kararlı hale su verme sonrası ulaşılmamıştır.

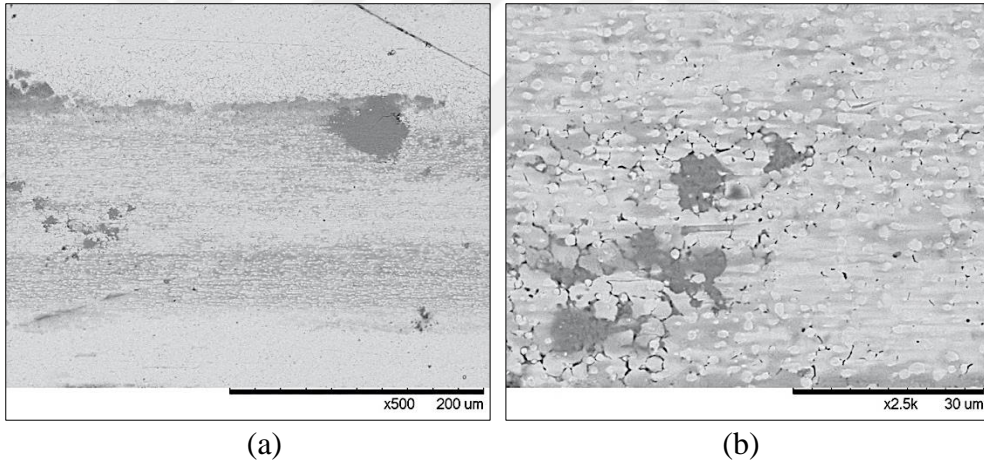


Şekil 6.39 : SV uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin aşınma izi profili.



Şekil 6.40 : SV uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı olarak değişimi.

ASP 2005 kalite çeliğin aşınma izinin SEM fotoğrafları Şekil 6.41’de görülmektedir. Su verilmiş numunenin aşınma tamamen açık renkli görünmektedir. Bu durum yüzeyin tamamen oksitlendiği ve bir oksit tabakasının oluştuğu şeklinde değerlendirilmiştir. Aşınma izi üzerinde homojen dağılmış ve küresel morfolojide karbürler gözlenmektedir, ancak su verme öncesi gözlenen belirgin ve derin aşınma çizikleri su verilmiş numunede yoktur. Tane sınırına benzeyen bölgelerde çatlaklar oluşarak oksit tabakasının kırıldığı ve yer yer yüzeyden ayrıldığı, bu bölgelerin SEM fotoğrafında koyu renkli görüldüğü belirlenmiştir. Oksit tabakasının aşınma ürünleri olarak kısmen yüzeyden uzaklaşması, Şekil 6.40’da görülen sürtünme katsayısının dalgalanması ile ilişkilendirilebilir. Sonuç olarak, su verilmiş ASP 2005 kalite çeliğin aşınma mekanizması oksidasyon aşınması olarak değerlendirilmiş, ancak oksit tabakası Fe esaslı bir malzeme yüzeyinde oluştuğu ve koruyucu yapıda olmadığı için, su verme öncesi ASP 2005 kalite çeliğe göre sürtünme katsayısında ancak kısmi bir azalma meydana getirdiği sonucuna varılmıştır.

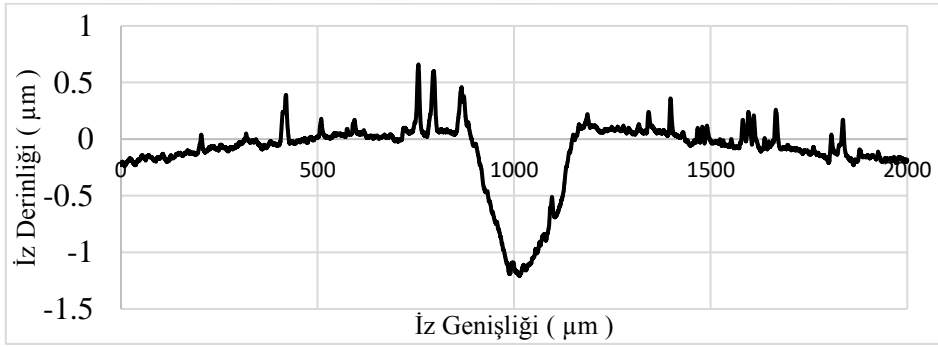


**Şekil 6.41** : SV uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin aşınma izinin SEM fotoğrafları (a) 500x, (b) 2500x .

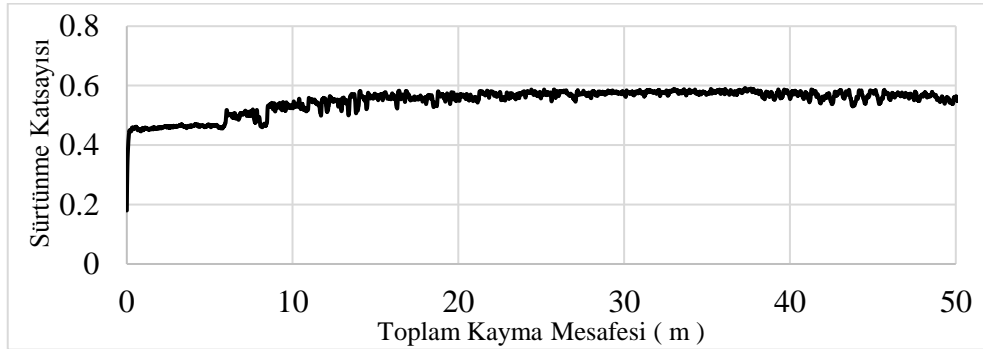
Şekil 6.42’de su verilmiş ASP 2012 kalite çeliğin aşınma izinin profili görülmektedir. Aşınma izinin genişliği ortalama 250 µm, derinliği ise 1,1 µm olarak belirlenmiştir. Buna göre, ASP 2012 kalite çeliğin aşınma izi genişliği su verme öncesine göre sadece bir miktar azalırken (278 µm’den 250 µm’ye), iz derinliği yaklaşık % 60 azalmıştır. Şekil 6.43’de verilen kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısının değişimi incelendiğinde, su verme öncesi ve sonrasında ASP 2012 kalite çeliğin sürtünme katsayısı değişimi ile deneyin başlangıcında ve sonunda aldığı değerler büyük ölçüde benzerdir. Bu çeliğin her iki durumu arasındaki belirgin fark ise, su verme sonrası

sürtünme katsayısında gözlenen küçük miktardaki dalgalanmadır. Öyle ki, sürtünme deneyin 6. metresinden itibaren sürtünme katsayısı eğrisi pürüzsüz olmayıp, küçük bir aralıkta değişkenlik göstermektedir. Bu durum, su verilmiş ASP 2005 kalite çelikte kısmi olarak gözlenen açılma davranışına benzerdir, ancak kayma mesafesinin sadece belirli bir bölgesinde değil, hemen hemen tamamında etkindir. Söz konusu saçılmanın, aşınma yolu boyunca biriken aşınma ürünlerinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

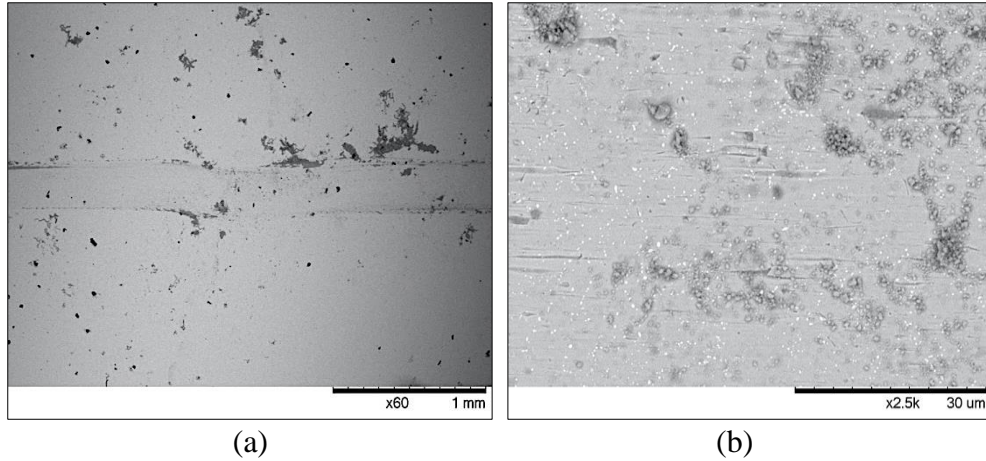
Su verilmiş ASP 2012 kalite çeliğin aşınma izinin SEM fotoğrafı Şekil 6.44'de görülmektedir. Aşınma izi üzerinde parlak görümlü küçük partiküller halinde homojen dağılmış karbürler görünmektedir. Ayrıca yer yer derin aşınma çizikleri ve oksit bölgeleri gözlenmektedir. Bu nedenle, su verilmiş ASP 2012 kalite çeliğin baskın aşınma mekanizmasının abrasiv aşınma ve oksidasyon aşınması olduğu değerlendirilmiştir. Bu yönüyle, su verilmiş ASP 2005 ve ASP 2012 kalite çeliklerin aşınma mekanizmaları farklıdır. Daha düşük sertliğe (980 HV<sub>0,1</sub>) ve daha düşük karbür boyutuna sahip ASP 2012 kalite çelikte abrasiv aşınma karakteristiği olarak aşınma izleri bulunurken, su verilmiş ASP 2005 kalite çeliğin yüksek sertliği ve nispeten büyük karbür boyutu abrasiv aşınma mekanizmasının etkin olmasını engellemiştir.



