

**T.C.  
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**EKSTRÜDER VİDALARI İÇİN KROM OKSİT ESASLI  
FLEKSİKORD ALEV SPREY KAPLAMALARININ ÜRETİMİ VE  
AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ali İlkay SEMERCİ**

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME  
MÜHENDİSLİĞİ**  
**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ekrem ALTUNCU**

**TEMMUZ 2021**

## **BEYAN**

Tez içinde bulunan tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı bütün bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun biçimde sunulduğunu, kullanılan verilerde hiç bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlandığı durumlarda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde bulunan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Ali İlkay SEMERCİ

28/07/2021

## TEŞEKKÜR

Lisans ve Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Ekrem ALTUNCU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamız boyunca bize tüm kapıları sonuna kadar açık olan SAÜ TESLAB (SAÜ Termal Sprey Araştırma ve Uygulama Laboratuvarı), SUMAR (SUBÜ Malzeme ve Üretim Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi) ekibine teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışma TUBİTAK 2209-B Sanayiye Yönelik Lisans Araştırma Programı Destekleme Programı tarafından desteklenmiş olup, vermiş oldukları maddi desteklerinden dolayı TUBİTAK'a (Proje No: 1139B411601028) teşekkür ederim. Projenin sanayi kolunda bize tesislerini açan ve her türlü bilgi paylaşımı konusunda desteklerini esirgemeyen STANDARD PROFİL A.Ő. firmasına teşekkürü borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

BEYAN.....	iii
TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
KISALTMALAR .....	iv
SİMGELER .....	v
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	ix
SUMMARY .....	1

## BÖLÜM 1.

GİRİŞ .....	2
1.1. Çalışmanın Gerekçesi.....	3
1.2. Çalışmanın İçerdiği Yenilik Unsurları .....	4
1.3. Çalışmanın İlgili Olduğu Teknoloji Alanları .....	5

## BÖLÜM 2. ....

LİTERATÜR ÇALIŞMASI .....	6
2.1. Polimer Ekstrüzyonu .....	6
2.1.1. Polimer ekstrüzyon prosesi .....	6
2.1.2. Ekstrüzyon vidalarının genel özellikleri .....	7
2.1.3. Vida boyunca bölmeler .....	8
2.1.4. Sonsuz vida uzunlukları .....	10
2.1.5. Vidanın teknik bilgileri .....	10
2.2. Ekstrüder Vidalarda Kullanılan Alaşımlar .....	12
2.2.1. 8550 nitrasyon çeliği .....	12
2.2.2. 4110 ıslah çeliği .....	13
2.3. Ekstrüzyon Vidalarında Aşınma Nedenli Problemler .....	14

2.3.1. Ekstrüzyon vidalarında aşınma .....	14
2.3.2. Vidalarda karşılaşılan aşınma türleri.....	15
2.4. Aşınma Önleyici Yüzey İşlemler ve Isıl İşlemler .....	18
2.4.1. Nitürleme işlemi .....	18
2.4.2. Plazma transfer ark yöntemi .....	20
2.4.3. Termal sprej (TS) kaplama yöntemi .....	21
2.5. Termal Sprej Yöntemi ile Oksit Esaslı Kaplamalar .....	27

<b>BÖLÜM 3. ....</b>	<b>31</b>
<b>DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>31</b>
3.1. Altlık Hazırlık .....	31
3.1.1. Temizleme.....	31
3.1.2. Kuşlama .....	31
3.2. Kaplama İşlemi .....	34
3.2.1. Kaplama parametreleri .....	35
3.2.2. Seramik kaplamaların özellikleri .....	36
3.2.3. Isıl işlem.....	38
3.2.4. Aşınma testi.....	38
3.2.5. 3 Boyutlu Aşınma izi profilometresi.....	40
3.2.6. Mikrosertlik ölçümü.....	42
3.2.7. Mikroskobik incelemeler .....	43

<b>BÖLÜM 4. ....</b>	<b>53</b>
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>53</b>

<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>55</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>57</b>

## KISALTMALAR

CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
GMAW	: Gazaltı MİG/MAG kaynağı
GTAW	: Gazaltı TİG kaynağı
HVOF	: Yüksek hızda oksijen yakıt sprey
PTA	: Plazma transfer ark
PVD	: Plazma buhar biriktirme
SEM	: Elektron mikroskopu
T0	: Isıl işlem uygulanmamış
T460	: 460 °C 'de ısıl işlem uygulanmış
TS	: Termal sprey

## SİMGELER

$Al_2O_3$  : Alüminyum oksit

CoCr :Kobalt krom

$Cr_2O_3$  : Krom Oksit

HV : Vickers sertlik birimi

TiC : Titanyum karbür

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1 : Geleneksel ve yeni tren uygulama karşılaştırması.....	5
Tablo 2.1 : Ekstrüder vidasının polimerlere göre bölgelerinin geometrik özellikleri..	9
Tablo 2.2 : 8550 Nitrasyon çeliğinin özellikleri .....	12
Tablo 2.3 : 4140 çeliğinin özellikleri .....	13
Tablo 2.4 : Termal spreycaplama prosesinin karşılaştırılması.....	25
Tablo 2.5 : Oksit esaslı seramiklerin mekanik özellikleri.....	30
Tablo 2.6 : Oksit esaslı tozların özellikleri .....	30
Tablo 3.1 : NiCr tabakası kaplama parametreleri .....	35
Tablo 3.2 : Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tabakası kaplama parametreleri.....	35
Tablo 3.3 : NiCr bağ tabakası özellikleri .....	36
Tablo 3.4 : Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tabakası özellikleri .....	37
Tablo 3.5 : Krom oksit esaslı kaplamaların ağırlıkça ve hacimce malzeme kayıpları .....	39
Tablo 3.6 : Mikrosertlik ölçüm sonuçları.....	43



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 : Polimer ekstrüzyon prosesi .....	6
Şekil 2.2 : Vidanın bölmeleri .....	7
Şekil 2.3 : Vida üzerinde basınç grafiği .....	11
Şekil 2.4 : Temsili aşınma bölgesi .....	14
Şekil 2.5 : Vidalarda aşınma türleri .....	16
Şekil 2.6 : Abresiv aşınma örneği .....	16
Şekil 2.7 : Korozif aşınma örneği .....	17
Şekil 2.8 : Adhesiv aşınma örneği .....	17
Şekil 2.9 : Vida üzerinde aşınma yerlerinin gerçek görüntüsü .....	18
Şekil 2.10 : Plazma transfer ark yöntemi temsili gösterimi .....	20
Şekil 2.11 : Termal sprej kaplama yöntemi temsili gösterimi .....	21
Şekil 2.12 : Tel veya çubuk alev sprej temsili gösterimi .....	22
Şekil 2.13 : Toz alev sprej temsili gösterimi .....	22
Şekil 2.14 : HVOF ile WC-Co kaplama.....	26
Şekil 2.15 : Termal sprej yönteminde kullanılan kaplama malzemeleri.....	27
Şekil 2.16 : Termal sprej yöntemi ile oksit esaslı kaplamaların temsili gösterimi....	28
Şekil 3.1 : Toz boyutu ölçüm ve analiz cihazı- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Kumlama kumu .....	32
Şekil 3.2 : Toz tanelerinin boyut analizi .....	33
Şekil 3.3 : Toz tanelerinin sem de 50x 100x ve 250x ve toz tane boyutu görünümü	33
Şekil 3.4 : Alev sprej gaz ünitesi- Alev sprej tabancası .....	34
Şekil 3.5 : NiCr kaplaması sonrası flexicoard ucu yapısı .....	35
Şekil 3.6 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> kaplaması sonrası flexicoard ucu yapısı.....	35
Şekil 3.7 : NiCr bağ tabakası uygulanmış numune .....	37
Şekil 3.8 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tabakası uygulanmış numune.....	37
Şekil 3.9 : Isıl işlem fırını ve uygulaması .....	38
Şekil 3.10 : ASTM G65 aşınma testi temsili şekli ve uygulaması.....	39
Şekil 3.11 : Yapılan kaplamaların aşınma sonrası fotoğrafları .....	39
Şekil 3.12 : Hacimce malzeme kaybı grafiği .....	40
Şekil 3.13 : Isıl işlemsiz 4140 Çeliği 3d aşınma izi grafiği .....	40
Şekil 3.14 : Isıl işlemlili 4140 çeliği 3d aşınma izi grafiği.....	41
Şekil 3.15 : Isıl işlemsiz Krom oksit kaplamasının 3d aşınma izi grafiği.....	41
Şekil 3.16 : Isıl işlemlili Krom oksit kaplamasının 3d aşınma izi grafiği .....	42
Şekil 3.17 : Mikrosertlik ölçüm cihazı .....	42
Şekil 3.18 : Sertlik grafiği .....	43
Şekil 3.19 : Isıl işlemsiz krom oksit kaplaması kaplama kalınlığı ölçümü.....	44
Şekil 3.20 : Isıl işlemlili krom oksit kaplaması kaplama kalınlığı ölçümü .....	45
Şekil 3.21 : Isıl işlemsiz krom oksit kaplaması EDX analizi.....	46
Şekil 3.22 : Isıl işlemlili krom oksit kaplaması EDX analizi .....	47
Şekil 3.23 : Isıl işlemsiz krom oksit kaplaması EDX analizi (Demir oksit oluşumu)	47
Şekil 3.24 : Isıl işlemsiz 4140 çeliği aşınma izi görüntüsü .....	48

Şekil 3.25 : Isıl işlemlili 4140 çeliği aşınma izi görüntüsü .....	48
Şekil 3.26 : Isıl işlemsiz krom oksit kaplamalı numunenin aşınma izi görüntüsü.....	49
Şekil 3.27 : Isıl işlemlili krom oksit kaplamalı numunenin aşınma izi görüntüsü .....	49
Şekil 3.28 : Isıl işlem uygulanmış krom oksit esaslı aşınma numunesi elektron mikroskopu incelemesi .....	50
Şekil 3.29 : 1 nolu bölge: Aşınma izi içi EDX analizinde bağ tabaka elementleri Ni, Cr gözlenmektedir.....	51
Şekil 3.30 : 2 nolu bölge: Aşınma izi uç bölgesi SEM görüntüsü .....	51
Şekil 3.31 : 3 nolu bölge: Krom oksit tabakası üst yüzeyi morfolojisi görüntüsü.....	52



# **EKSTRÜDER VIDALARI İÇİN KROM OKSİT ESASLI FLEKSİKORD ALEV SPREY KAPLAMALARININ ÜRETİMİ VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

## **ÖZET**

Günümüzde hızla gelişen yüzey mühendisliği konuları kapsamında çok çeşitli yüzey işlem, ısıtma işlem ve yüzey kaplama tekniklerinin kullanımı ile metalik esaslı iş parçalarının (ekstrüzyon vidaları gibi) yüzeylerinin korunması, yüzey direncinin ve aşınma direncinin artırılması, hasar görmüş veya aşınmış bir parçanın boyut tolerans sınırlarına ulaştırılması ve tamiri mümkündür. Bu avantaj; parça yenileme maliyetlerinin ve bakım maliyetlerinin azalmasına bunun yanında parça ömrünün ve proses verimliliğinin artmasına neden olmaktadır. Hızla gelişen polimer endüstrisinde kullanılan ekstrüder vidalar prosesin en önemli mekanik elemanlarıdır. Proses sürecinde vida üzerinde zaman içerisinde çok çeşitli nedenlerden (tasarımsal hatalar, yanlış malzeme seçimi, yanlış yüzey/ kaplama/ tamir uygulamaları, anormal çalışma şartları ve farklı kompozisyonlarda hammaddeye dayalı üretim vb.) kaynaklı olarak abrasiv, adhezif ve korozif aşınma nedenli problemler artmakta, bu durum proses verimliliğini ve ürün kalitesini önemli ölçüde düşürmektedir. Üretim yapan bir firmada duruş, bakım, tamir ve yenileme nedenli kayıplar sonucunda ürün kalitesinde ve üretim kapasitesinde azalma oldukça önemli mali kayıplara yol açmaktadır. Bu bağlamda en etkin çözüm uygun kaplama kompozisyonu ile birlikte uygun kaplama yönteminin belirlenmesi ve doğru şekilde uygulanmasıdır.

Ekstrüder vida yüzeylerinin aşınma direncinin artırılması amacı ile çeşitli ısıtma işlem (nitasyon) ve kaplama teknikleri (plazma transfer ark (PTA), sert krom, termal sprey) uygulanmaktadır. Mevcut durumunda PTA teknikleri ile kobalt esaslı karbür takviyeli toz (stellite) türleri kullanılarak uygulanan dolgu sert kaplama tekniklerinde prosesin doğası gereği tozu eritmek ve yüzeyde biriktirmek için harcanan yüksek ısı girdisi nedeni ile altlık malzemenin ve kaplamanın mikroyapısal özelliklerini etkilemekte termal gerilmeler etkisiyle kaplamanın yüzeyden dökülmesine neden olabilmekte ve tane irileşmesi, karbür azalması sonucunda sertlik dalgalanması artmakta ve aşınma direnci zayıflamaktadır. Sert krom kaplamalar ise yeterli sertlik direncini sağlamakta zorlanmaktadır. Bu bağlamda termal sprey kaplama yöntemleri birçok açıdan avantaj ve esneklik göstermektedir. Gerek kaplama kompozisyonu çeşitliliği gerekse kaplama özellikleri aşınma nedenli problemlerde öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada mevcut yüksek hızda oksit yakıt sprey (HVOF) esaslı termal sprey uygulamalara alternatif olarak fleksikord alev sprey tekniği ile Krom oksit esaslı kaplamaların daha ekonomik üretimi, proses optimizasyonu, kaplama mikroyapı karakterizasyonu (ısıtma işlemsiz ve ısıtma işlemlili) ve aşınma performanslarının (ASTM G65) karşılaştırılması olarak incelenmesi hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ekstrüder vidası, Aşınma, Yüzey işlemleri, Alev sprey

# **PRODUCTION AND INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOR OF CHROME OXIDE BASED FLEXICORD FLAME SPRAY COATINGS FOR EXTRUDER SCREWS**

## **SUMMARY**

Today, within the scope of rapidly developing surface engineering issues, using a wide variety of surface treatment, heat treatment and surface coating techniques, protecting the surfaces of metallic-based workpieces (such as extrusion screws), increasing surface resistance and wear resistance, reaching the size tolerance limits of a damaged or worn part, and repair is possible. This advantage; It causes a decrease in parts replacement costs and maintenance costs as well as an increase in part life and process efficiency. Extruder screws used in the rapidly developing polymer industry are the most important mechanical elements of the process. During the process, problems due to abrasive, adhesive and corrosive wear are increasing on the screw over time due to various reasons (design errors, wrong material selection, wrong surface / coating / repair applications, abnormal working conditions and production based on raw materials in different compositions, etc.). The situation significantly reduces process efficiency and product quality. A decrease in product quality and production capacity as a result of losses due to stoppage, maintenance, repair and renewal in a manufacturing company leads to significant financial losses. In this context, the most effective solution is to determine the appropriate coating method with the appropriate coating composition and to apply it correctly.

Various heat treatment (nitration) and coating techniques (plasma transfer arc (PTA), hard chrome, thermal spray) are applied in order to increase the wear resistance of the extruder screw surfaces. In the current situation, in hard coating techniques applied using cobalt based carbide reinforced powder (stellite) types with PTA techniques, it affects the microstructural properties of the substrate and the coating due to the high heat input used to melt the dust and deposit it on the surface due to the nature of the process and may cause the coating to fall off the surface with the effect of thermal stress. and hardness fluctuation increases as a result of grain coarsening, carbide reduction, and wear resistance decreases. Hard chrome coatings have difficulty in providing sufficient hardness resistance. In this context, thermal spray coating methods show advantages and flexibility in many aspects. Both coating composition variety and coating properties come to the fore in problems caused by wear.

In this study, more economical production of chromium oxide based coatings, process optimization, coating microstructure characterization (without heat treatment and heat treatment) and wear performances (ASTM G65), as an alternative to existing high speed oxy fuel spray (HVOF) based thermal spray applications, It is aimed to be examined comparatively.

Keywords: Extruder screw, Wear, Surface Treatments, Flame Spray

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Günümüz teknolojisindeki hızlı ilerlemeler sonucu, kullanılacak malzemelerden beklenen ve istenen özellik ve performanslarda artış olmuştur. Her bir yeni gelişme ve uygulama, çok özel kabiliyeti olan malzemelere ihtiyaç duymaktadır. Malzeme bilim ve mühendisliği bu gelişmelere paralel olarak hızla gelişerek, hem gelişen teknolojinin ihtiyacı olan malzemelerin üretilmesine hem de teknolojik alanda bazı yeni gelişmelere sebep olmaktadır.

Kaplamalar altlık malzemedeki kimyasal kompozisyon, yapı, fiziksel ve mekanik özellikler açısından farklılıklar içerirler. Bundan dolayı yüksek sıcaklık uygulamalarında kaplama ve altlık malzeme arasındaki kimyasal ve mekanik uyum bileşen özelliklerinin servis ömrü boyunca garanti edilebilmesinde en önemli rolü oynayan dizayn kriterlerindedir. Ancak yüksek sıcaklıklarda ve uzun servis sürelerinde yaşanmadan, difüzyondan ve hatta çevresel etkilerden dolayı bir takım değişikliklerin de olabileceği dikkate alınmalıdır. Termal sprey yöntemi, kaplama oluşturmak için önceden hazırlanan esas metale çok ince metalik veya metalik olmayan malzemeleri çökeltme bir grup yöntemi tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Kaplama malzemesi toz, çubuk ya da tel biçiminde olabilir.

Termal sprey kaplama teknikleri arasında elektrik ark sprey, alev sprey, plazma sprey ve yüksek hızlı oksijen yakıt sprey (HVOF) tekniklerini sayabiliriz. Bu teknikler arasında özellikle HVOF ve plazma sprey kaplama teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Termal sprey kaplama uygulamaları 1920'li yıllarda uygulanmaya başlamış ve büyük bir gelişim göstererek günümüze kadar gelmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan malzeme, yüksek sıcaklığa karşı daha fazla dirence sahip başka bir malzeme türü, örneğin seramik (homojen malzeme) kaplanır.

Bu çalışmada alev sprej tekniği kullanılarak üretilmiş  $Cr_2O_3$  kaplamalarında kaplama mikroyapı karakterizasyonu ve aşınma performanslarının (ASTM G65) karşılaştırılması olarak incelenmesi amaçlanmaktadır.

### 1.1. Çalışmanın Gerekçesi

Günümüzde polimer sektörü hızla büyümektedir. Ekstrüzyon prosesinin en önemli elemanı olan ekstrüder vidasında zaman içerisinde meydana gelen aşınmalar sebebiyle proses duruşları meydana gelmekte ve bu duruşlar şirketlere büyük ölçüde üretim ve verimlilik kayıplarına neden olmaktadır. Bu problemin çözümünde CoCr esaslı PTA kaplamalar ve nitrürleme ısıtım işlem uygulamaları ile engellenmeye çalışılmaktadır. PTA uygulamasının vida malzemesine ısıtım girdisinin yüksek olması metalürjik açıdan olumsuz etkilere neden olmaktadır ve ek talaşlı işlem gereksinimi oluşmaktadır. Termal sprej tekniği ile oksit esaslı kaplamaların aşınma direnci, sertliği ve yüksek sıcaklıklarda kararlılığının daha yüksek olması önemli bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu proje önerisi kapsamında yüksek hızda alev sprej yöntemi ile fleksikord formundaki kaplama malzemelerinin farklı katman tasarımları ile yüzeyde biriktirilmesi ile ek işleme gerek kalmaksızın homojen bir kaplama tabakasının eldesi ve aşınma direncinin artırılması mümkün olabilecektir. Yeni nesil bir kaplama uygulaması olan çubuk fleksikord sprej kaplamanın yüzeye daha iyi yapışmasına, daha hızlı püskürtülmesine ve daha iyi ergiyerek homojen bir kaplama kalınlığının eldesine imkan vermekte, plazma sprej yöntemine göre avantajlı bir proses olarak karşımıza çıkmaktadır. Farklı katman tasarımları ile test edilecek numunelerin karşılaştırmalı sonuçlarına bağlı olarak aşınma performansı belirlenecektir. Bu sayede PTA ve plazma spreje göre daha pratik ve ekonomik bir kaplama yöntemi ile vida kaplamaları geliştirilmiş ve birçok polimer ekstrüzyon vidasında ve kovanında kullanılabilir bir uygulama alanı kazandırılmış olacaktır. Proje kapsamında kaplamalardan beklenen temel gereksinimler:

Kaplama sertliği 900 HV'nin üzerinde olacak.

- ✓ ASTM G65 Aşınma testine bağlı aşınma kaybı kuru abrasiv çalışma şartlarında hacimce  $55 \text{ mm}^3$ 'ten az olmalıdır.
- ✓  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  de kısa süreli ve uzun süreli ısıtım işlem şartlarında aşınma kaybı hacimce  $55 \text{ mm}^3$  geçmeyecek.

- ✓ Altlık malzemenin maliyeti azaltılarak yüzeye uygulanacak oksit esaslı kaplama tabakaları ile aşınma dayanımı ömrü artırılabilecektir.
- ✓ Vida aşınması sebebiyle üretim duruşları ve üretim fireleri %20 oranında azaltılabilecektir.

## 1.2. Çalışmanın İçerdiği Yenilik Unsurları

Polimer ekstrüzyonunda geleneksel uygulama olarak vida yüzeylerine nitrasyon ve plazma transfer ark ile CoCr esaslı kaplama uygulamaları gerçekleştirilmektedir. Her iki işlemde de kaplama oluşumu esnasında yüksek ısı girdisi nedeniyle altlık malzemede mikroyapısal değişimler, ana parça üzerinde çarpılma ve sıcak çatlak oluşumu riski söz konusudur. Termal spreycaplamalar (HVOF) ile yapılan uygulamalarda genel olarak karbür esaslı kaplamalar tercih edilmektedir. Kaplama hammaddelerinin pahalı olması yanı sıra kaplama üretimi de firmalar için önemli oranda kaplama maliyetini artırmaktadır. Kaplamasız olarak vidaların ömrünün kısa olması ve tamir bakım masraflarının artması nedeniyle alternatif ekonomik ve pratik kaplama gereksinim doğrultusunda yüksek hızda alev spreycaplaması yöntemi ile fleksikord kaplama formunda oksit esaslı kaplamaların üretimi teknolojik açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Aşağıda yapılan kaplama tasarımları ile kaplama-altlık arayüzey termal genleşme özellikleri dengeli olacak şekilde tek katmanlı ve çok katmanlı kaplama tasarımları gerçekleştirilmiştir. Yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısı nedeniyle vida ömrünün artırılacağı ön görülmektedir. Proje sonucunda elde edilecek bilgi birikimi ile gerçek vidalar üzerinde uygulama potansiyeli oldukça yüksek olup, proje çıktılarında ürüne yönelik faydalı model/ patent haklarının saklanması söz konusu olabilecektir. Firma ile yapılacak işbirliği kapsamında vida üzeri kaplamanın gerçek çalışma şartlarında ömür tayini yapılarak performansı ve fayda maliyet ilişkisi kurulabilecektir.

Tablo 1.1 : Geleneksel ve yeni tren uygulama karşılaştırması

Faktör	Geleneksel Uygulama	Yeni Trend Uygulama
Yöntem	Nitrasyon/ PTA	Krom Oksit esaslı Fleksikord Termal Sprey
Teknolojik	+	+++
Ekonomik	+	+++
Uygulama potansiyeli	+	++
Performans	+	++++
Altlık sınırlaması	Var	Yok
Kaplama çeşitliliği	+	+++
Proses kolaylığı	Donanım gerektirmekte	Pratik
Kontrol kabiliyeti	Zor	Kolay
Ömür	++	++++
Yöntem	Nitrasyon/ PTA	Termal Sprey

### 1.3. Çalışmanın İlgili Olduğu Teknoloji Alanları

Metalik yüzeylerde aşınma problemlerine karşı alternatif yüzey kaplamaların geliştirilmesi kapsamında yüzey teknolojileri, kaplama teknolojileri ve ileri malzeme araştırma teknolojisi kapsamına girmektedir. Aşağıda konuyla ilişkili alt konular tanımlanmaktadır:

- ✓ Polimer ekstrüzyon teknolojisi
- ✓ Ekstrüzyon vidaları
- ✓ Aşınma davranışı
- ✓ Hasar analizi
- ✓ Kaplama teknolojisi
- ✓ Malzeme karakterizasyonu

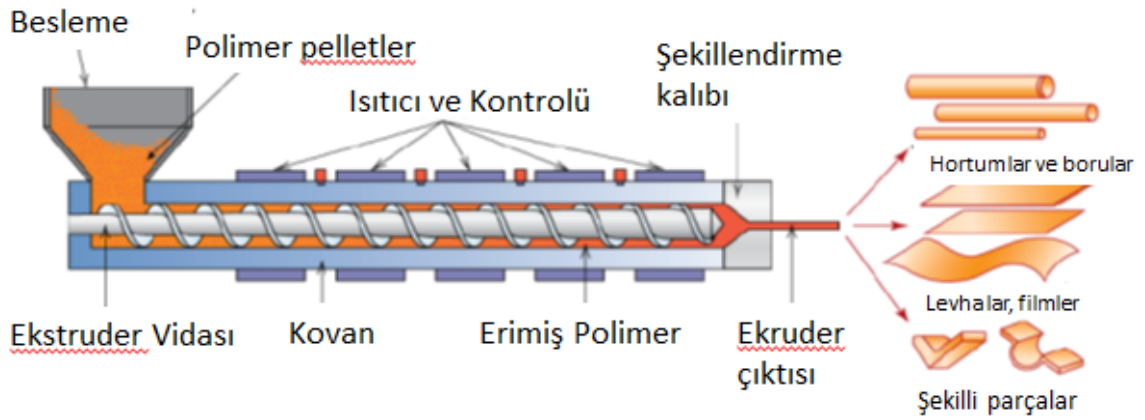


## BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

### 2.1. Polimer Ekstrüzyonu

#### 2.1.1. Polimer ekstrüzyon prosesi

Ekstrüzyon, basınç altında eritilmiş polimerin bir başlıktan akışa zorlanarak şekillendirilmesi işlemidir. Ekstrüzyon işleminin yapıldığı ekstrüder bir sonsuz vidalı konveyördür. Ekstrüzyonda kullanılan ekstrüder aşağıda verilen şekillerdeki gibi temel olarak üç kısımdan oluşur.



Şekil 2.1 : Polimer ekstrüzyon prosesi [18]

- ✓ **Besleme:** Polimerin ekstrudere verildiği besleme bölgesi
- ✓ **Kovan bölgesi:** Burada polimer, kovan çevresine yerleştirilmiş ısıtıcılarla belirli bir profilde kontrollü olarak ısıtılarak eritildiği ve motora bağlı bir sonsuz vida yardımıyla başlığa doğru taşınan bölgedir.
- ✓ **Şekillendirme Kalıbı:** Erimiş polimerin şekillenmesini sağlayan kalıbın bağlandığı başlık bölgesidir.

Polimerlerden, pencere çerçeveleri, hortum, boru, yedek parça, bahçe çardağı, plastik poşet, torba, film levha gibi plastik ürünler ekstrüder yardımı ile üretilmektedir. Ekstruderde, termoplastik granüller, bir ısıtılmış silindir boyunca bir döner vida yardımı ile beslenir. Plastik eridiğinde, sonsuz vida plastiğı sıkıştırır. Ekstrüderin ucuna takılmış kalıp yardımı ile plastik ürün elde edilir. Ekstrüzyon kalıbı terk ederken, soğuk su ihtiva den bir oluk yardımı ile soğutulur [17].

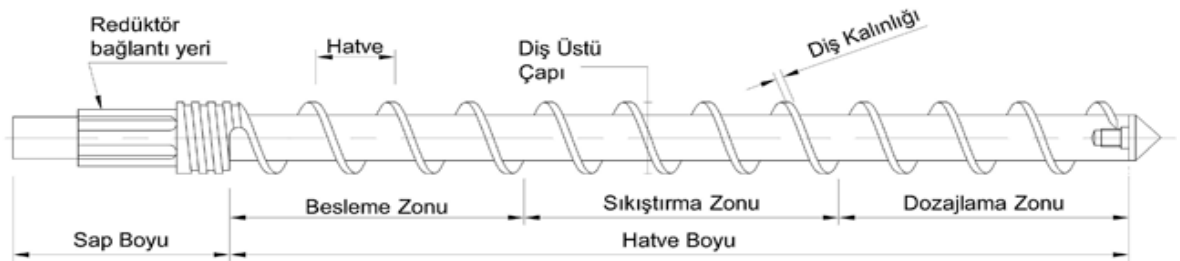
### 2.1.2. Ekstrüzyon vidalarının genel özellikleri

Ekstrüzyon prosesinde yöntem, boş bir silindir (kovan) içinde vidanın belirli devir hızında dönmesi ile ekstrüde edilmesi gereken malzemeyi homojen yapıda ekstrüzyon kalıbına doğru hareket ettirmektir. Ekstrüder Vidasının Görevleri:

- Malzemeyi transfer etmek,
- Plastiğı eritmek,
- Erimiş kompaundu sıkıştırmak,
- Malzemenin homojen şekilde karışmasını sağlamak

Aşağıda (Şekil 2.2) bir ekstrüder vidasının şekli görülmektedir. Ekstrüder vidaları 3 farklı bölgeden oluşmaktadır [16].