Şekil 6.42 : SV uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin aşınma izi profili.

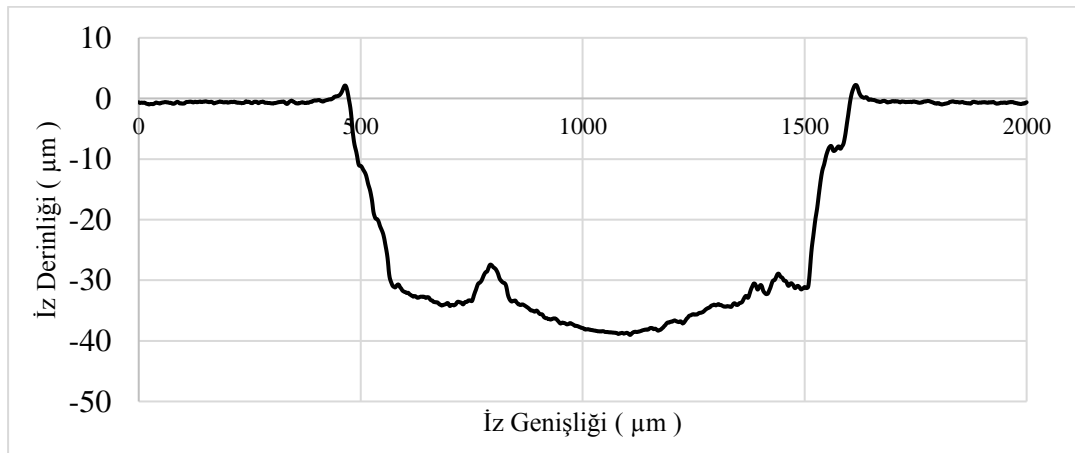


Şekil 6.43 : SV uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı olarak değişimi.

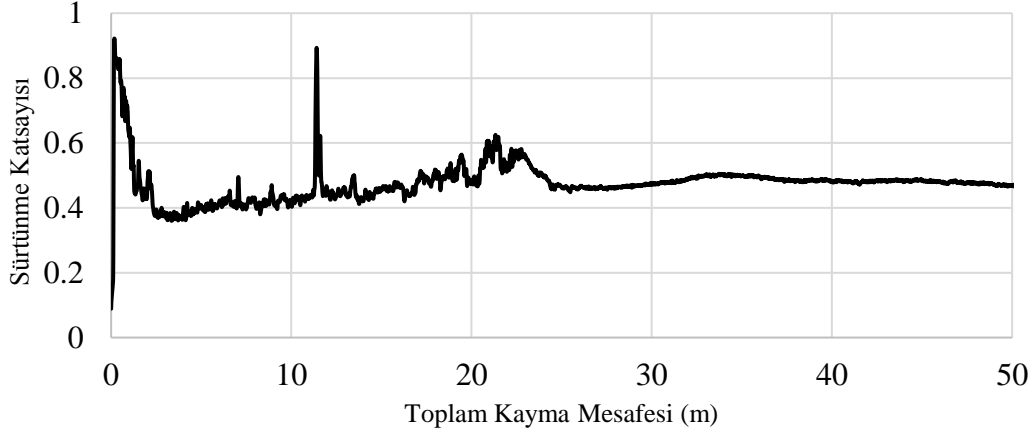


**Şekil 6.44** : SV uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin aşınma izinin SEM fotoğrafları (a) 60x, (b) 2500x .

Şekil 6.45’de SDA işlemi sonrası ASP 2005 kalite çeliğin aşınma izinin profili, Şekil 6.46’da ise kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi görülmektedir. Aşınma izinin genişliği ortalama 1100  $\mu\text{m}$ , derinliği ise ortalama 36  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir. SDA sonrası yüzeyde düşük sertliğe sahip kaplama malzemesi Al-ağ.%12 Si alaşımının bulunması nedeniyle aşınma izi oldukça geniştir. Öte yandan SDA sonrası yüzeyde bulunan Al-ağ. %12Si tabakasının kalınlığının yaklaşık 120  $\mu\text{m}$  olduğu göz önüne alındığında, aşınma izinin Al-Si tabakası içinde kaldığı anlaşılmaktadır. Sertliği düşük Al-Si tabakası, aşınma deneyinin başlangıcında nispeten yüksek bir sürtünme katsayısına (0,9) neden olmaktadır. Daha sonra hızla 0,4 değerine azalan sürtünme katsayısı, kayma mesafesinin artışına bağlı olarak sürekli ve dalgalı bir değişimle artış göstererek 25 m sonunda 0,6 değerine ulaşmış, daha sonra deneyin sonuna kadar sabit bir değer olarak kararlı hal sürtünme davranışı göstermiştir.

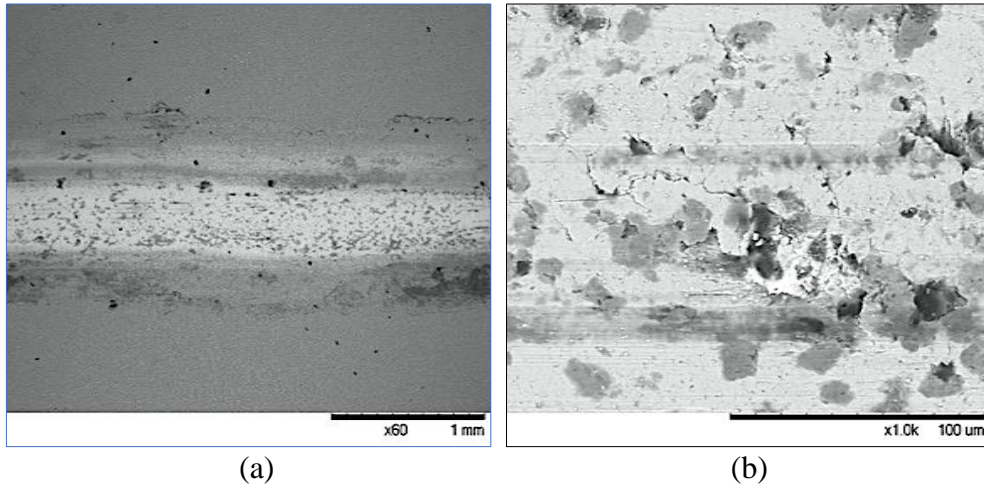


**Şekil 6.45** : SDA uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin aşınma izi profili.



**Şekil 6.46** : Alüminyum kaplanmış ASP 2005 kalite mesafeye bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

Şekil 6.47’de SDA sonrası ASP 2005 kalite çeliğin aşınma izinin SEM fotoğrafları görülmektedir. Aşınma yüzeyinde, mikro çatlaklar, aşınma çizikleri, plastik deformasyon, yüzeyden malzeme kopması ve yer yer oksidasyon görülmektedir. SDA uygulanmış ASP 2005 kalite çelikte baskın aşınma mekanizmasının abrasiv aşınma olduğu ve aşınma yüzeyindeki karakteristiklerden kaynaklanan aşınma ürünleri nedeniyle sürtünme katsayısında Şekil 6.46’da gözlenen büyük saçılmaların meydana geldiği değerlendirilmiştir.

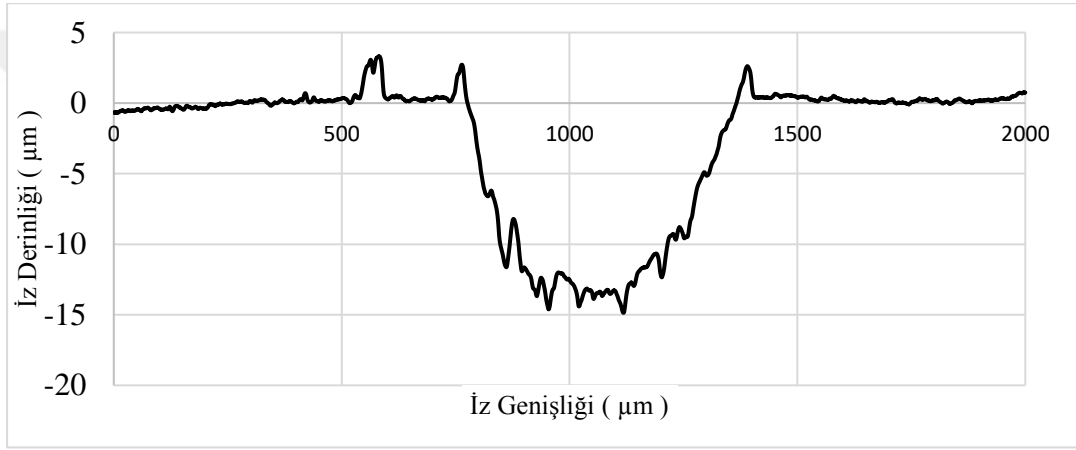


**Şekil 6.47** : SDA uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin aşınma izinin SEM fotoğrafları (a) 60x, (b) 1000x .