- Besleme bölgesi
- Sıkıştırma bölgesi
- Dozajlama bölgesi



Şekil 2.2 : Vidanın bölmeleri [19]

### **2.1.3. Vida boyunca bölmeler**

#### **2.1.3.1. Besleme bölgesi**

Besleme hunisinden gelen granül hammaddeler alınır ve kovan boyunca, sıkıştırma bölgesine doğru pompalanır. Aynı zamanda ısıtma işlemi de başlamış bulunur. Besleme bölgesindeki vidaya ait diş derinlikleri sabit boyutta olup bu bölgenin prodesteki görevi ileri doğru uygun miktarda beslemeyi yapmaktır. Burada karşılaşılabilecek sorunlardan birisi; granüllerin vidaya yapışarak vida ile beraber dönerek silindir boyunca ilerlemeyi durdurmaktadır. İşlem esnasında; vidanın soğutulması ve bunun sonucunda vidaya oranla silindirin daha yüksek sıcaklığa sahip olması bu problemi önlemektedir [17].

#### **2.1.3.2. Sıkıştırma bölgesi**

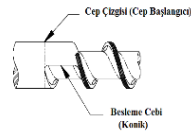
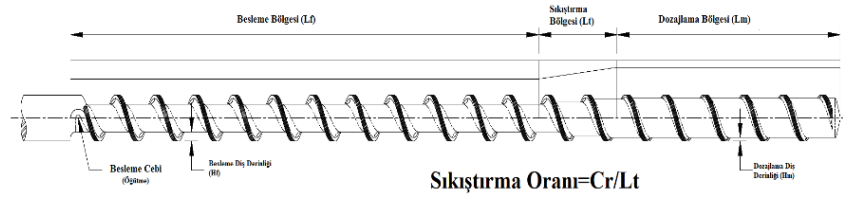
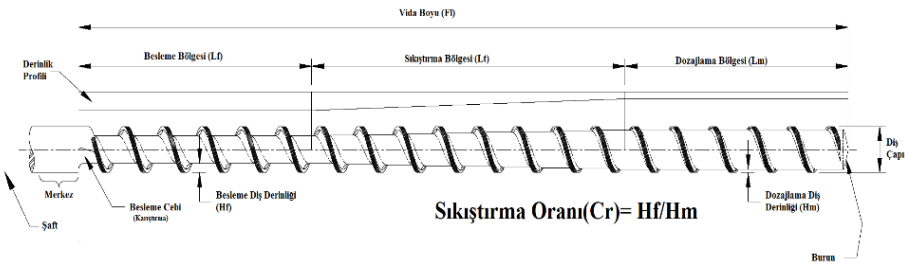
Sıkışma bölgesinde diş dibi derinliği gitgide azalır. Böylece plastic malzemenin sıkışması ve oluşan basınç artarak, plastiğin eriyerek homojen bir şekilde karışması sağlanır. Sıkıştırma esnasında meydana gelen hava ve nem, gaz alma bölümü bulunan ekstrüderlerde gaz alma ünitesi sayesinde tahliye olur, gaz alma bölümü bulunmayan makinelerde meydana gelen gaz, hareketin tersi yönüne doğru giderek huniden dışarıya çıkar. Bu bölgenin diğer bir özelliği de, sıkıştırma oranıdır. Bu oran, besleme bölgesi hacimsel büyüklüğünün, ölçme bölgesi hacimsel büyüklüğüne oranıdır [17].

#### **2.1.3.3. Dozajlama bölgesi**

Dozajlama bölgesinde homojenleşmiş plastik ileri doğru sıkıştırılır. Bu bölgedeki diş dibi derinlikleri sabittir. Bu bölgede, plastik malzeme sabit hızlarda mümkün olduğunca yüksek basınçla kalıp ağzına doğru pompalanır. Vidanın bölge uzunlukları, işlenecek plastik malzemenin cinsine bağlıdır. Plastik malzemenin türüne göre, vida geometrilerinde değişiklikler göz önünde bulundurulmalıdır. Ürünün kalitesini arttırmak için ekstrüder vidaları üzerine standart bölgeler dışında ilave olarak farklı bölgelerde eklenir. Örneğin ölçme bölgesinin veya başlık bölgesinin önüne mikser ilavesi yerleştirilerek ergiyik homojenliği artırılabilir [17].

Tablo 2.1 : Ekstrüder vidasının polimerlere göre bölgelerinin geometrik özellikleri

Plastik	Sıkıştırma Bölgesi Boyu	Sıkıştırma Oranı	Dozajlama Derinliği
ABS	Uzun	Düşük	Derin
AKRİLİK	Uzun	Düşük	Derin
HDPE	Orta	Orta	Sığ
LDPE	Orta	Orta	Orta
NAYLON	Kısa	Yüksek	Sığ
PC	Orta	Düşük	Derin
PEI	Orta	Orta	Orta
PP	Orta	Orta	Sığ
PS	Orta	Düşük	Orta
PVC	Orta	Düşük	Orta



**Sıkıştırma Bölgesi Boyu**

- 1) Kısa: Dört tur veya daha az
- 2) Orta: Beş veya yedi tur

**Sıkıştırma Oranı**

- 1) Düşük: 1 / 2,5 veya daha az
- 2) Orta: 1 / 2,5 – 1 / 3,5 arası

**Dozajlama Derinliği :**

- 1) Örnek: Orta Seviye İçin  
Ø 50 mm ve Orta Derinlikteki bir vidadaki dış dibi derinliği 2,5–3,2 mm aralığındadır.

#### 2.1.4. Sonsuz vida uzunlukları

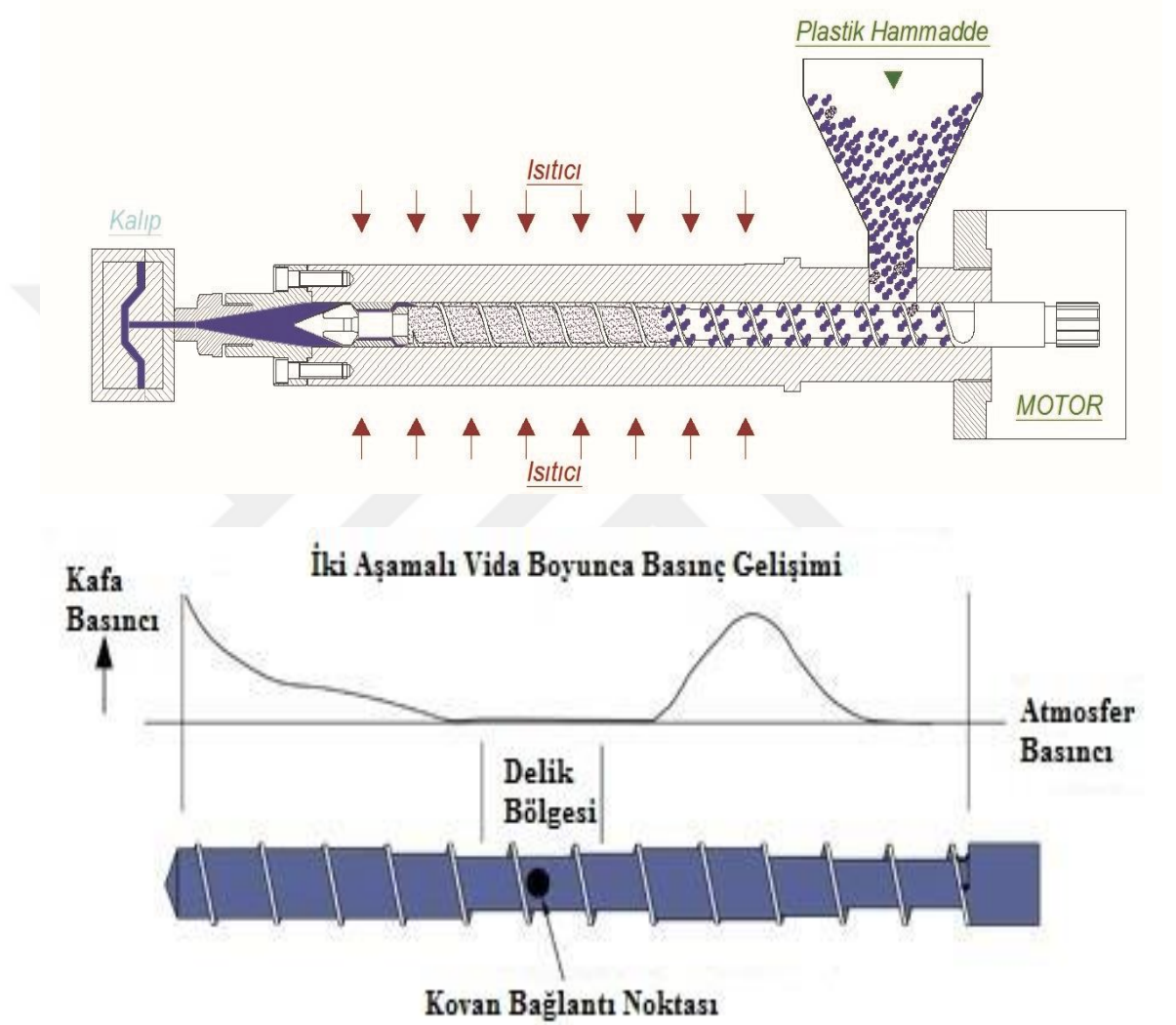
Sonsuz vidadaki besleme, sıkıştırma ve dozajlama bölgesi uzunlukları; işlenecek malzemeye bağlı olarak değişmektedir. Termoplastik malzemeler, mekanik ve termik özelliklerinden dolayı birbirlerinden oldukça farklıdırlar. Bu sebeple, belirli kalıp-malzeme çifti için en iyi netice veren belirli özellikte vida vardır. Ayrıca, aynı tür malzeme Ekstrüzyon mili içinde farklı özelliklere sahip (katı, yumuşak, erimiş) hallerde bulunmaktadır. Bu özellikleri en iyi şekilde karşılamak için vidanın konstrüksiyonu değişik yapılmaktadır. Burada vidanın dönüşü ile malzeme, sıkıştırma bölgesinin dışına çıkmış olur. Bu tip vidada sıkıştırma bölgesi kısadır. PVC gibi değişik sürtünme özelliği göstermiş ve Ekstrüzyon işlemi zor olan malzemelerin ekstrüzyonunda eritme işlemi için bütün vida boyunca uzanan sıkıştırma bölgesi tertip edilmiştir. Küçük ekstrüder vidaları ise nitrasyon çeliğinden yapılır. Kovanlar, aşınmaya ve korozyona dayanıklı çelikten imal edilir [16].

#### 2.1.5. Vidanın teknik bilgileri

Ekstrüder vidası: Ekstrüder vidanın çapı  $D$ , silindirin kovan uzunluğu ise  $L$  olarak alınırsa, söz konusu vidanın helis açısı, şekli ve hatvesi makinanın çalışmasını etkilemektedir. Vidanın boy/çap oranı; malzeme üretim kapasitesi ve işlenecek plastik malzeme çeşidine göre seçilmelidir. Termoplastikler için;  $L/D$  oranı genellikle 20/1–24/1 olan ekstrüder vidaları kullanılır. Plastiklere katkı maddesi ilave edilirse boyu uzun olan vidalar tercih edilir Ayrıca, “ $(L/D)$  Oranının önemi:

- ✓  $L / D$  oranı çoğunlukla 10 ila 30 arasında olmaktadır: Termoplastik malzemeler için yüksek, elastomer malzemeler için düşük değerler ele alınır.
- ✓  $L / D > 24$  olan vidalar boy uzunluğundan dolayı çok üst kalitede eriyik eldesi sağlarlar.
- ✓ Katkı maddeli plastik karışımlarının işlenebilmesi için;  $L / D > 30$  oranları tercih edilmektedir.
- ✓ Kauçukların ekstrüzyonunda;  $L / D > 20$  Oranı yeterlidir. Basma oranı = (“Besleme dış derinliği / taşıma dış derinliği”) olarak tanımlanır.

Bu oran çoğunlukla; 1 : 2, 1 : 4 veya 1 : 3, 1 : 2 olması gerekir. Eğer büyük çaptaki vidalarda “besleme diş derinliği” derin olmaz ve “uzunluğu” da yeterli olmazsa, düşük viskoziteye sahip plastikler için çıkış bölümünde yeterli basınç meydana gelmez. Eğer “taşıma kanalı” sığ olursa, yüksek viskoziteye sahip plastiklerde haddinden fazla ısınma olur.



Şekil 2.3 : Vida üzerinde basınç grafiği [20]

## 2.2. Ekstrüder Vidalarda Kullanılan Alaşımalar

### 2.2.1. 8550 nitrasyon çeliği

Tablo 2.2 : 8550 Nitrasyon çeliğinin özellikleri

<b>Standartları</b>					
AISI / SAE	DIN	EN	AFNOR	JIS	
8550	1.2891	34CrAlNi7	-	-	
<b>Kimyasal Kompozisyon</b>					
C	Mn	Al	Cr	Mo	Ni
0,30–0,37	0,40–0,70	0,80–1,20	1,50–1,80	0,15–0,25	0,85–1,15
<b>Mekanik Özellikleri</b>					
(Sertleştirilmiş temperlenmiş) Ölçü Ø mm	Akma Noktası N/mm <sup>2</sup>	Çekme Mukavemeti N/mm <sup>2</sup>	Minimum Yüzde Uzama	Çentikli darbe dayanımı Joule / min	Nitrasyondan sonraki yüzey sertliği HV
D=(16–40)	680	900–1100	10	30	900–1000
D=(40–100)	650	850–1050	12	30	900–1000
D=(100–160)	600	800–1000	13	35	900–1000
D=(160–250)	600	800–1000	13	35	900–1000
<b>Isıl İşlemleri</b>					
Yumuşatma Tavlaması			650–700 °C		
Sertleştirme			870–930 °C		
Soğutma Ortamı			Vakum, yağ, su, akışkan yatak		
Temperleme			580–700 °C		
Nitrasyon			480–570 °C		

En yaygın alüminyum alaşımlı nitrasyon çeliğidir. Nitrasyon kabiliyeti içerdiği alüminyumdan dolayı çok yüksektir. Çoğu zaman plastik enjeksiyon makinalarının vida ve kovan parçalarında, enjeksiyon millerinde, dişlilerde ve makine parçalarında kullanılıyor.

### 2.2.2. 4140 ıslah çeliği

Tablo 2.3 : 4140 çeliğinin özellikleri

<b>Standartları</b>							
AISI / SAE		DIN	EN	AFNOR	JIS		
4140		1.7225	42CrMo4	42 CD 4	SCM 440 (H)		
<b>Kimyasal Kompozisyon</b>							
C	Si	Mn	P <sub>max</sub>	S <sub>max</sub>	Cr	Mo	V
0,38–0,45	0,15–0,40	0,50–0,80	0,035	0,035	0,90–1,20	0,15–0,30	-
<b>Mekanik Özellikleri</b>							
Yumuşak tavlama sertlik > BSD 30		Suda sertleştirme sertliği HRC (820-850°C)		Yağda sertleştirme sertliği HRC (830-860°C)			
241		54–56		54–56			
<b>Isıl İşlemleri</b>							
Sıcak şekil verme sıcaklığı				1050–850 °C			
Yumuşak Tavlama Sıcaklığı				680–720 °C			
Normal tavlama sıcaklığı				680–720 °C			
Meneviş sıcaklığı				540–680 °C			

Kimyasal bileşenleri karbon miktarı açısından sertleştirilmeye elveriş sağlayan, ıslah işlemi sonucunda belirli yük altında yüksek seviyede tokluk özelliği gösteren, yüksek alaşımlı yapısal çeliklerdir. İndüksiyon edilebilirliği güzeldir. Otomobil, uçak imalatında, aks mili ve kovanı, krank mili, yivli mil vb. sünekliliği yüksek ürünler, dişli ve çark imalatında kullanılır.

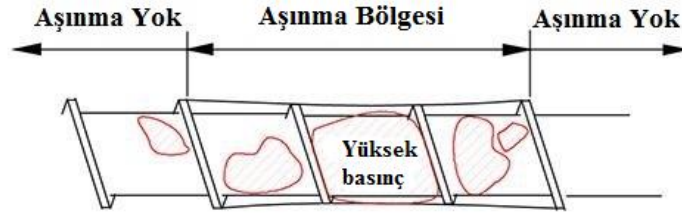
Vida altlık malzemesi olarak bize en iyi performans gösteren malzeme 8550 Nitrasyon çeliği uygun görülmüştür. Fakat 4140 Islah çeliği de bu özelliklere yakın değerler verebileceği için ve en önemlisi maliyet bakımından daha uygun olması sebebiyle bu çeliği de 8550'ye alternatif olarak kaplama işlemi ve sonrasında karakterizasyonunu inceleyip aynı performansı yakalamayı hedeflemekteyiz.



### 2.3. Ekstrüzyon Vidalarında Aşınma Nedenli Problemler

Ekstrüzyon prosesinde vidanın boy ve çap oranına bağlı olarak, rotasyon hızı, polimer türü ve viskozitesi, sıkıştırma basıncı, kalıp sıcaklığı, polimer içerisindeki sert dolgu oranı ekstrüzyon vidasının kullanım ömrünü belirlemektedir. Yüksek hızlarda çalışan ekstrüzyon vidalarında hızın artışı ile birlikte sıcaklık artışı nedeniyle polimer üretim verimliliği de artmaktadır. Buna karşın vidanın kontrolsüz bir şekilde aşınmaya maruz kaldığı ve kullanım ömrünün kısaldığı bilinmektedir. Çalışma şartlarının kontrol altında tutulması kadar prosese ve malzemeye uygun tasarımda vida geliştirilmesi ve aynı zamanda vidanın yüzey direncinin artırılması ancak sert yüzey kaplama teknikleri ile sağlanabilmektedir. Aşağıda ekstrüzyon vidalarında aşınma bölgeleri ve aşınma mekanizmaları tanımlanmaktadır.

#### 2.3.1. Ekstrüzyon vidalarında aşınma



Şekil 2.4 : Temsili aşınma bölgesi [21]

Guagliano (2005), çift vidalı plastik ekstrüder millerinin yorulma hatalarını gözlemlediği çalışmada, hataların genellikle milin sonunda meydana geldiğini tespit etmiştir. Mevcut dizaynlarda dişlilerden mile nakledilen torkun büyük kısmının şaft ucundan mile transfer edilmesi beklenmektedir.

Bunun anlamı bu bölgede temas baskısının çok yüksek olduğudur. Oluşan gerilme yığılmasına çentik etkisine ilave edildiğinde, bu durumun hata başlangıcını tetikleyici rol oynaması kaçınılmazdır. Bölgede gözlenen izler, hatanın bir yorulma hatası olduğunu kanıtlamaktadır. Hatanın ilerleyişinin mil eksenine 45° lik açıyla olduğu gözlemlendiğinde ise bu hatanın bir burulma yorulması olayı olduğu ve bu eğilmenin mil için uygun bir yükleme türü olmadığı anlaşılmaktadır. Bir başka gözlemde çatlak başlangıcının, montajı daha kolay yapabilmek için pozisyonu değiştirilen vidalı milin köklerinden başladığı tespit edilmiştir. Araştırmacı bu olumsuz durumların ortadan kaldırılması için bazı

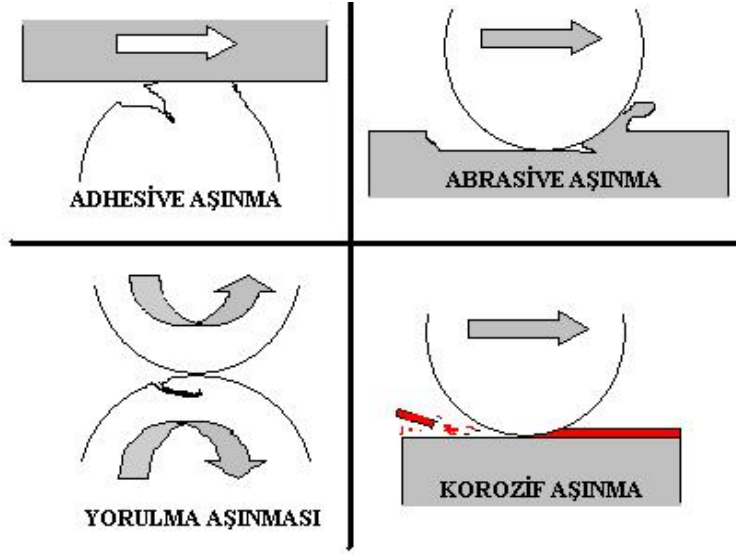
tasarım değişiklikleri önermektedir. Araştırmacıya göre milin baş tarafının tasarımı, çentik etkisini azaltacak şekilde mutlaka yeniden yapılmalıdır.

Yorulma çentik etkisi, şaft ve mil arasındaki temas durumunun daha uniform hale getirilmesiyle de azaltılabilir. Bunun anlamı, temas uzunluğu boyunca birleştirme elemanlarının rijitliğinin uniform olmasıdır. Bu durumun dışın aksenel yönde çeşitli genişliklerde ve şaftın yine aksenel yönde çeşitli kalınlıklarda kullanılması ile sağlanabileceği belirtilmektedir. Mil, özellikle şaft temas noktasının başlarında daha ince ve orta bölgelerde kalın olmalıdır. İkinci öneri gelişmeye ve yayılmaya daha açık bir yapıdadır. Araştırmacı, montaj işlemi sırasında yapılacak uygun yağlamanın da yorulma hatası başlangıcına yol açan dışlardaki yüzey bozulmalarını önleyebileceğini belirtmektedir [2].

Heinze (1998) çalışmasında, Plazma Buhar Biriktirme (PVD) ve Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) yöntemleriyle çelik vida malzemesi yüzeylerine yapılacak TiC veya CrN gibi kaplamaları, vidaların aşınmaya karşı dirençlerini arttırdıkları gerekçesiyle önermektedir. Ekstrüder maliyetini arttırsa da ısıt işlemler bazı zamanlarda çentik faktörünün ortadan kaldırılmasını sağlarlar. Yorulma dayanımını arttıracak en etkili tavsiye ise bilye püskürtme gibi yüzey sertleştirme işlemleridir. Malzemenin yüzey sertliğini artırmak için yapılan diğer yüzey sertleştirme işlemleri de uzun yıllardır uygulanmaktadır [15].

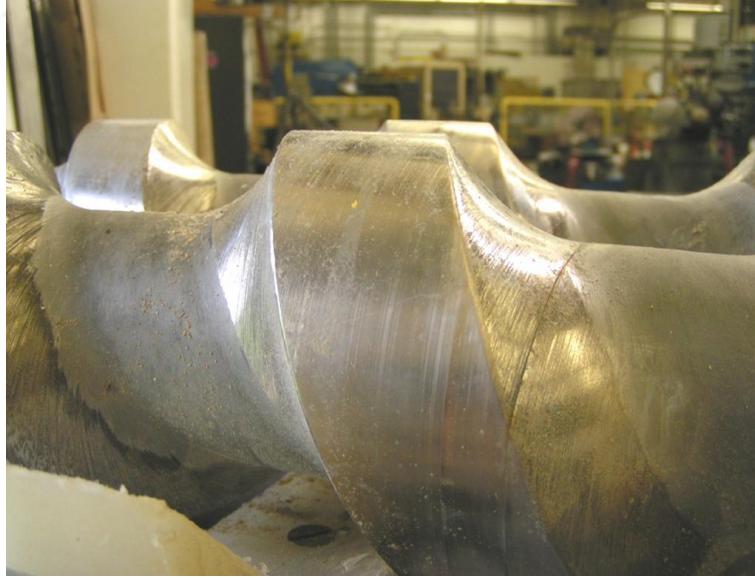
### **2.3.2. Vidalarda karşılaşılan aşınma türleri**

Aşınma olayı çok farklı şekillerde sınıflandırılabilir. “Mekanizmalarına göre sınıflandırma” başlığı altındaki başlıca aşınma türleri, aşağıdaki (Şekil 2.1) şekilde özetlenebilir;



Şekil 2.5 : Vidalarda aşınma türleri [22]

İki yüzey arasındaki temas arayüzeyi eğimli veya eğri temasa sahipse, burada aşınma sözcüğüne kayma içerisinde meydana gelir. Abrasiv aşınma, şekilde görüldüğü üzere sert partiküllerin veya sert çıkıntılarının katı yüzeyde hareket etmesinden ve karşı koyması sebebiyle oluşur. Bu aşınma tipi, abrasiv aşınma olarak adlandırılır. Vidalarda bu tür aşınmalar fazlasıyla görülmektedir [6].



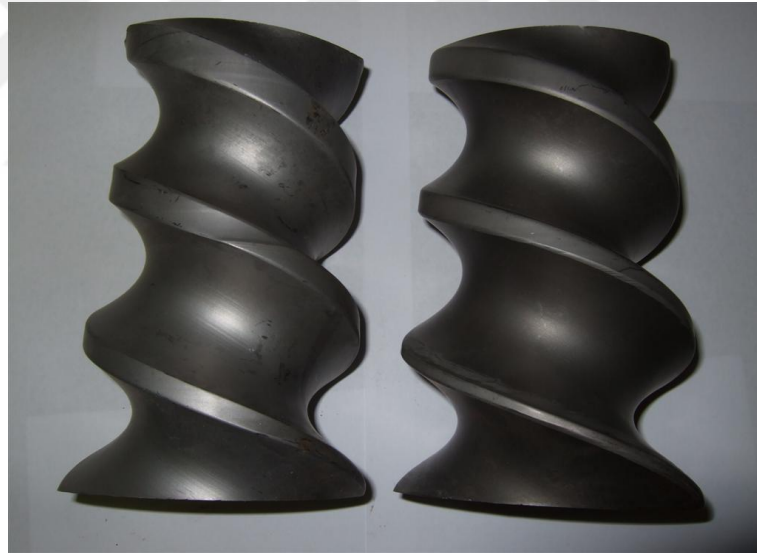
Şekil 2.6 : Abrasiv aşınma örneği [23]

Aşınmış yüzeyler aynı süreçte korozif etkilere de maruz kalırsa bu duruma korozif aşınma denmektedir. Kimyasal korozyon, kendi başına oluşabileceği gibi diğer aşınma çeşitleriyle birlikte de oluşabilmektedir. Yüzeye sıkıca yapışmış filmler oluşturan kimyasal reaksiyonlar yüzeyin aşınmasını önler. Çünkü sürtünmeye maruz kaldığı

hareket esnasında filmler çatlar ve yüzeyden kopar. Vidalarda bu tarz aşınmalar fazlaca görülmektedir.