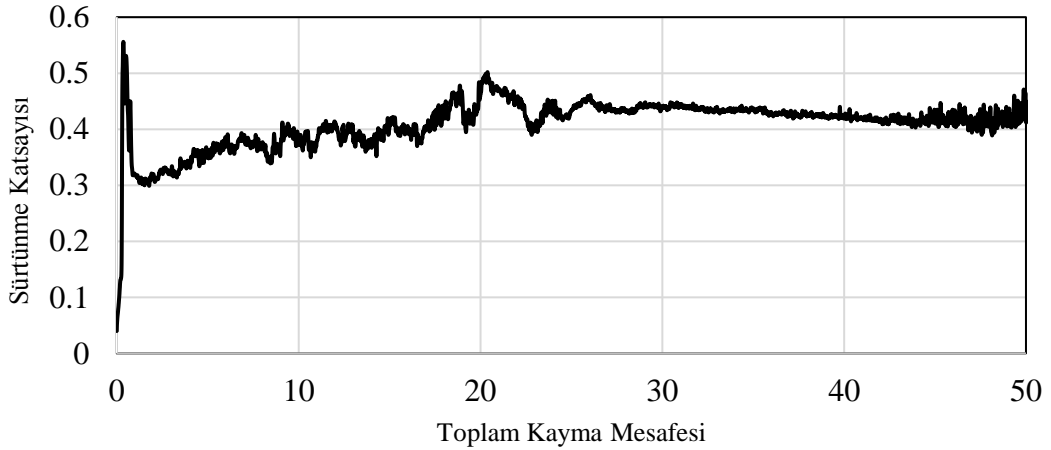
Şekil 6.48’de SDA uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin aşınma izinin profili verilmiştir. İz genişliği ortalama 600 µm, iz derinliği ise ortalama 13 µm olarak belirlenmiştir. Şekil 6.49’da verilen kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı değişimi SDA uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğe benzer olup, kayma mesafesinin 25. metresine kadar sürtünme katsayısı 0,3 – 0,5 aralığında değişmekte, daha sonra kayma

mesafesinin sonuna kadar 0,40-0,45 aralığında nispeten kararlı bir hal sergilemektedir. Sürtünme katsayısı değerlerindeki saçılma, aşınma yolu üzerindeki aşınma ürünlerinin varlığı ile ilişkilendirilmiş, bilyanın kayma hareketi sonucunda bu ürünlerin deformasyonu ile deneyin ilerleyen aşamalarında nispeten kararlı bir sürtünme katsayısı değerine ulaşılmıştır.

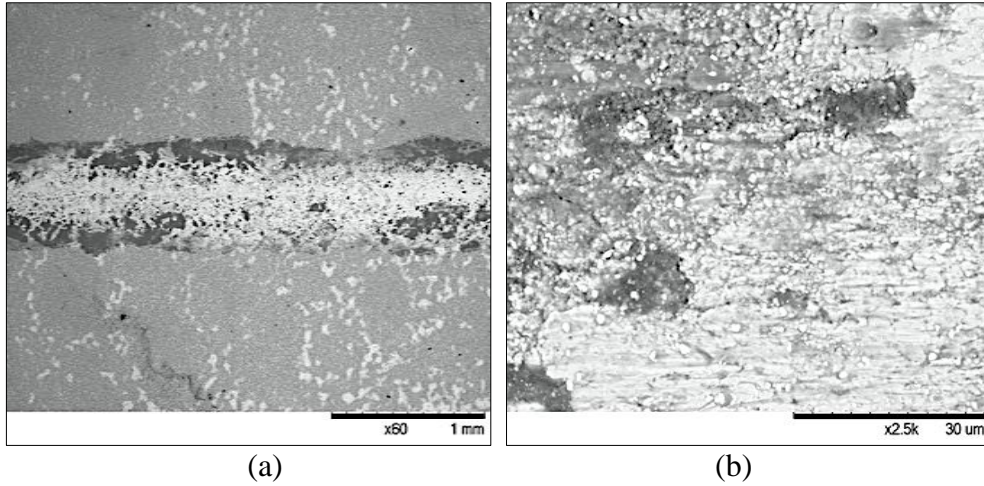
Şekil 6.50'de SDA uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin aşınma izinin SEM fotoğrafları görülmektedir. Yüzeyde, aşınma çizikleri, mikro çatlaklar, plastik deformasyon ve oksidasyon (koyu renkli bölgeler) görülmektedir. Söz konusu karakteristikler, baskın aşınma mekanizmasının abrasiv aşınma olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 6.48 : SDA uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin aşınma izi profili.



Şekil 6.49 : SDA yöntemiyle alüminyum kaplanmış ASP 2012 kalite çeliğin sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı olarak değişimi.

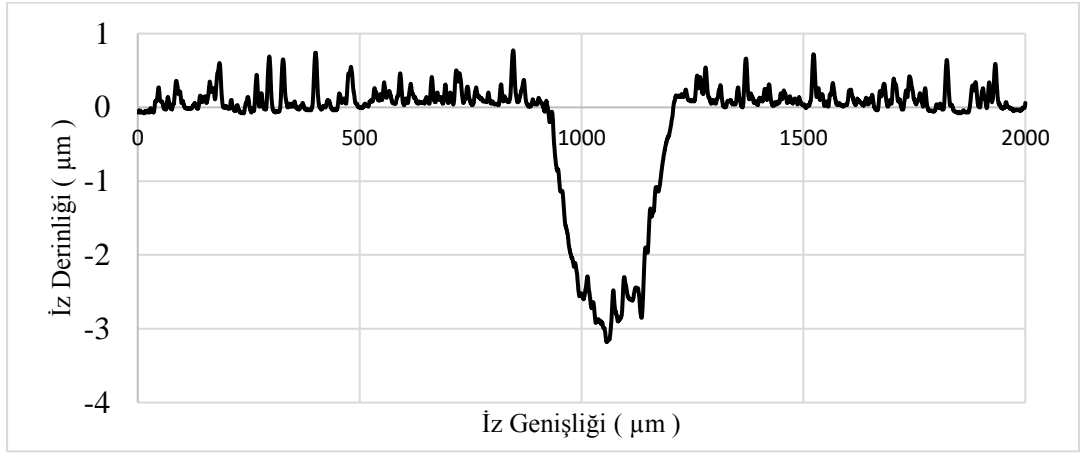


**Şekil 6.50 :** SDA uygulanmış ASP 2012 kalite çeliği aşınma izinin SEM fotoğrafları (a) 60x, (b) 2500x .

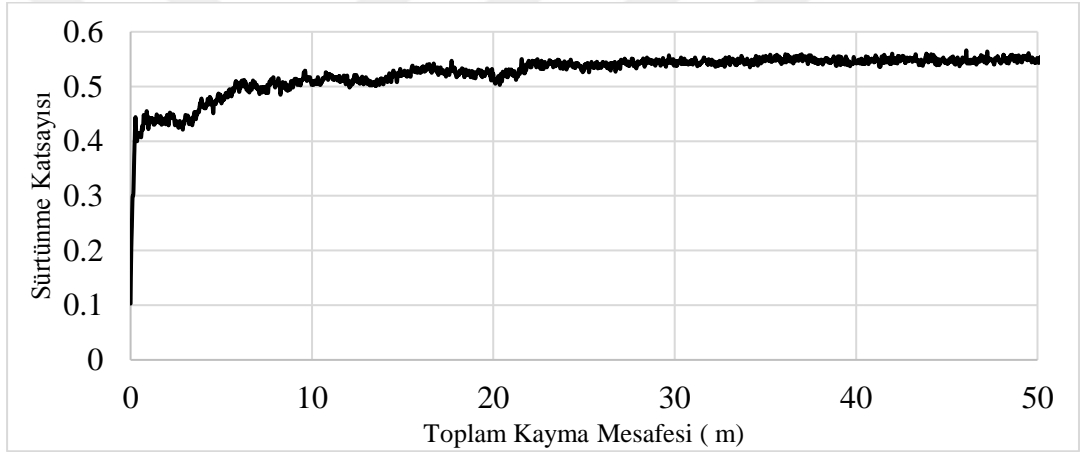
Şekil 6.51’de SDA ve difüzyon tavlaması uygulanmış ASP 2005 kalite çelikte aşınma izinin profili görülmektedir. Aşınma izinin genişliği ortalama 275 µm derinliği ise ortalama 2,75 µm olarak belirlenmiştir. Şekil 6.52’de görülen sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı değişiminden, sürtünme katsayısının deneyin başlangıcında ani olarak 0,45 değerine arttığı, daha sonra daha yavaş bir artışla 20. metrede 0,55 değerine ulaştığı ve deneyin sonuna kadar bu değeri koruyarak kararlı bir davranış gösterdiği belirlenmiştir.