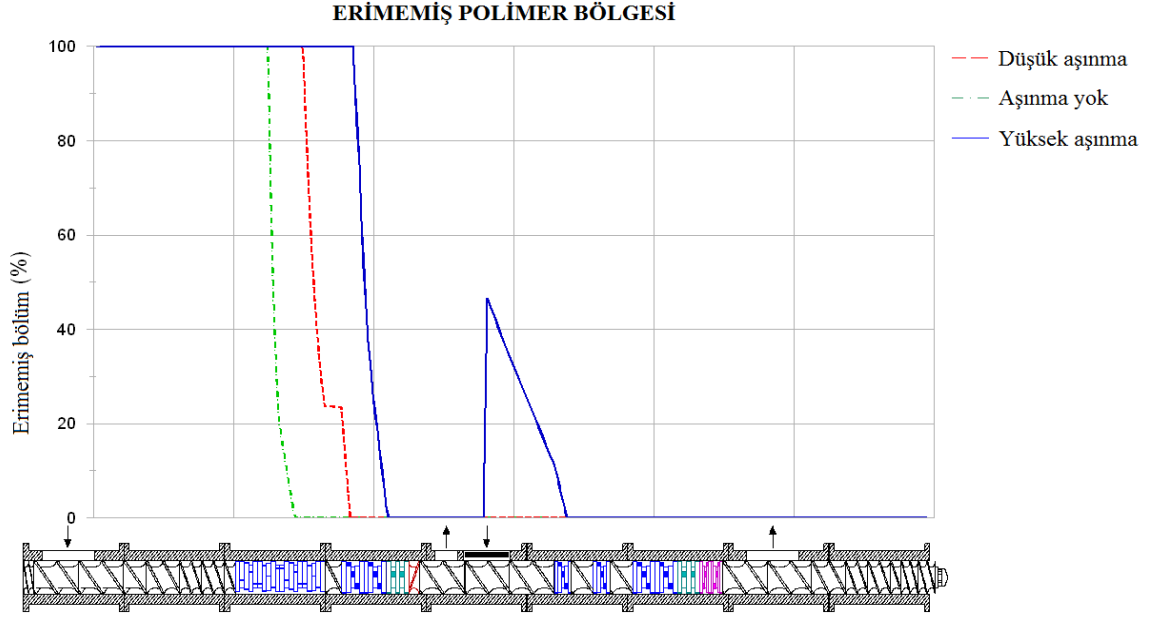
Şekil 2.7 : Korozif aşınma örneği [23]



Şekil 2.8 : Adhesiv aşınma örneği [23]

Plastik temas altında bulunan iki yüzeye ait temas arayüzeyinde nispeten kayma direnci özelliği için yeteri derecede yapışkan güce sahip olmasıyla, geniş plastik deformasyonun sıkıştırma ve kırma gücü altında temas bölgesinde ortaya çıkmak koşuluyla aşınma oluşmaktadır. Dolayısıyla temas bölgelerindeki geniş deformasyon, bir çatlak oluşumunun başlamasına ve gerilme etkisi ile kırmanın bileşik çatlama şeklinde üretilmesine sebep olmaktadır. Temas arayüzeyindeki çatlak uzandığı da, aşınan parça, ergiyik transferinin tamamlanmasıyla şekil almaktadır. Temas arayüzeyinde yeteri kadar

yapışma oluştuğunda ortaya çıkan bu tip aşınma, adhesiv aşınma türü olarak adlandırılmaktadır. Vidalarda bu tür aşınmalar fazlasıyla görülmektedir [6].



Şekil 2.9 : Vida üzerinde aşınma yerlerinin gerçek görüntüsü [23]

## 2.4. Aşınma Önleyici Yüzey İşlemler ve Isıl İşlemler

### 2.4.1. Nitrüleme işlemi

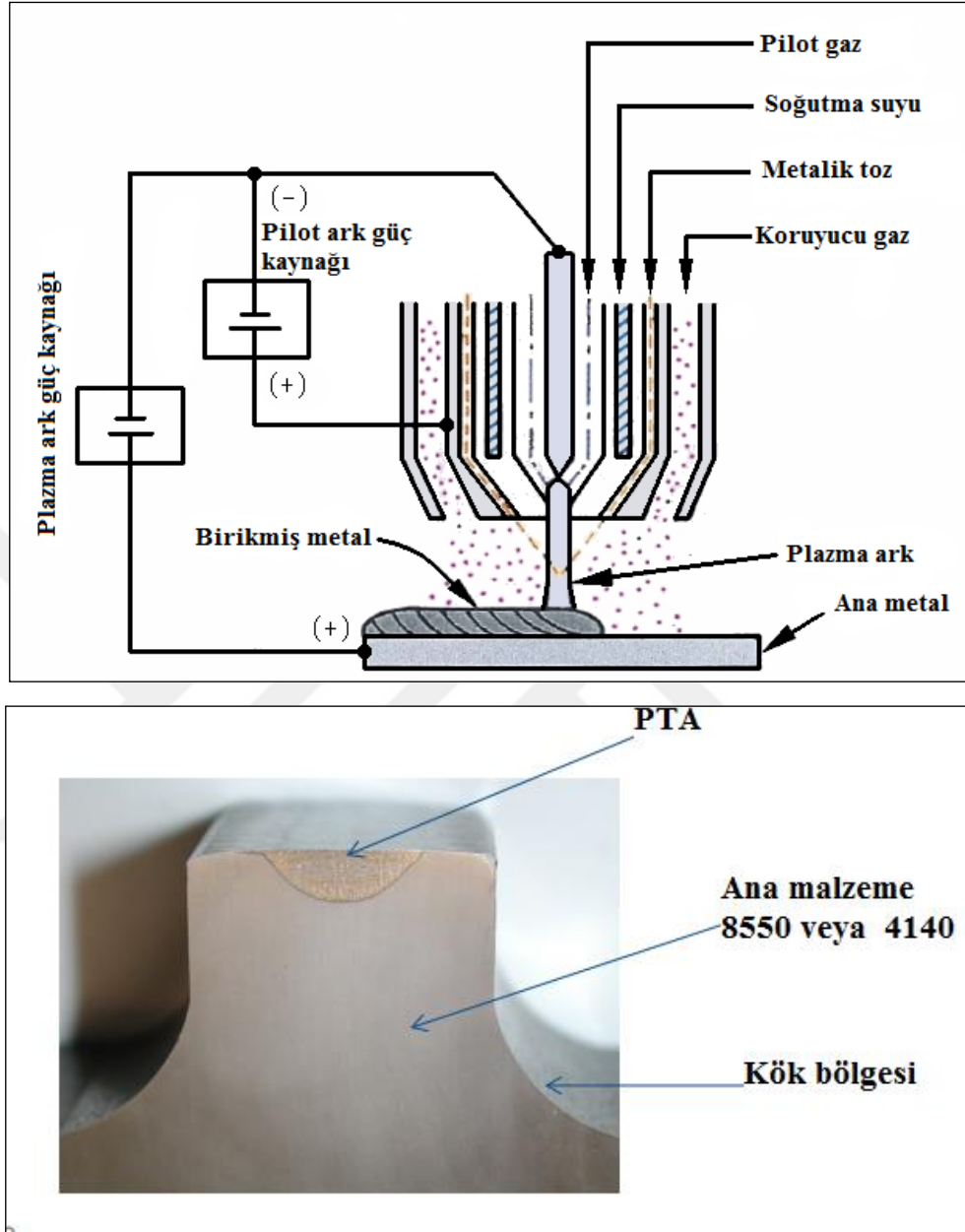
Nitrüleme işlemi 500-570°C gibi alçak sıcaklıklarda uygulanmaktadır. Belirtilen sıcaklıklarda karbonlu çelikler ferritik yapıdadır . Nitrüleme uygulaması Al, Cr, Mo, Ti ve V gibi nitrür yapıcı elementleri içeren çeliklere uygulanmaktadır. Nitrüleme işleminde, çelik yüzeyindeki atomik azot çeliğin derinliklerine doğru yayılır ve çoğunlukla 5–15 nm boyutunda ince nitrür çökeltileri biriktirmek için reaksiyona girer. Demir içerisinde kısmen çözünen azot, %6 orana kadar olan bileşimlerde ferrit ile katı çözelti meydana getirmekte ve %6 oranında olan azot bileşiminde  $Fe^4N$  kristal yapıya sahip  $\gamma'$  fazı meydana getirmektedir. %8 oranından daha fazla azot içeriğinde ise denge reaksiyon ürünü olan  $Fe^3N$  kristal yapıları  $\epsilon$  fazı meydana gelmektedir. Nitrürlenmiş yüzeyler katmanlı bir yapıya sahip olup en dışta bulunan yüzey beyaz tabaka diye isimlendirilen  $\gamma'$  fazından meydana gelmektedir. Böyle bir yüzey tabakası çok sert ve gevrek olup kullanım esnasında pullanma şeklinde aşınmalara sebebiyet verdiği için

istenmemektedir. Özel nitürleme yöntemleri kullanılarak istenmeyen bu tabaka azaltılabilmekte veya daha az gevrek hale getirilebilmektedir.. Daha sonraki bölge Fe<sup>3</sup>N kristal yapılı ε fazının meydana gelmesi ile sertleşmiş olan difüzyon bölgesidir. Düşük karbonlu çeliklerde, nitürasyon işlemi sonrası önemli yapı değişimleri meydana gelmesine rağmen, difüzyon tabakası oldukça sertlik meydana gelmez. Fakat, azotlu ostenit bölgesinden su verme yöntemi ile azotlu martenzit meydana gelmesi sonucunda bölgede yüksek yüzey sertliği elde edilmektedir. Nitürleme prosesi sıklıkla yüksek aşınma dirençlerinin elde edilebildiği orta karbonlu ve alaşımlı çeliklere uygulanmaktadır. Ekstrüzyon vidalarında nitürleme uygulaması geleneksel bir yöntemdir. Çelik parçalar nitürasyon işlemi uygulanmadan önce bazı ön hazırlıklar gereklidir. Bunlar;

- ✓ Parça güzelce temizlendikten sonra parçaya ıslah işlemi uygulanmalıdır (su vermeyi izleyen yüksek sıcaklıkta temperleme). Fakat, ıslah işlemi esnasında nitürleme sıcaklığının, temperleme sıcaklığının altında seçilmesine özen gösterilmelidir. Çünkü temperleme işlemi sıcaklığı, nitürleme işleminin yapıldığı sıcaklıktaki yapısal dengeyi garantiye almak için yeterince yüksek seçilmelidir.
- ✓ Taşlama dâhil tüm mekanik işlemler uygulanmalı, iş parçası olması gereken yüzey düzgünlüğüne ve boyutlarına işlenmelidir.
- ✓ Nitürleme işleminin istenmediği kısımlar ince kalay filmi ile kaplanmalıdır. Nitürleme işleminin yapıldığı sıcaklıkta kalay ergimektedir. Fakat parçanın yüzey gerilimi ile yüzeye tutunarak kalır ve bu şekilde azotun difüzyonunu engellemiş olur.
- ✓ Seçilmiş nitürleme işlemine uygun, gerekli kalınlıkta yüzeyde sert tabaka oluşturacak zamanda nitürasyon uygulaması yapılmalıdır.

Genelde, çelikleri nitürlemek için gaz, sıvı ve plazma nitürleme şeklinde üç ayrı yöntem belirtilmişken bazen de gaz ve plazma şeklinde iki değişik nitürleme işleminden söz edilmektedir. Hassas proses kontrolü ve ek işlemler gerektirmektedir.

## 2.4.2. Plazma transfer ark yöntemi



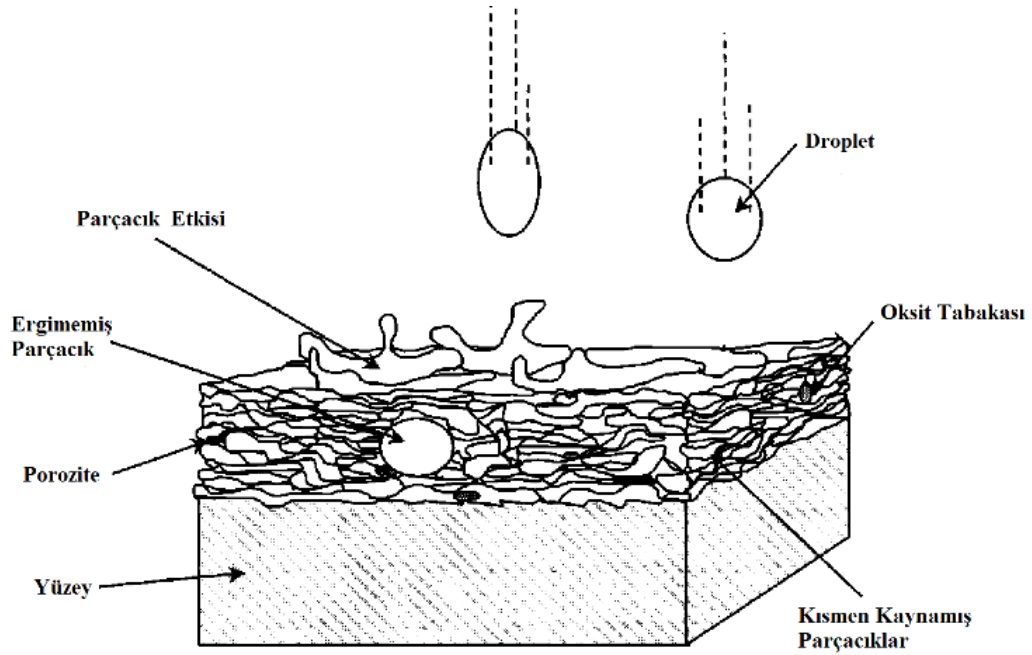
Şekil 2.10 : Plazma transfer ark yöntemi temsili gösterimi [24]

Plazma transfer ark yöntemi (PTA); elektronik, uzay, havacılık, nükleer ve gemi yapımı endüstrileri gibi bir çok üretim endüstrisinde sıkça kullanılmakta olan yöntemidir. PTA, kaplamalar ve yüzey mühendisliği sektöründe aşınma direnci amaçlı uygulamalarda kullanılan bir yöntemdir. Yüksek sıcaklıkta malzeme yüzeyinde esas metalden kompozisyonca farklı kaplama tabakaları elde edilebilmektedir. PTA yöntemi prosesinde iki bağımsız ark'ın (pilot ark ve ana plazma arkı) mevcut olması, yüksek seviyede üretilebilirlik, ana metal ile derin nüfuziyet, enerjiyi tek bir noktada toplayabilmesi, ileri

seviyedeki ark kararlılığı, içerdiği ısı miktarı ve kaynak/kaplama hızının yüksek oluşu özellikleri ile SMAW, GMAW ve GTAW gibi, diğer yüzey işlemleri ve kaynaklı dolgu kaplama işlemlerinden daha üstün özelliklere sahip olduğu görülmektedir. PTA metodunun diğer kaplama metodlarına kıyasla çok daha iyi alternatif olması, bu konuda bir çok çalışma yapılmasına sebep olduğu ifade edilebilmektedir. Bu yöntemde, metal tozlarının metal yüzeyine alaşımlandırılması, öncelikle tungsten bazlı elektrot ile nozul arasındaki pilot arkın oluşması ve sonrasında PTA uygulanacak parça ve elektrot arasındaki meydana gelen gerçek/ana plazma arkı sayesinde gerçekleşmektedir. Ortaya çıkan ark ile, altlık malzeme ve PTA uygulanmış tabaka arasında oluşan birleşme metalurji bir birleşmedir. Malzeme içerisinde yüksek kaynak hızı sebebiyle geomeride oluşacak çarpılmalar küçük boyutlu olmaktadır. Bu durum da PTA prosesinin en çok öne çıkan avantajlarından bir tanesi olarak görülmektedir [1].

#### 2.4.3. Termal sprey (TS) kaplama yöntemi

Termal sprey; seramik, metalik olmayan veya metalik kaplamalar üretmek için, termal bir üreteç tarafından elde edilen ısı aracılığıyla, yarı ergimiş veya ergimiş parçacıkların spreyleme metoduyla mekanik bağlanma oluşması ile altlık malzeme üzerinde biriktirilmesidir [1].

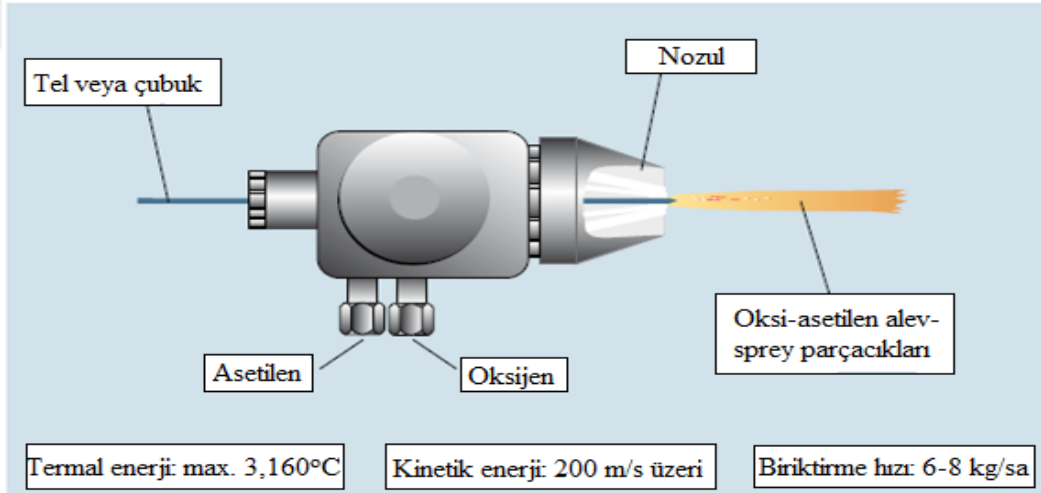


Şekil 2.11 : Termal sprey kaplama yöntemi temsili gösterimi [25]

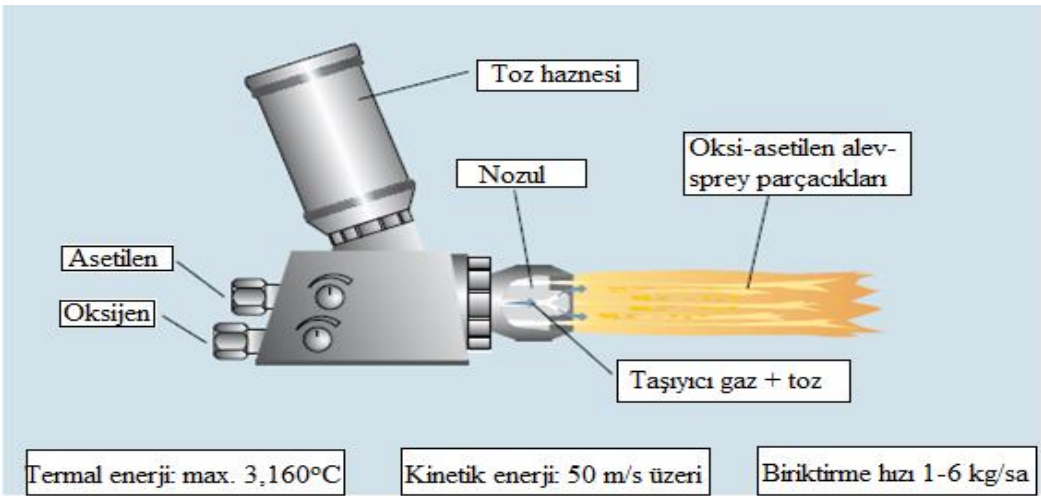


### 2.4.3.1. Alev sprey

Alev sprey yöntemi ile yapılan termal sprey kaplama tekniği, Max Ulrich Schoop tarafından patentlenmiştir. Alev sprey yöntemi tarihte bilinen termal sprey yöntemlerinin en eskisidir. Alev sprey metodunun, “toz alev sprey” ve “tel alev sprey” olmak üzere farklı uygulama yöntemleri mevcuttur. İlk çalışmalarda kalay (Sn) ve kurşun (Pb) telleri asetilen gazı ve oksijen ile alevi ile ergitilerek kaplama yapılırken; ilerleyen süreçlerde toz kullanılmaya başlanmıştır. Alev sprey prosesinde asetilen gazı, propan gazı veya hidrojen gazı, oksijen ile yakılarak yüksek hızda alev elde edilir. Bu sistem alçak basınçlı oksijen yakıt kaplama prosesidir. Şekil 2.12’de tel alev sprey kaplama yöntemi, Şekil 2.13’te toz alev sprey kaplama yöntemi görsel olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.12 : Tel veya çubuk alev sprey temsili gösterimi [26]



Şekil 2.13 : Toz alev sprey temsili gösterimi [27]

Şekil 2.13'te görüldüğü gibi oksijen ve yakıt gazı karışımı yakılarak ve taşıyıcı gaz yardımıyla tozu aleve taşıyarak toz eriyik veya yarı eriyik forma getirilir. Gaz basınçlarının da etkisiyle hızlandırılan partiküller altlık üzerine kaplanır. Burada kısıtlayıcı faktör gazların alev sıcaklığıdır. Kaplama malzemesinin cinsine göre yakıt gazı seçilmelidir. Örneğin oksijen-asetilenin alev sıcaklığı 3100 °C iken oksijen-hidrojen yakıtın 2700°C'dir. Termal sprey kaplamada amaç toz veya teli eriyik veya yarı eriyik forma getirmek olduğu için alev sıcaklığının yetersiz kaldığı durumlarda bu yöntem kullanılamamaktadır. Alev püskürtme metodunun düşük yatırım maliyeti, dolgu oranının yüksek olması ve bakım maliyetlerinin düşük olması en önemli üstün özelliklerindedir. Ancak bağ mukavemetinin düşük olması, kaplama tabakasında oluşacak yüksek boşluk seviyeleri ve çalışma sıcaklığının düşük oluşu yöntemin olumsuz olan özellikleridir [1].

#### **2.4.3.2. Elektrik ark sprey**

Elektrik ark sprey kaplama metodunda gazdan meydana gelen alev veya elektrik yardımı ile elde edilmiş plazma gibi ısı kaynakları olmadığı için diğer termal püskürtme metodlarından farklılık göstermektedir. Elektriksel anlamda zıt yüklenmiş, kaplama malzemesini içeren iki telin kesişme bölgesinde, kontrollü ark oluşturmak amacıyla bir araya getirilip ısıtılır ve ergime olayı meydana gelir. Ergiyik metal, sıkıştırılmış hava veya diğer gazlar yardımı ile atomize edilir ve önceden hazırlanmış altlık malzemenin üzerine püskürtülür. Ark sprey metodu da Schoop kişisi tarafından patentlenmiştir. Ark sprey, Çinko (Zn) , Alüminyum (Al) veya alaşımlarını korozyondan korunmak için kullanılan en ekonomik kaplama çözümlerinden biridir. Ark sprey, elektriği ileten metal veya metal oksit karışımları üzerine uygulanabilir. Kaplamanın kalitesi, atomizasyonun basıncı, nozulün şekli, telin besleme oranı, kaplamanın mesafesi gibi faktörlere bağlıdır. Ark sprey kaplama, yüksek adhezif ve kohezif mukavemet sergiler.

Ark spreyin avantajları; altlığın az ısıtılması nedeniyle düşük gerilme, alev sprey işleminde daha fazla bağ mukavemeti, kalın kaplamaların yapılabilmesi, metalik olmayan ürünlerin üzerine (cam, seramik, plastik) kaplama yapılabilmesi, yoğun şekilde kaplama oluşturulabilmesi ve tamamıyla ergimiş partikül elde edilmesidir. Elektrik ark - sprey kaplama teknolojisiyle üretilen kaplamalar, kesin olarak tamamıyla ergimiş metallere oluşmaktadır. Bunun yanında ergimiş metalin oksijen ilgisi yüksek olduğundan dolayı, püskürtülen metaller katılaşana kadarki kısa vakitte oksitlenebilir.

Proses esnasında azot (N) gibi gazlar kullanıldığı takdirde metal-nitrür bileşikleri kaplama içerisinde elde edilebilir. Kaplama sırasında anot ve katot olarak farklı teller beslenebilir. Burada dikkat edilmesi gereken husus beslenen metallerin ergime dereceleridir. Tel sürme hızı metallerin ergime derecelerine göre ayarlanmalıdır. İstenilen oranlarda beslenmeyen tel, mikroyapıda istenmeyen bileşiklerin oluşmasına sebep olabilir [1].

### **2.4.3.3. Plazma sprey**

Plazma sprey kaplama teknolojisi alev sprey ve ark spreyden sonra geliştirilmiştir. Metallerin korozyona, yüksek sıcaklık oksidasyonuna ve aşınmaya karşı dirençlerinin artırılması seramik kaplamalarla mümkündür. Bu tür kaplamaların uygulanması plazma sprey teknolojisi ile de yapılabilmektedir. Bu yöntemle gerçekleştirilen kaplama belirtilen özellikleri sağladığı gibi, ana malzemenin üstün özelliklerinden tokluk ve şekil değiştirilebilirlik özellikleri korunmaktadır ve böylece metal ve seramiklerin üstün özelliklerinden bir arada faydalanılmaktadır. Plazma sprey kaplama ergime derecesi çok yüksek kaplamalar için uygulanır. Elektrik arkı, elektrot ve ikincil elektrot olarak davranan nozula uygulanır. Basınçlı inert gaz (argon, helyum, azot, hidrojen) ve elektrotlar arasından geçirilir. Çok yüksek sıcaklığa ulaşan gaz, plazma formuna dönüşür. Plazma sprey sistemi, güç kaynağı, gaz kaynağı, tabanca ve toz besleme ünitelerini içerir. Şekil 2.13'te plazma sprey yöntemi şematik olarak, kaplama, splat yapısı, kullanılan toz mikroyapısı ile birlikte gösterilmektedir. Plazma sprey kaplamaların yapısı yüzeye paralel tabakalar şeklindedir. Yüzeye dik bağlama kuvvetini arttırmak için altlık yüzeyi pürüzlendirilerek kaplama işlemi sonucu yüzeye tamamen paralel tabakalar yerine dalgalı tabakalar oluşturulur [5].

Geleneksel kaplama özellikleri 3 alt başlıkta toplanabilir.

- ✓ Plazmanın biçim ve çevreyle etkileşimi
- ✓ Toz besleme ve sonuçta oluşan partiküller (sıcaklık, boyut, hız, akış)
- ✓ Splat biçimi, splat katmanları ve kaplama biçimi

Plazma sprey kaplama yönteminde sıcaklık 20 000 °K üzerine ulaşır. Plazma ile üretilen bu yüksek sıcaklık kaplama malzemesini çok yüksek sıcaklıklara ulaştırır. Bu yüksek sıcaklığa rağmen altlık çok ısıya maruz kalmaz ve mikroyapısında herhangi bir değişim

olmaz. Plazma sprey kaplama yöntemiyle, çok yüksek plazma sıcaklığı sebebiyle bilinen tüm malzemeler kaplanabilir (seramik, metal, polimer). Kaplama tozu plazmaya üst kısımdan taşıyıcı gaz yardımıyla beslenir. Taşıyıcı gazın debisi bu noktada önemlidir çünkü toz plazmaya sokulmak suretiyle ergiyik veya yarı ergiyik hale getirilir. Gaz debisinin az olması toz beslemenin yetersiz olmasına sebep olur ve toz plazma içerisine sokulamaz. Aksi durumda ise toz çok beslenir ve partiküller ergimeyebilir. Hatta plazmanın altına geçerek hiç kaplamaya girmeyebilir ve sonuçta prosesin verimi düşebilir. Tablo 2.4’te termal sprey kaplama proseslerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 2.4 : Termal sprey kaplama prosesinin karşılaştırılması

Proses	Partikül Hizi M/S	Proses Sıcaklığı (°C)
Alev-Toz	30–200	2500–3000
Alev-Tel	30–100	2500–3000
Hvof	700–800	2500–3000
Atmosferik Plazma-Aps	200–300	15000
Vakum Plazma-Vps	200–300	15000
Elektrik Ark Sprey	50–150	3000

Tablo 2.4’te görüldüğü üzere en yüksek hıza soğuk spreyde ulaşılrken, en yüksek proses sıcaklığına ise plazma sprey yöntemiyle ulaşılmaktadır.

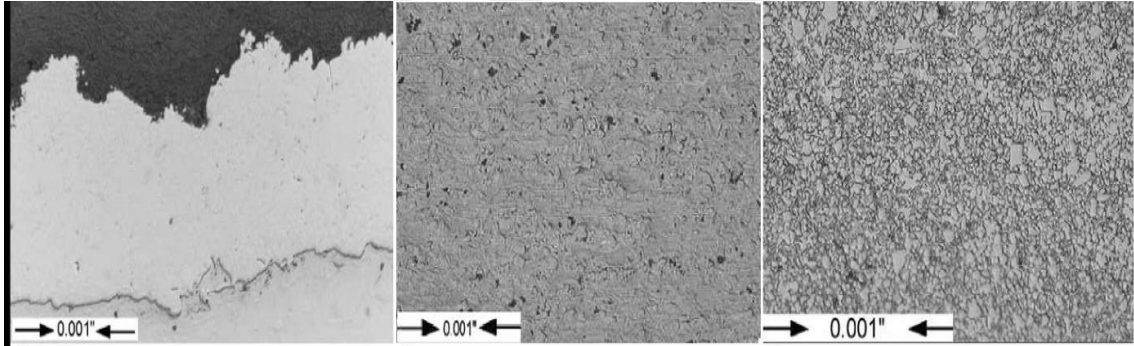
#### 2.4.3.4. HVOF(High velocity oxygen fuel)

HVOF, TS kaplama yöntemlerinden en yenilerindedir. Oksijen ve yakıt yüksek basınçlar altında kullanılır. Kullanılan gazlar; propan ( $C_3H_8$ ), propilen ( $3H_6$ ) ve hidrojen ( $H$ ). Yanıcı gaz karışımı, çok yüksek hızlara ulaşarak kaplama tozları aleve beslenir. HVOF, ısı enerjisi girişini düşürürken, kinetik enerjiyi ise en yüksek seviyelere ulaştırır. Böylece bağ mukavemeti yüksek, yoğun, porozitesi/boşluğu az kaplamalara ulaşılabılır. Jet motor parçaları üzerinde aşınma dayanımı gerektiren uygulamalar için

kullanılır. Havacılık ve uzay, petrol, petro-kimya, kâğıt sektörü gibi yüksek sürtünme ve aşınma dayanımı gereksinimi olan sektörlerde, sert krom kaplama HVOF ile yapılabildiği için PVD, CVD ve nitrüleme gibi kaplama yöntemlerine alternatiftir. HVOF kaplama yönteminde gaz hızı 2100 m/s hızı aşarken, partikülü 400–800 m/s hıza ulaştırır. Bu değerler diğer alev sprej metodlarından kat kat üstündür. Gaz yakıtların yanında kerosen gibi sıvı yakıtlarda kullanılabilir. Kinetik enerji dışındaki diğer avantajlar da listelenmiştir.