Şekil 6.53’de SDA ve difüzyon tavlaması uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin aşınma izinin SEM fotoğrafları verilmiştir. Aşınma izinde belirgin bir aşınma çizizi bulunmamaktadır. Ancak yaklaşık 500 µm aralıklı aşınma izine dik plastik deformasyon bölgeleri ve bu bölgelerde kısmen oksidasyon gözlenmiştir. Aşınma kaybının bu bölgelerde meydana geldiği, dolayısıyla aşınma izi boyunca homojen bir malzeme kaybının olmadığı değerlendirilmiştir. Difüzyon tavlaması uygulanmış örnekler aşınma deneyi öncesi yaklaşık 200 µm zımparalandığı için, aşınmaya maruz kalan yüzeyde Fe ve Al arasında oluşan farklı intermetalikler bulunmaktadır. Noktasal-EDS analizine göre (Şekil 6.23’de 3. bölge) bu derinlikte (yüzeyin 200 µm altında) oluşan fazın Fe<sub>3</sub>Al olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla difüzyon tavlaması uygulanmış örnekte aşınma davranışının belirlenmesinde, çeliğin sertliğinden daha çok oluşan intermetalik fazın sertliği ve mekanik özelliği öne çıkmaktadır. Fe<sub>3</sub>Al, Fe esaslı bir faz olarak sert ve gevreklerdir. Sertliği 475 HV<sub>0,1</sub> olarak belirlenmiştir (Şekil 6.28). Buna göre, difüzyon tavlaması uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin su verilmiş

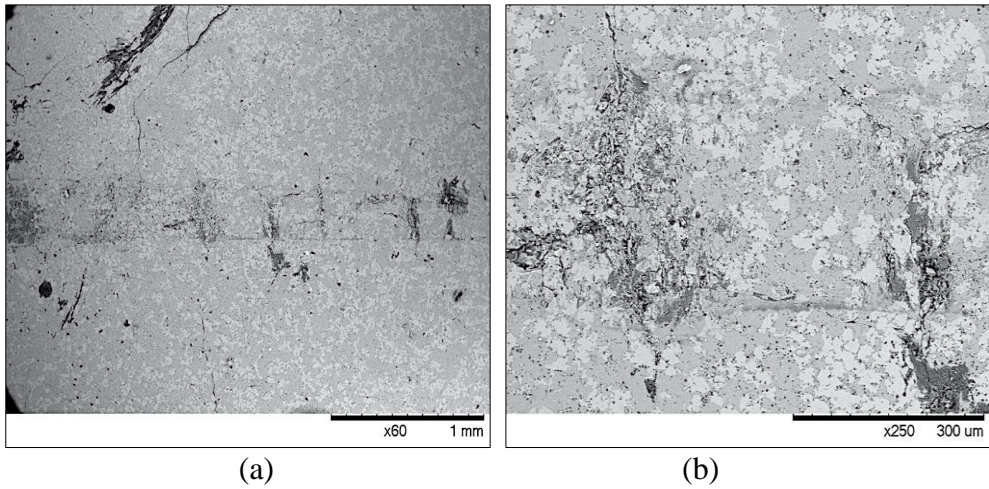
ASP 2005 kalite çeliğe göre daha geniş ve derin aşınma izi göstermesi (daha düşük aşınma direnci) bu iki numunenin sertlik değerleri arasındaki fark ile açıklanmaktadır.



Şekil 6.51 : SDA + DT uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin aşınma izi profili.

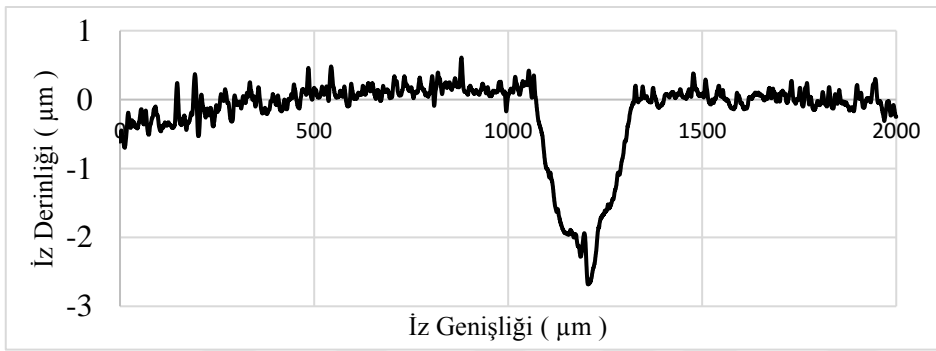


Şekil 6.52 : SDA + DT uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı olarak değişimi.

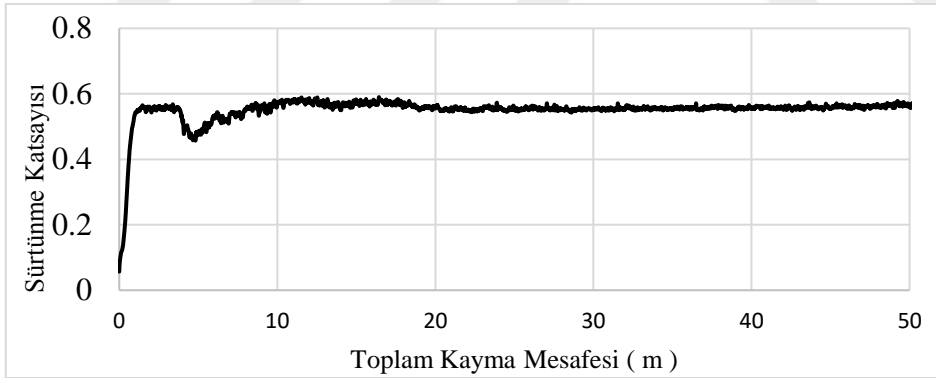


Şekil 6.53 : SDA + DT uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin aşınma izinin SEM fotoğrafları (a) 60x, (b) 250x .

Şekil 6.54’de difüzyon tavlaması uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin aşınma izinin profili, Şekil 6.55’de ise sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı olarak değişimi görülmektedir. Aşınma izinin genişliği, ortalama 250  $\mu\text{m}$ , derinliği ise 2,25  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı, deneyin başlangıcında 0,55 değerine ani olarak artmış, daha sonra 0,45 değerine azaldıktan sonra tekrar 0,55 değerine artarak deneyin sonuna kadar kararlı hal davranışı göstermiştir. Bu durum, difüzyon tavlaması uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin sürtünme katsayısı değişimine benzer olup, difüzyon katsayısı uygulanan örneklerin kararlı bir sürtünme davranışı sergilediklerini göstermektedir.



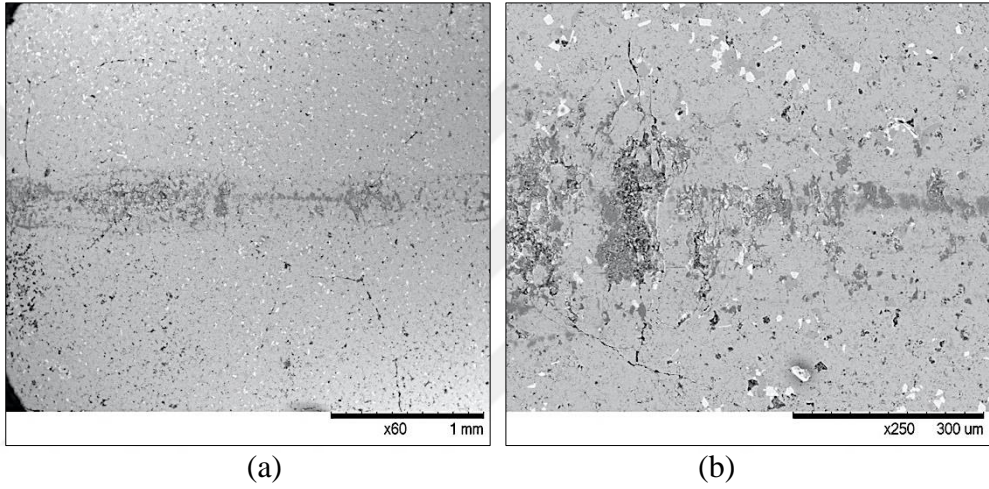
**Şekil 6.54 :** SDA + DT uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin aşınma izi profili.



**Şekil 6.55 :** SDA + DT uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı olarak değişimi.

Şekil 6.56’da difüzyon tavlaması uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin aşınma izinin SEM fotoğrafları görülmektedir. Aşınma izinde belirgin aşınma çizikleri bulunmamakta, yaklaşık 1000  $\mu\text{m}$  aralıklarla aşınma izine dik plastik deformasyon ve kısmi oksidasyon gözlenmektedir. Bu yönüyle difüzyon tavlaması uygulanmış ASP 2005 kalite çeliğin aşınma izine benzerdir. Ancak ASP 2012 kalite çelikte ayrıca, aşınma izinden başlayarak tüm yüzeye doğru ilerleyen ince ve uzun çatlaklar görülmektedir. Difüzyon tavlaması uygulanan ASP 2012 kalite çelik yüzeyi de, ASP

2005 kalite gibi, aşınma deneyinden önce yaklaşık 200 µm zımparalanmıştır. Dolayısıyla aşınma deneyine maruz kalan yüzeyde intermetalik faz bulunmaktadır. Şekil 6,26'da verilen noktasal EDS analizine göre yüzeyden 200 µm derinlikteki faz Fe<sub>3</sub>Al fazıdır ve sertliği 469 HV0,1 olarak belirlenmiştir (Şekil 6.30). Difüzyon tavlama uygulanmış ASP 2005 kalite çelikte olduğu gibi, ASP 2012 kalite çelikte de aşınma deneylerinin yapıldığı yüzey sert ve gevrek bir faz olan Fe<sub>3</sub>Al içermektedir. Bununla birlikte bu fazın sertliği, su verilmiş AP 2012 kalite çeliğin sertliğine göre (980HV0,1) oldukça düşüktür. Dolayısıyla aşınma izinin, su verilmiş hale göre daha geniş ve derin olması, bu koşulun daha düşük sertliği ile ilişkilendirilebilmektedir.