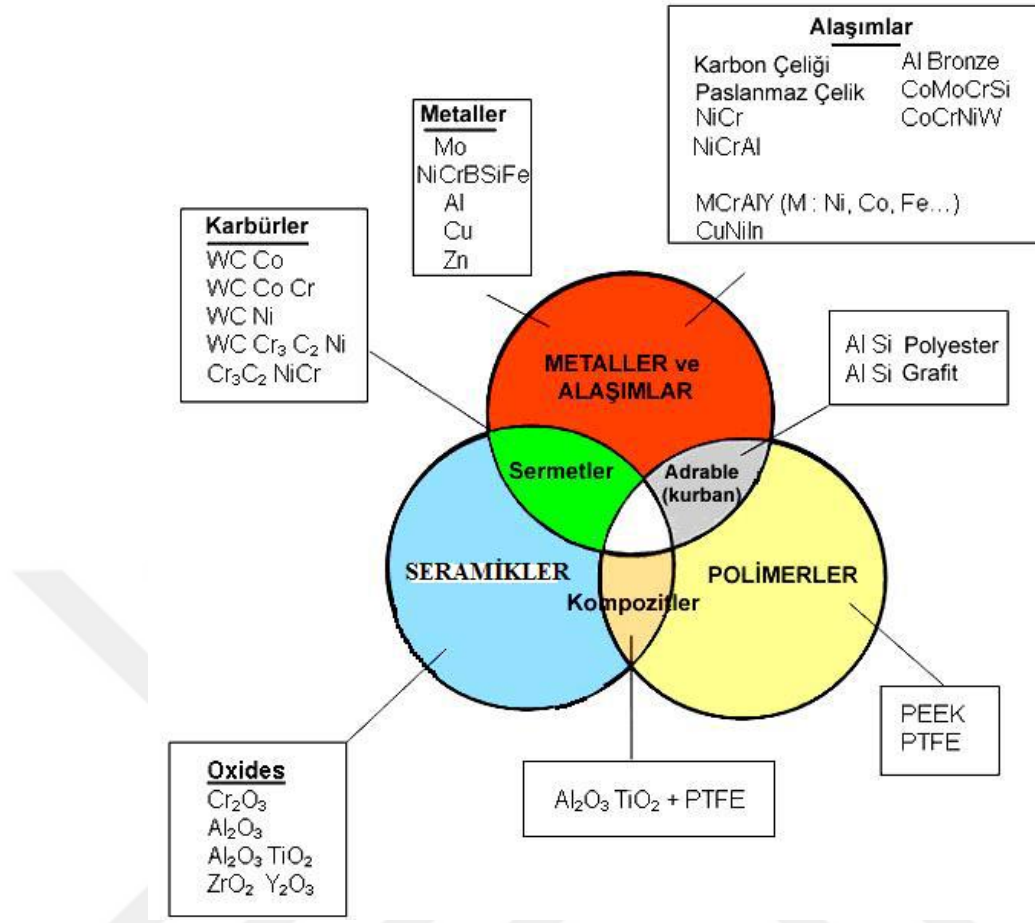
- ✓ Kalınlık kapasitesi artışı
- ✓ Nispeten daha pürüzsüz yüzey eldesi
- ✓ Düşük oksit seviyesi

Jetlerin süpersonik tabiatı gereği, HVOF prosesinde gaz çıkış hızlarının çok yüksek olması sebebiyle “shock diamonds” paternleri açıkça gaz jetinde görülür. Aynı paternler yüksek performanslı jet motor egzozlarında görülebilir. Bu tarz yüksek hızlar genellikle çok yüksek gürültüye sebep olur, HVOF prosesi sırasında ses +133 dBA’ya kadar çıkabilir.



Şekil 2.14 : HVOF ile WC-Co kaplama [28]

HVOF ile yüksek yoğunluklu kaplamalar üretilebildiği Şekil 2.14’te açıkça gösterilmiştir. Yüksek kinetik enerji sayesinde düşük poroziteli kaplama üretilmiştir. Yüksek gürültü sebebiyle, işçi sağlığı ve iş güvenliği açısından bu gibi kaplamalar özel yalıtımlı kabinde yapılmalıdır. HVOF ünitesi portatif de olabilir, bu durumda operatör kulaklık, maske, gözlük gibi iş güvenliği ekipmanları kullanmalıdır.

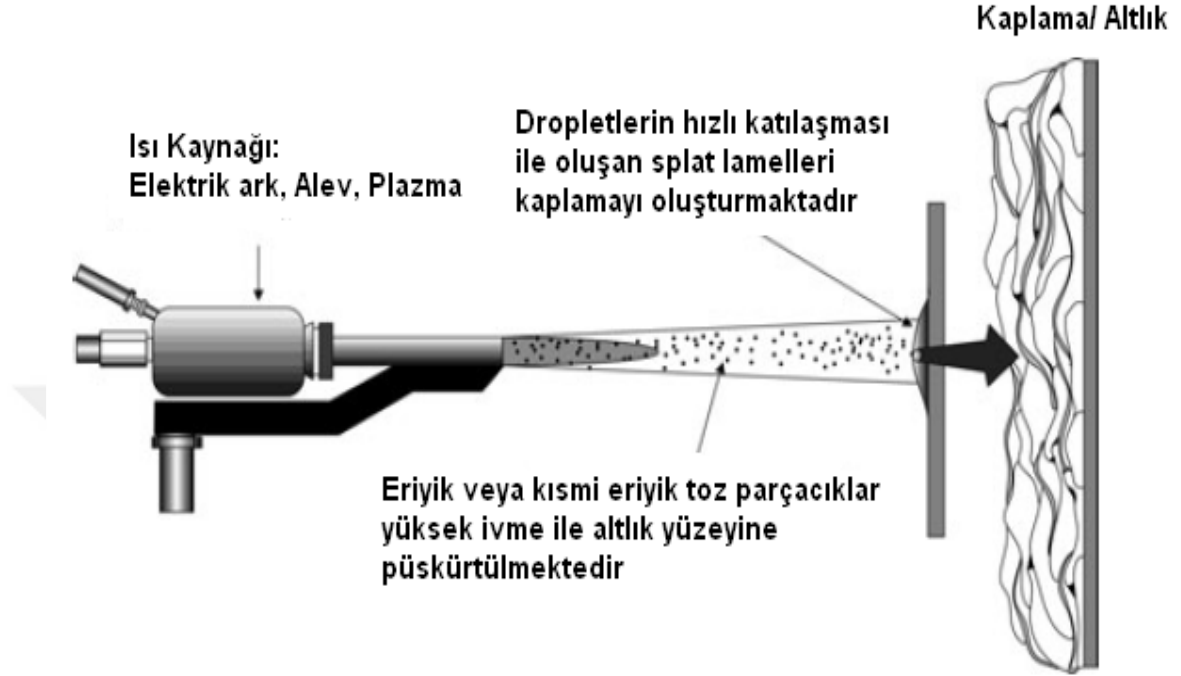


Şekil 2.15 : Termal sprey yönteminde kullanılan kaplama malzemeleri [29]

## 2.5. Termal Sprey Yöntemi ile Oksit Esaslı Kaplamalar

Termal sprey kaplama prosesleri başta havacılık endüstrisi için geliştirilmesine karşın hızla yaygınlaşarak birçok sektörde kullanım alanına sahip olmuştur. İlk olarak 70'li yıllarda demir çelik endüstrisinde kullanılmaya başlamıştır. Hızla gelişen termal sprey uygulamalarında kompozisyon, teknoloji ve proses yetenekleri çok çeşitli endüstriyel uygulamanın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Koruyucu yüzey kaplama uygulamaları ile kullanım ömrü artırılmış, performans artırıcı kaplamalar ile daha yüksek hız, sıcaklık ve agresif koşullarda çalışma kabiliyeti kazandırılmıştır. Şekil 2.16 'da görüleceği üzere toz formunda farklı tür kaplama malzemelerinin (metalik, seramik, sermet esaslı) bir ısı kaynağı ile ergitilerek yüzeye yüksek hızda püskürtülmesi sonrasında dropletlerin hızla katılması sonucunda katmanlardan oluşan bir kaplama elde edilmektedir. Kaplama yapısı proses parametreleri ile kontrol edilmektedir. Püskürtme hızı ve sıcaklığı kaplama kalitesini etkileyen en önemli faktörlerdir. Bunun yanında altlık

yüzey özellikleri ve atmosferik ortam koşulları kaplama kesitinde olası süreksizliklerin kontrolünde, yapışma dayanımı üzerinde etkin rol oynamaktadır [3].



Şekil 2.16 : Termal sprey yöntemi ile oksit esaslı kaplamaların temsili gösterimi [30]

Bu yöntemde tozların tamamen ya da kısmen ergimesi onların ısıl özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Sistemin aşırı yüksek ısıtma ve soğutma oranlarında kontrol edilebilirliği, bu yöntemle metalik, metalik olmayan ve seramiklerin ve kombinasyonlarıyla yapılan kaplamaların üretilmesine imkân tanır. Yüksek sıcaklıktaki kimyasal kararlılık, mükemmel aşınma direnci ve korozyona karşı dayanıklılığından dolayı seramik (özellikle oksit esaslı) esaslı tozlar, metalik tozlara nazaran daha çok kullanılır. Bu şekildeki oksit kaplamalarda kaplama tabakasının metalik esaslı alt malzemeye bağlanması mekanik kilitleme karakterindedir. Oksit kaplamaların iyonik bağ karakterli olması; ara yüzeydeki uyumlu kafes düzlemlerinin oluşmasını önlemektedir. Bunun sonucunda kaplamada gerilim yoğunlaşması meydana gelir. Bu olumsuz etkiyi önlemek için ince bir ara (bağ) tabaka kullanılması yararlı olmaktadır. Ara tabakalar kullanılarak elde edilen oksit esaslı kaplamalar ile alt malzeme arasındaki ısıl genişleme katsayısı gradyentindeki değişim en aza indirilir. Korozif, abrasif ve erozif aşınma şartlarına karşı yüksek dayanımlı, nispeten düşük yoğunluklu ve yüksek sertliğe

sahip seramik malzemeler mevcut özelliklerinden dolayı metalik malzemelere göre daha çok tercih edilirler [13].

Alüminyum oksit, zirkonyum oksit, titanyum oksit, krom oksit, silisyum oksit ve yitrium oksit gibi seramik malzemeler, malzemelerin aşınma, erozyon, kavitasyon ve korozyon dirençlerini geliştirmek için yüzey kaplama malzemeleri olarak genişçe kullanılmaktadırlar. Bu tip malzemelere özellikle aşınma ve korozyona karşı direnç istenen uygulamalarda ihtiyaç duyulmaktadır.

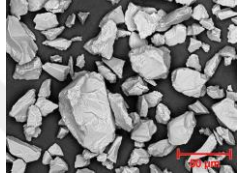
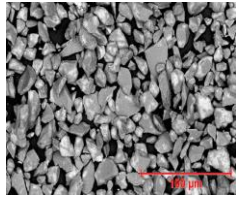
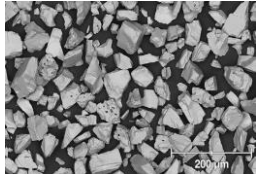
Termal sprej (Plazma sprej, Alev sprej) yöntemleri ile oksit esaslı seramikler metal altlık yüzeyinde 1mm'ye kadar biriktirilebilmektedir. Plazma sprej yöntemi alev sprej yöntemine göre daha yüksek işletme maliyeti oluşturması ve daha yüksek kalitede kaplama üretimine imkân vermesine karşın kaplama yapısında porozite, ergimemiş parçacık oranı ve yapışma nedenli problemler söz konusudur. Alev sprej yöntemi bu bağlamda plazma sprej sistemine göre daha pratik ve ekonomik bir proses olmasına karşın kaplama kalitesi plazma sprej kaplamanın altında yer almaktadır. Genel olarak tamir, dolgu, toleransa getirme işlemlerinde tercih edilmektedirler. Aşınma dirençli uygulamalarda çoğunlukla HVOF kaplamalar tercih edilmektedir. Kaplama kalitesi, yüksek yoğunlukta ve sertlikte kaplama eldesine imkân vermektedir. Kaplama işlemi esnasında yüksek gaz sarfiyatı nedeniyle proses maliyetleri artmaktadır. Bu proje kapsamında plazma sprej yönteminin ergitme kabiliyetine, yüksek hızda alev sprej yönteminin ise püskürtme hızlarına sahip yüksek hızlı fleksikord sprej tekniği ile aşınmaya dirençli oksit esaslı kaplamaların üretimi ve optimizasyonu amaçlanmaktadır. Aşağıda farklı oksit esaslı kaplamaların plazma sprej kaplama yöntemi ile üretimi ve proses parametreleri verilmektedir. Bunun yanında elde edilen kaplamaların mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır [3].