**Şekil 6.56** : SDA + DT uygulanmış ASP 2012 kalite çeliğin aşınma izinin SEM fotoğrafları (a) 60x, (b) 250x .

Şekil 6.57'de aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin aşınma iz profilleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Önceki bölümlerde sayısal olarak da belirtilen aşınma izinin genişlik ve derinliği kullanılarak ve aşınma izi yarım elips kabul edilerek Eşitlik (6.1) ile önce aşınma iz alanı, daha sonra Eşitlik (6.2) ile aşınma hızı hesaplanmıştır.

$$\text{Aşınma iz alanı (A)} = \frac{W \cdot D \cdot \pi}{4} \quad (6.1)$$

Bu eşitlikte,

A: Aşınma iz alanı (mm<sup>2</sup>),

W: Aşınma izinin genişliği (mm),

D: Aşınma izinin derinliği (mm) olarak tanımlanmıştır.

$$\text{Aşınma Hızı (W)} = \frac{A \cdot L}{F \cdot S} \quad (6.2)$$

Bu eşitlikte,

W: Aşınma hızı ( $\text{mm}^3/\text{N.m}$ ),

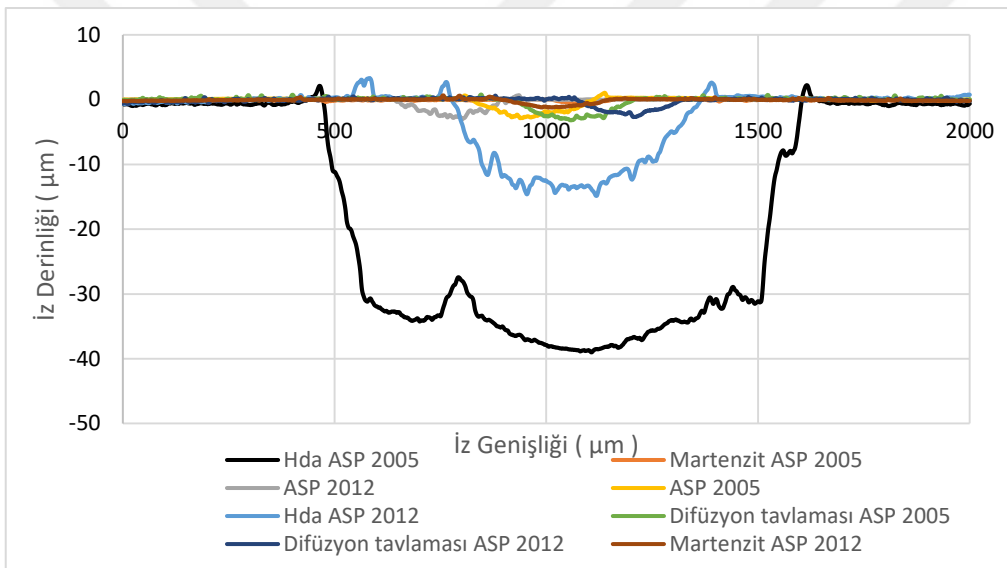
A: Aşınma iz alanı ( $\text{mm}^2$ ),

L: Karşıt hareket genliği (5 mm),

F: Deney yükü (3 N),

S: Toplam kayma mesafesi (50 m) olarak tanımlanmıştır.

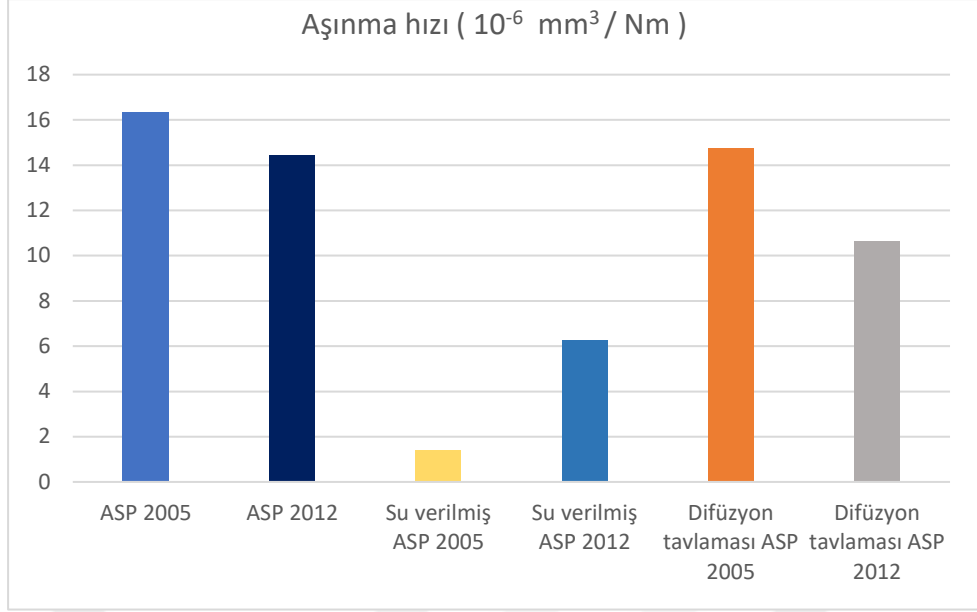
Bu tez çalışması kapsamında aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin aşınma hızı değerleri Çizelge 6.4’de verilmiş olup, ayrıca farklı numunelerin aşınma hızının değişimi, Şekil 6.58’de grafik olarak görülmektedir.



Şekil 6.57 : İncelenen numunelerin aşınma izi profillerinin karşılaştırılması.

Çizelge 6.4 : Numunelerin aşınma hızı değerleri.

Numune Tanımı	Aşınma Hızı ( $\times 10^{-6} \text{ mm}^3 / \text{Nm}$ )
ASP 2005	16,3
ASP 2012	14,4
Su verilmiş ASP 2005	1,4
Su verilmiş ASP 2012	6,3
SDA ASP 2005	1164
SDA ASP 2012	197,2
SDA + DT ASP 2005	14,7
SDA + DT ASP 2012	10,6



**Şekil 6.58 :** İncelenen numunelerin aşınma hızı değerlerinin karşılaştırılması.

Çizelge 6.4 ve Şekil 6.58'den su verilmiş ASP 2005 ve 2012 takım çeliklerinin en düşük aşınma hızına (en yüksek aşınma direncine) sahip oldukları görülmektedir. SDA uygulanmış takım çelikleri ise en yüksek aşınma hızına sahiptir. Difüzyon tavlaması uygulanmış çeliklerin aşınma hızı, çeliklerin su verme öncesindeki durumları ile karşılaştırılabilir düzeydedir. Dolayısıyla 3 farklı numune grubu (ısıtılmış, su verilmiş, difüzyon tavlaması uygulanmış) arasındaki aşınma hızı, bu numune gruplarının sertliğinin farklı olmasıyla ilişkilendirilebilmekte, sertliği yüksek olan grubun daha iyi aşınma direncine sahip olduğu görülmektedir.

Öte yandan, su verilmiş grup dışındaki numune gruplarındaki iki farklı çeliğin aşınma dirençlerinin farkını açıklamak için sertlik yeterli olmamaktadır. Bu kapsamda, ısıtılmış haldeki ASP 2012 kalite çeliğin ASP 2005 kalite çeliğe göre daha iyi aşınma direnci göstermesi, mikroyapısında bulunan karbürlerin daha küçük boyutlu olmasıyla ilişkilendirilebilmektedir. Su verme sonrası ASP 2005 kalite çeliğin aşınma direnci, ASP 2012 kalite çeliğe göre daha yüksektir. Bu durum, su verme sonrası kazanılan sertliğin aşınma direncini belirlemede karbür boyutundan daha önemli olduğunu göstermektedir. Difüzyon tavlaması uygulanmış örnekler içinde ise ASP 2012 kalite çeliğin aşınma direnci ASP 2005 kalite çeliğe göre daha iyidir. Her iki çelikte de aşınma deneyleri yüzeyin 200 µm altında gerçekleştirilmiştir ve bu bölgede Fe<sub>3</sub>Al fazı bulunmaktadır. Buna rağmen, Şekil 6.32'de verilen Rockwell C yapışma deneyi sonrası yüzey görünümüne göre, ASP 2005 kalite çeliğin aşınma yüzeyi, ASP 2012 kalite çeliğe göre daha gevrek bir davranış sergilemiştir. Bu durumda intermetalik

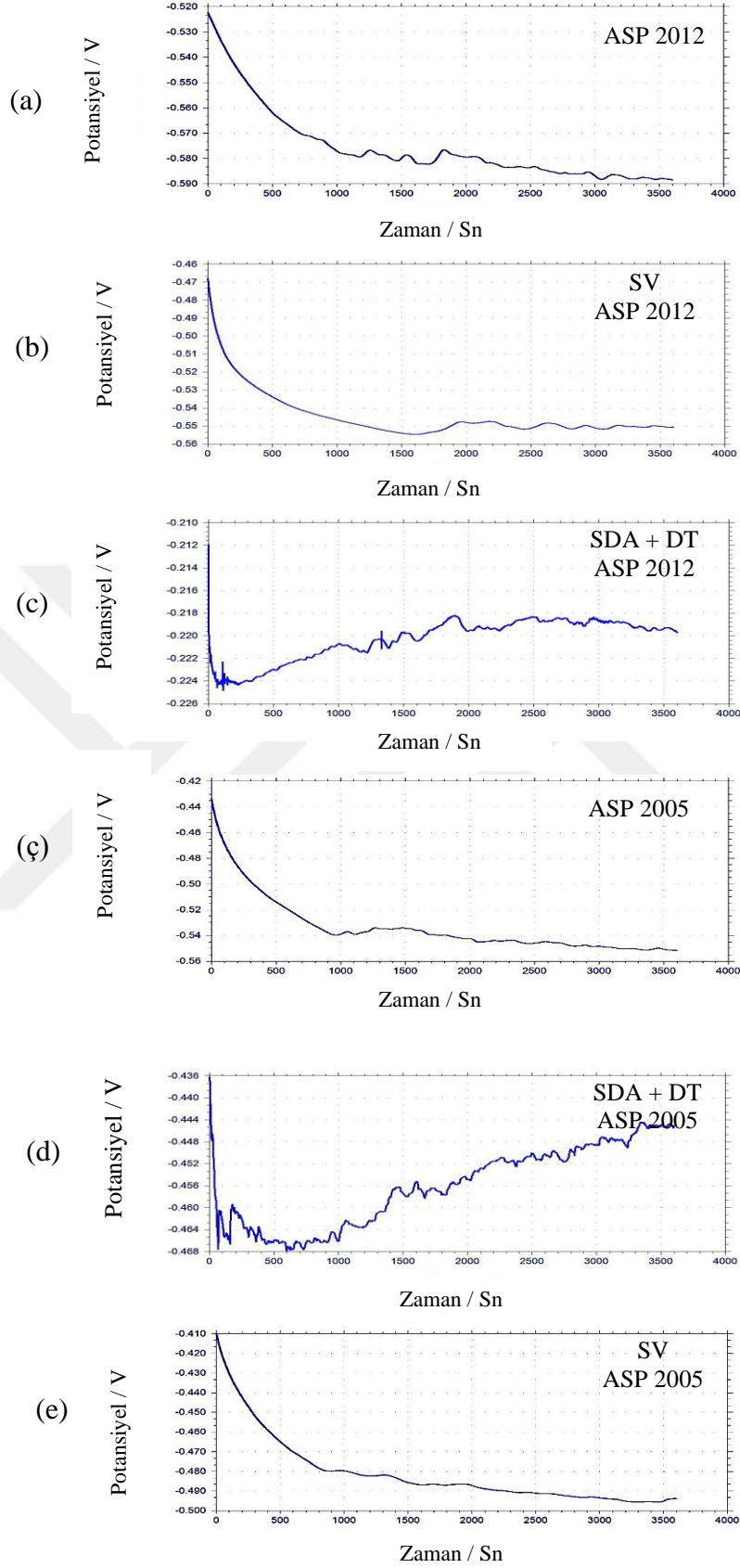
tabakaların nispeten gevrek karakterli olması aşınma direncini azaltan bir unsur olarak görülmektedir.

### 6.5 Korozyon Deney Sonuçları

Altlık malzemeler olan ASP 2012 ve ASP 2005 kalite takım çeliklerinin ısıtılıp işlemlenmiş, su verilmiş ve sıcak daldırma alüminyum kaplama sonrası difüzyon tavlama uygulanmış numunelerinin korozyon deneyi yapılmıştır.

Potansiyodinamik korozyon deneyleri yapılarak korozyon akım yoğunluğu ve korozyon potansiyeli Tafel ekstropolasyon yöntemi ile belirlenmiştir. Tafel ekstropolasyon yöntemi ile korozyon hızının belirlenmesi, korozyon akım yoğunluğu değerini belirten  $I_{kor}$  ve korozyon potansiyelini temsil eden  $E_{kor}$  değerlerini elde etmek mümkündür. Deney hücresinde çalışma elektrotu olarak takım çelikleri, karşıt elektrot olarak platin (Pt) elektrot ve referans elektrot olarak gümüş / gümüş klorür (Ag / AgCl) elektrot kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar esnasında ilk olarak sistem içerisinde herhangi bir akım oluşturmadan, çalışma elektrotu olarak kullanılan takım çelikleri %3,5 NaCl içeren sulu çözeltiye daldırılmış ve referans elektrot olan Ag / AgCl arasındaki korozyon potansiyellerinin değişimi zamana bağlı olarak belirlenmiştir (Şekil 6.59). Korozyon potansiyelinin denge potansiyeli değerine ulaştığında, potansiyodinamik polarizasyon verileri katodikten anodik doğrultuya doğru kayıt edilmiştir. OCP ölçüm grafiklerinde deneysel çalışmaların başlangıcında ölçülen potansiyelin zamanla azalarak ilk ölçüm yapılan değerden daha düşük seviyelere azalması numune yüzeyinde korozyonun başladığına işaret etmektedir. Deneysel sistemin potansiyel değerinin hızla düşmesi takım çeliklerinin korozyona uğradığını ve korozyon hızının ilerlediğini göstermektedir.

Sistemin potansiyel değeri belirli bir alt noktaya ulaştıktan sonra ufak artışlar göstermektedir. Bu durum deney numunesinin korozyona maruz kalma hızının yavaşladığı anlamına gelmektedir. Potansiyel değerdeki bu artma ve azalmalar sistemin dinamik bir yapıda olduğunu göstermekte ve sistem stabil bir hale gelene kadar devam etmektedir. Korozyon deneylerinde kullanılan numunelerin 1 cm<sup>2</sup>'lik yüzey alanı sulu çözelti içerisine daldırılmış olup hesaplamalar bu değer üzerinden gerçekleştirilmiştir. Buna göre altı farklı numunenin korozyon potansiyeli, korozyon hızı ve akımı Çizelge 6.5'de belirtilmiştir.



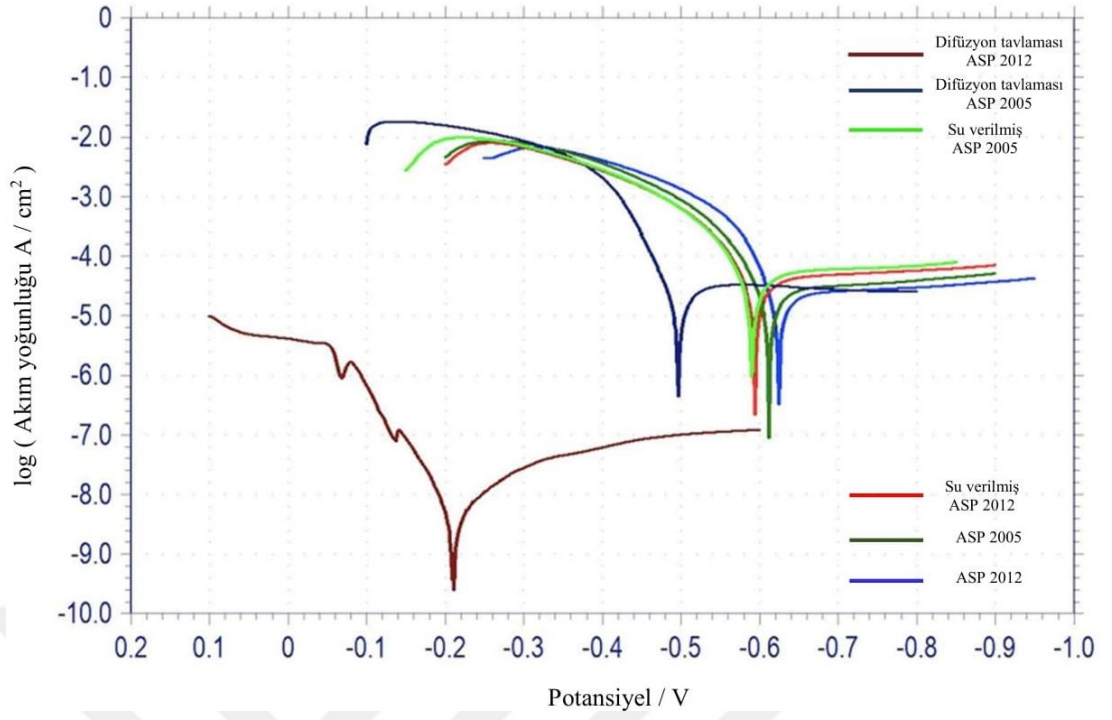
**Şekil 6.59 :** İncelenen numunelerin zamana bağlı OCP ölçüm grafikleri (a) ASP 2012, (b) SV ASP 2012, (c) SDA + DT ASP 2012, (ç) ASP 2005, (d) SDA + DT ASP 2005, (e) SV ASP 2005.

**Çizelge 6.5 :** Numunelerin korozyon potansiyeli, korozyon hızı ve korozyon akım yoğunluğu değerleri.

<b>Deney numuneleri</b>	<b>Korozyon potansiyeli ( V )</b>	<b>Korozyon hızı ( mpy )</b>	<b>Korozyon akım yoğunluğu ( A / cm<sup>2</sup> )</b>
ASP 2012	-0,6256	12,52	2,732 x 10 <sup>-5</sup>
ASP 2005	-0,6130	16,42	3,582 x 10 <sup>-5</sup>
Su verilmiş ASP 2012	-0,5952	25,69	5,604 x 10 <sup>-5</sup>
Su verilmiş ASP 2005	-0,5910	33,00	7,198 x 10 <sup>-5</sup>
Difüzyon tavlamaşı ASP 2012	-0,2109	3,428 x 10 <sup>-3</sup>	7,991 x 10 <sup>-9</sup>
Difüzyon tavlamaşı ASP 2005	-0,4968	13,90	3,240 x 10 <sup>-5</sup>

Şekil 6.60’da görülen Tafel eğrilerinin anodik ve katodik eğrilerinin teğetinin kesişim noktası numunelerin  $I_{kor}$  değerini belirtmektedir. Eğrilerin potansiyel / V eksenine ile kesişim noktası numunelerin  $E_{kor}$  değerlerini vermektedir. Korozyon direnci  $I_{kor}$  değeri yükseldikçe,  $E_{kor}$  değeri ise azaldıkça düşmektedir. Buna göre  $I_{kor}$  değerinin diğer numunelere göre düşük değerde olması ilgili takım çeliğinin korozyon direncinin daha yüksek olduğunu belirtmektedir. Karşılaştırmalı olarak verilen eğrilerde difüzyon tavlamaşı uygulanmış ASP 2012 kalite takım çeliğinin en yüksek korozyon direncine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, altlık malzeme olarak kullanılan ASP 2005 ve ASP 2012 kalite takım çeliklerinin en düşük korozyon direncine sahip oldukları, su verilmiş takım çeliklerinin işlem görmemiş numunelere göre az bir miktar daha iyi korozyon direnci sergiledikleri görülmektedir.

Sıcak daldırma alüminyum kaplama sonrası difüzyon tavlamaşı uygulanmış numunelerin daha iyi korozyon direnci sergilemeleri, difüzyon tavlamaşı sonucu, yüzeyde oluşan çok katmanlı koruyucu intermetalik tabakadan kaynaklanmaktadır. Öte yandan difüzyon tavlamaşı uygulanan numuneler kendi içinde değerlendirildiğinde ASP 2012 kalite çeliğin daha iyi korozyon direncine sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun ASP 2012 kalite çelik yüzeyinde alüminyumca zengin FeAl<sub>2</sub> fazının katkısı olabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 6.60 : İncelenen numunelerin Tafel polarizasyon eğrileri.



## 7. GENEL SONUÇLAR

Toz metalurjisi ile üretilen ASP 2005 ve ASP 2012 kalite takım çelikleri, 700°C'de sıcak daldırma yöntemiyle Al-ağ.%12Si alaşımı ile kaplanmıştır (SDA işlemi). Kaplama işleminden sonra ASP 2005 kalite için 1100°C, ASP 2012 kalite için 1070°C'de 1 saat difüzyon tavlama gerçekleştirilmiş (DT işlemi) ve daha sonra numuneler havada oda sıcaklığına soğutulmuştur. Daha sonra bu çeliklerin işlenmemiş, su verilmiş, SDA uygulanmış ve SDA + DT uygulanmış numunelerinin yapısal ve mikroyapısal karakterizasyonu gerçekleştirilmiş, mikrosertlik, yapışma dayanımı, aşınma ve korozyon deneyleri yapılmıştır. Bu işlemler sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

1. ASP 2005 ve ASP 2012 kalite takım çelikleri, mikroyapısında yüksek oranda küresel ve köşeli morfolojide karbürler içeren takım çelikleridir. Karbür tipleri,  $M_2C$ ,  $MC$ ,  $M_3C$  ve  $M_{23}C_6$  olarak belirlenmiştir. ASP 2005 kalite çelikteki karbür boyutu ve oranı ASP 2012 kalite çeliğe göre daha yüksektir.
2. SDA işlemiyle her iki kalite takım çeliğinin yüzeyi de başarıyla Al-ağ.%12 Si alaşımı kaplanmıştır. Kaplama-altlık malzeme arayüzeyinde herhangi bir süreksizlik bulunmamaktadır. Kaplama kalınlığı her iki kalite takım çeliği için de yaklaşık 100  $\mu m$ 'dir.
3. SDA işlemi sonrasında yapılan DT işlemi, çelik kalitesine bağlı olarak kaplama kalınlığını 2,5 - 3 kat arttırmış ve daha homojen bir kaplama tabakası üretmiştir. Öte yandan, SDA işlemi sonunda iki katmanlı bir tabaka üretilmiş iken, DT sonrası kaplama tabakası da artmıştır Ancak DT sonrası kaplamanın en dış yüzeyinde ve yüzeye yakın katmanlar arasında Kirkendall porozite olarak tanımlanan süreksizlikler gözlenmiştir.
4. DT işlemi sonunda dış yüzeyden altlık malzemeye doğru oluşan fazlar, ASP 2005 kalite çelikte  $FeAl$  ve  $Fe_3Al$  iken, ASP 2012 kalite çelikte,  $FeAl_2$ ,  $FeAl$  ve  $Fe_3Al$  fazlarıdır. Söz konusu fazlar Fe esaslı olup, DT işlemi sonrası herhangi bir alüminyumca zengin faz tespit edilmemiştir.

5. DT işleminin sonunda çeliklerin en dış katmanının sertlikleri, ASP 2005 kalite için  $937 \pm 20 \text{ HV}_{0,1}$ , ASP 2012 kalite için ise  $897 \pm 113 \text{ HV}_{0,1}$  olarak belirlenmiştir. Ancak oldukça sert olan en dış tabakada boşluk ve çatlaklar da vardır. Bu nedenle aşınma deneyleri için DT uygulanmış sert dış bölge zımparalanarak uzaklaştırılmış ve aşınma deneyleri çatlaksız ve homojen olan yüzeyden itibaren 2. interdifüzyon katmanında yapılmıştır. Söz konusu katmanın sertliği, ASP 2005 için  $475 \pm 35 \text{ HV}_{0,1}$  ve ASP 2012 kalite çelik için  $469 \pm 45 \text{ HV}_{0,1}$  olarak belirlenmiştir.
6. Rockwell C yapışma deneyleri sonunda SDA + DT uygulanan numunelerin yapışma dayanım kategorisi HF-3 olarak belirlenmiştir. Bu durum yapışma deneyi sonunda her iki numunenin kaplama tabakasında da çatlakların oluştuğunu, dolayısıyla kaplama tabakasının yapışma deneyine tabi tutulan bölgesinin gevrek karakterde olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, ASP 2012 kalite çelikte çatlak oranı daha düşük olup, bu çeliğin kaplama tabakasının ASP 2005 kalite çeliğe göre daha tok olduğunu göstermektedir.
7. Aşınma deneylerinde, ısıtma işlemi uygulanmayan, su verilmiş, SDA ve SDA + DT işlemi uygulanmış ASP 2005 ve ASP 2012 kalite çelikler kullanılmıştır. En yüksek aşınma direnci, sertliği en yüksek olan su verilmiş ASP 2005 kalite çelikte elde edilmiştir. DT işlemi uygulanan numunelerin aşınma direnci, ısıtma işlemi uygulanmayan ASP 2005 ve ASP 2012 kalite çeliklerle karşılaştırılabilir düzeyde olup, su verilmiş numunelere göre daha düşüktür.
8. Her bir işlem grubu içinde (ısıtma işlemi uygulanmayan, su verilmiş ve SDA + DT işlemi uygulanmış), ASP 2005 ve ASP 2012 kalite çelikler karşılaştırıldığında, ısıtma işlemi uygulanmayan numunelerde daha iyi aşınma direncinin daha küçük karbür boyutuna sahip ASP 2012 kalite çelikte elde edildiği görülmüştür. Su verilmiş numunelerde daha iyi aşınma direncinin daha yüksek sertliğe sahip ASP 2005 kalite çelikte elde edildiği, SDA + DT uygulanan numunelerde ise daha iyi aşınma direncinin kaplama tabakası nispeten daha tok olan ASP 2012 kalite çelikte elde edildiği belirlenmiştir.
9. SDA + DT işlemi sonunda yüzeyde oluşan çok katmanlı koruyucu intermetalik katmanlardan dolayı, SDA + DT uygulanan numunelerin korozyon direnci, ısıtma işlemi uygulanmamış ya da su verilmiş numunelere göre önemli ölçüde artmaktadır. ASP 2012 kalite çeliğin yüzeyinde bulunan alüminyumca zengin

FeAl<sub>2</sub> fazının daha yüksek korozyon direnci elde edilmesinde katkısı olduğu değerlendirilmiştir.

10. İleride yapılacak çalışmalarda, SDA ve DT işlem parametrelerini değiştirerek, elik yzeyinde alüminyumca zengin intermetalik fazların elde edilmesine ynelik çalışılması önerilmektedir.





## KAYNAKLAR

- [1] **Url-1**<<https://www.metalsupermarkets.com/tool-steel-applications-grades/>>, erişim tarihi 26.04.2021 .
- [2] **Oberg, E., Jones, F. D., Horton, H.L., Ryffel, H.H., & Jones, F. D.** (2004). *Machinery's Handbook*. New York: Industrial Press INC.
- [3] **Reardon, A. C. (Ed.)**. (2011). *Metallurgy for the Non-metallurgist*. ASM International.
- [4] **Odvisnosti, J. Z. H. O. V., & Obdelave, O. T.** (2017). Study of the properties and structure of selected tool steels for cold work depending on the parameters of heat treatment. *Materiali in tehnologije*, 51(4), 585-589.
- [5] **Besler, R., Bauer, M., Furlan, K. P., Klein, A. N., & Janssen, R.** (2017). Effect of processing route on the microstructure and mechanical properties of hot work tool steel. *Materials Research*, 20, 1518-1524.
- [6] **Wang, H. K., Wang, Z. H., & Wang, M. C.** (2020). Using the Taguchi method for optimization of the powder metallurgy forming process for Industry 3.5. *Computers & Industrial Engineering*, 148, 106635.
- [7] **Danninger, H.** (2018). What Will Be the Future of Powder Metallurgy?. *Powder Metallurgy Progress*, 18(2), 70-79.
- [8] **İlter, Ö.** (2008). *Alüminyum enjeksiyon döküm kalıplarında sıvı metal-kalıp etkileşimine yüzey işlemlerinin etkisi*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- [9] **Poulachon, G., Bandyopadhyay, B. ., Jawahir, I. ., Pheulpin, S., & Seguin, E.** (2003). The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(2), 139–144.
- [10] **Bostan, B.** (2015). *Yüksek hız takım çeliklerinin yüksek sıcaklık aşınma dayanımına nitrasyon işleminin etkisi*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- [11] **Banerjee, M. K.** (2018). Physical Metallurgy of Tool Steels. Jaipur, India. Malaviya National Institute of Technology, *Materials Science and Materials Engineering*, 1-27.
- [12] **Bayer, A.M., Becherer, B.A., & Vasco T.** (1989). High speed tool steels. *ASM Handbook*, Volume 16: Machining ASM Handbook Committee, p 51-59.
- [13] **Aktaş, G.** (2014). *Alüminyum ekstrüzyonunda kalıp malzemesi olarak kullanılan sıcak iş takım çeliklerinin yüzey işlemleri ve tribolojik karakterizasyonu*. (Yüksek lisans tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

- [14] **Yeşilçubuk, S. A.** (2010). *Enjeksiyon kalıplarında kullanılan sıcak iş takım çeliklerinin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi*. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- [15] **Panda, A., Dobransky, J., Jančík, M., Pandova, I., & Kačalová, M.** (2018). Advantages and effectiveness of the powder metallurgy in manufacturing technologies. *Metalurgija*, 57(4), 353-356.
- [16] **Aydın, M.** Takım çelikleri üretiminde kullanılan vakum ergitme proseslerinin metalurjik karakterizasyonu, Teknik yazı, *Metalurji Mühendisleri Odası*. s. 37-42.
- [17] **Roberts, G. A., Kennedy, R., & Krauss, G.** (1998). *Tool steels*. ASM international.
- [18] **Mesquita, R. A.** (2016). *Tool steels: Properties and performance*. CRC press.
- [19] **Kho, T. S., Swinbourne, D. R., Blanpain, B., Arnout, S. & Langberg, D.**(2010). Understanding stainless steelmaking through computational thermodynamics Part 1: electric arc furnace melting, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 119:1, 1-8.
- [20] **Ikawa, Y., Itami, T., Kumagai, K., Kawashima, Y., AG, L., & RG, B.** (1990). Spray deposition method and its application to the production of mill rolls. *ISIJ International*, 30(9), 756-763.
- [21] **Url-2** <<https://www.bohler-edelstahl.com/en/production/>> , erişim tarihi 08.05.2021.
- [22] **Pellizzari, M., & Deirmina, F.** (2017). Powder metallurgy opens new ways for tool steels. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 12(3-4), 250-258.
- [23] **Tayanç, M., & Zeytin, G.** (2000). Yüksek hız çeliklerinin iç yapı ve ısıl işlem özellikleri. *BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 2 (1).
- [24] **Totten, G. E.** (2006). *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies* (pp. 1–837). CRC Press.
- [25] **Url-3** <[https://www.erasteel.com/wp-content/uploads/2021/04/GB\\_Grade\\_ASP-2005.pdf](https://www.erasteel.com/wp-content/uploads/2021/04/GB_Grade_ASP-2005.pdf)> , erişim tarihi 10.05.2021.
- [26] **Url-4** <[https://www.erasteel.com/wp-content/uploads/2021/04/GB\\_Grade\\_ASP-2012.pdf](https://www.erasteel.com/wp-content/uploads/2021/04/GB_Grade_ASP-2012.pdf)> , erişim tarihi 10.05.2021.
- [27] **Rajendran, R., Venkataswamy, S., Jaikrishna, U., Gowrishankar, N., & Rajadurai, A.** (2004). Effect of process parameters in hot dip aluminizing of medium carbon steel. *Materials Science Letters*, 22(8).
- [28] **Ertürk, U.** (2017). *Production and development of aluminide coatings by chemical vapor deposition on nickel based superalloys for turbine engine applications*. (Master's thesis). Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- [29] **Isiko, M. B.** (2012). *Aluminizing of plain carbon steel: Effect of temperature on coating and alloy phase morphology at constant holding time*. (Master's thesis). Norwegian University of Science and Technology, Department of Materials Science and Engineering, Trondheim.

- [30] **Groover, M. P.** (2020). *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. John Wiley & Sons.
- [31] **Awan, G. H., & Ul Hasan, F.** (2008). The morphology of coating/substrate interface in hot-dip-aluminized steels. *Materials Science and Engineering: A*, 472(1-2), 157-165.
- [32] **Huilgol, P., Udupa, K. R., & Bhat, K. U.** (2019). Microstructural investigations on the hot-dip aluminized AISI 321 stainless steel after diffusion treatment. *Surface and Coatings Technology*, 375, 544-553.
- [33] **Zhang, Q. Y., Zhou, Y., Liu, J. Q., Chen, K. M., Mo, J. G., Cui, X. H., & Wang, S. Q.** (2015). Comparative research on dry sliding wear of hot-dip aluminized and uncoated AISI H13 steel. *Wear*, 344, 22-31.
- [34] **Piotr Matysik , Stanisław Józwiak and Tomasz Czujko.** (2015). Characterization of low-symmetry structures from phase equilibrium of Fe-Al system—microstructures and mechanical properties. *Materials* 8, 914-931.
- [35] **Kalaycı, T.** (2018). *Sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplanmış inconel 718 süperalaşımının oksidasyon direncinin incelenmesi.* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- [36] **Awan, G. H., Ahmed, F., Ali, L., Shuja, M. S., & Hasan, F.** (2008). Effect of coating-thickness on the formability of hot dip aluminized steel. *Pak. J. Engg. & Appl. Sci. Vol. 2*.
- [37] **Ciuffini, A. F., Barella, S., Di Cecca, C., Gruttadauria, A., Mombelli, D., & Mapelli, C.** (2017). Hot-dip aluminizing on AISI F55–UNS S32760 super duplex stainless steel properties: effect of thermal treatments. *Metals*, 7(12), 525.
- [38] **Drozd, K., Walczak, M., Szala, M., & Gancarczyk, K.** (2020). Tribological behavior of AlCrSiN-coated tool steel K340 versus popular tool steel grades. *Materials*, 13(21), 4895.
- [39] **Al-Bukhati, M. A., Al-Hatab, K.A., Tillmann, W., Hoffmann, F., & Sprute, T.** (2014). Tribological and mechanical properties of Ti/TiAlN/TiAlCN nanoscale multilayer PVD coatings deposited on AISI H11 hot work tool steel. *Applied surface science*, 318, 180-190.
- [40] **Zappelino, B. F., de Almeida, E. D. S., Krelling, A. P., da Costa, C. E., Fontana, L. C., & Milan, J. C. G.** (2020). Tribological behavior of duplex-coating on Vanadis 10 cold work tool steel. *Wear*, 442, 203133.
- [41] **Yürektürk, Y., & Baydoğan, M.** (2018). Characterization of ferritic ductile iron subjected to successive aluminizing and austempering. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 347:142-149.
- [42] **Lenz, B., Hasselbruch, H., & Mehner, A.** (2020). Automated evaluation of Rockwell adhesion tests for PVD coatings using convolutional neural networks. *Surface and Coatings Technology*, 385, 125365.



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Burak BİLİM

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, Marmara üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Mühendisliği Programı