Tablo 2.5 : Oksit esaslı seramiklerin mekanik özellikleri

Özellik	Mikrosertlik Hv(Gpa)	Kırılma Tokluğu K <sub>1c</sub> (Mpa M <sup>1/2</sup> )	Elastik Modül E(Gpa)	Yüzey Pürüzlülük Ra(μm)	Yüzey Pürüzlülük Rz(μm)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.70 ± 1.70	2.57 ± 0.65	184 ± 6	5.00 ± 0.82	18.33 ± 2.70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub>	8.18 ± 1.29	1.66 ± 0.45	141 ± 7	8.26 ± 1.29	30.46 ± 4.71
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.52 ± 1.26	1.67 ± 0.67	185 ± 13	3.07 ± 0.47	11.60 ± 1.03
WC-Co	11.16 ± 0.41	4.02 ± 0.51	255 ± 9	3.25 ± 0.28	12.75 ± 0.66

Tablo 2.6 : Oksit esaslı tozların özellikleri

Özellik	Üretim yöntemi ve Toz boyutu	Kaplama yöntemi	Kullanım alanı	Çalışma sıcaklığı	Toz morfolojisi
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-45+22 μm	PTA Termal Sprey	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fırın astarları</li> <li>Roket nozulları</li> <li>Aşınma takviyesi</li> <li>Elektrik izolatörleri</li> <li>Kalça ve diz implantları</li> </ul>	≤1650 °C	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub>	-53+15 μm	PTA Termal Sprey	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hidrolik parçalar</li> <li>Pistonlar</li> <li>Otomotiv parçaları</li> <li>Kimya endüstrisi bileşenleri</li> <li>Elektrik izolasyonu ve dielektrik uygulamaları</li> <li>Aşınma takviyesi</li> </ul>	≤540 °C	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-90+22 μm	PTA Termal Sprey	<ul style="list-style-type: none"> <li>Biyomedikal implantlar</li> <li>Kimya endüstrisi bileşenleri</li> </ul>	≤540 °C	

## **BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

Çalışmalarımızda kullanılmak üzere 4140 çeliği kaplama yapılacak boyuta struers marka sulu kesme cihazında ısıdan etkilenmeyecek şekilde kesilmiştir.

### **3.1. Altlık Hazırlık**

Altlık hazırlama işlemi, kaplama işleminin en fazla dikkat edilmesinin gerektiği kademelerinden birisidir. Kaplamanın altlık malzemeye gerektiği şekilde bağlanması, ancak ve ancak kaplanacak yüzeyin en iyi şekilde hazırlanmasıyla sağlanmaktadır. Bu mekanik bağlanma yanında, partiküllerin altlık malzeme ile mikro seviyede kaynaması ve kimyasal bağ oluşturması gibi, diğer bağlanma/yapışma mekanizmaları da mevcuttur. Bütün bağlanma mekanizmaları, yüzey temas alanının arttırılmasını ve yüzey aktivasyonunun gerçekleşmesini gerektirir. Bu sebepler kapsamında aşağıda belirtilen altlık hazırlama işlemleri uygulanmıştır.

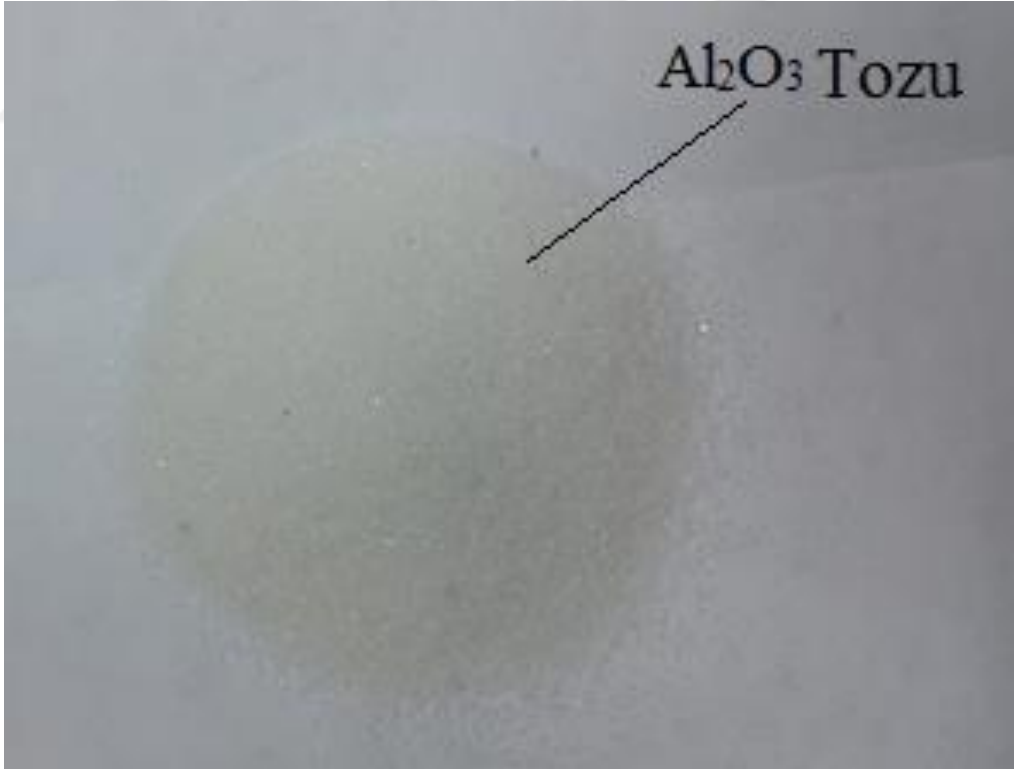
#### **3.1.1. Temizleme**

Altlık üzerinde kaplama kalitesini düşürmeye sebep olabilecek oksit, yağ ve kir tabakasını yok etmek amacıyla aseton yardımıyla temizleyip, ultrasonik banyo içerisinde 15 dakika 20kHz frekansda temizleme işlemi yapılmıştır.

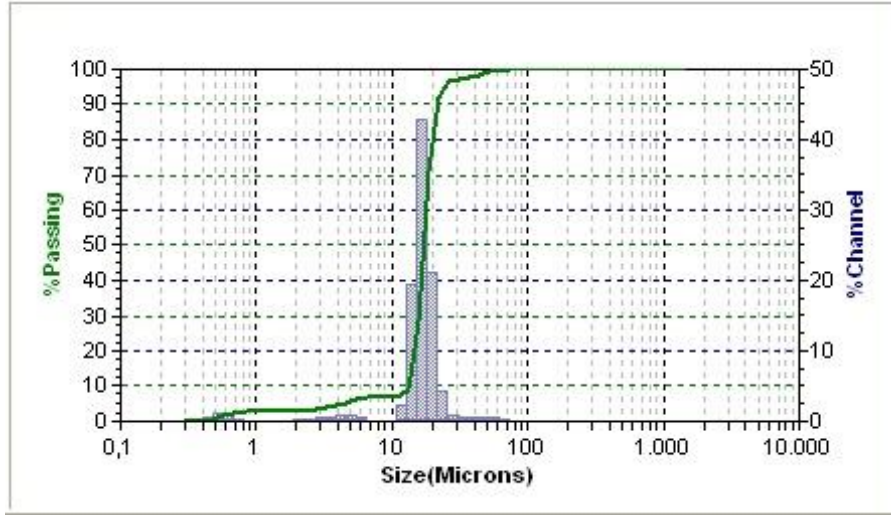
#### **3.1.2. Kumlama**

Kaplama yapılacak yüzeye kaplamanın daha iyi yapışması ve aynı zamanda kir, pas vb. gibi istenmeyen durumları ortadan kaldırmak için  $Al_2O_3$  kumu ile kumlama işlemi yapılmıştır.  $Al_2O_3$  kumuna öncelikle tane boyutu ölçümü yapıldı ve SEM’de kum morfolojilerini incelendi. Kum tane boyutu ortalama 80 mesh olup SEM görüntüleri

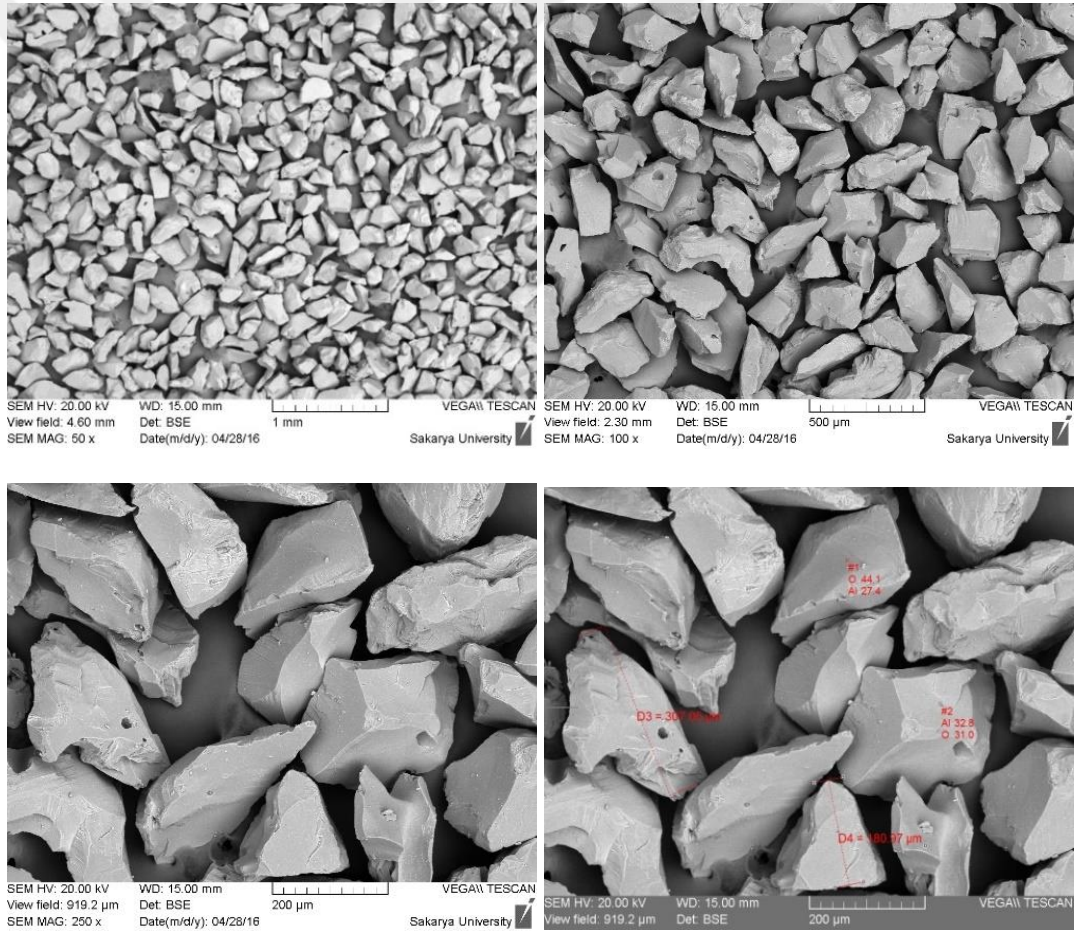
aşağıda resimlerdeki gibidir. Numunelerimiz belirttiğimiz özellikteki kumlarla 5 bar basınç altında 20 sn kumlanmıştır.



Şekil 3.1 : Toz boyutu ölçüm ve analiz cihazı- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Kumlama kumu



Şekil 3.2 : Toz tanelerinin boyut analizi



Şekil 3.3 : Toz tanelerinin sem de 50x 100x ve 250x ve toz tane boyutu görünümü

### 3.2. Kaplama İşlemi

Altlık ön temizlik ve kumlama işlemlerinden sonra ön ısıtma ile kaplama işlemi için 4140 altlığının üzerine alev sprej yöntemiyle Seramik tabaka veya tabakalar uygulanmadan önce Şekil 3.4'deki Saint Gobain marka sprej tabancası yardımıyla NiCr esaslı 100µm kalınlığında bağ tabakası uygulanmıştır. Ardından yine Şekil 3.4'deki Saint Gobain marka sprej tabancası yardımıyla oksit esaslı Krom oksit kaplamalar 200–300µm kalınlığında tek tabaka veya çok tabakalı olacak şekilde aşağıda belirtilen parametrelerde bağ tabaka üzerine uygulanmıştır.

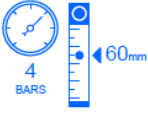
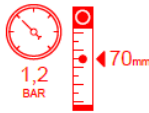





Şekil 3.4 : Alev sprej gaz ünitesi- Alev sprej tabancası

### 3.2.1. Kaplama parametreleri

#### 3.2.1.1. NiCr bağ tabakası

Tablo 3.1 : NiCr tabakası kaplama parametreleri

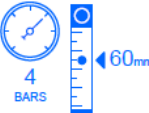


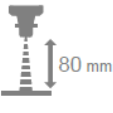

Oksijen	Asetilen	Hava	Mesafe	Besleme Hızı
				



Şekil 3.5 : NiCr kaplaması sonrası flexicoard ucu yapısı

#### 3.2.1.2. Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tabakası

Tablo 3.2 : Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tabakası kaplama parametreleri

Oksijen	Asetilen	Hava	Mesafe	Besleme Hızı
				



Şekil 3.6 : Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplaması sonrası flexicoard ucu yapısı

### 3.2.2. Seramik kaplamaların özellikleri

#### 3.2.2.1. NiCr Bağ tabakası

NiCr bağ tabakasının kullanılmasının sebebi 4140 çelik altlığını ile üzerine yaptığımız seramik esaslı kaplamaların arasında oluşan ısıl genleşmeyi ortadan kaldırmak ve daha iyi bir bağlanma mukavemeti elde edebilmektir. Bağ tabakalarının kullanılması kaplamanın mekanik özelliklerini iyileştirir.

Bağ tabakanın bir diğer görevi ise kaplama sisteminin kimyasal özelliklerini geliştirmektir. Özellikle çelik gibi malzemelerde yüzeye direkt olarak osit esaslı bir kaplama uygulandığı takdirde malzeme yüzeyi tamamen oksidasyona uğrayabilir. Bu yüzden Nikel-Krom esaslı bu kompozit geliştirilmiştir.

- ✓ 1000°C sıcaklığın üzerinde dahi iyi oksidasyonu direncine sahiptir.
- ✓ 35–55 MPa bağ mukavemetine sahiptir.
- ✓ Çok katmanlı kaplamalar için idealdir.

Tablo 3.3 : NiCr bağ tabakası özellikleri

Kompozisyon (%)	Sertlik (HV <sub>300</sub> )	Yoğunluk (G/Cm <sup>3</sup> )	Porozite (%)	Pürüzlülük (Ra µm)
% 80 Ni % 20 Cr	280	7,25	%1–3	6–8



Şekil 3.7 : NiCr bağ tabakası uygulanmış numune

### 3.2.2.2. Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tabakası

Tablo 3.4 : Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tabakası özellikleri

Kompozisyon (%)	Sertlik (HV <sub>300</sub> )	Yoğunluk (G/Cm <sup>3</sup> )	Porozite (%)	Pürüzlülük (Ra µm)
% 99,2 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Max %0,8 diğer	935	5,2	~%1	~3

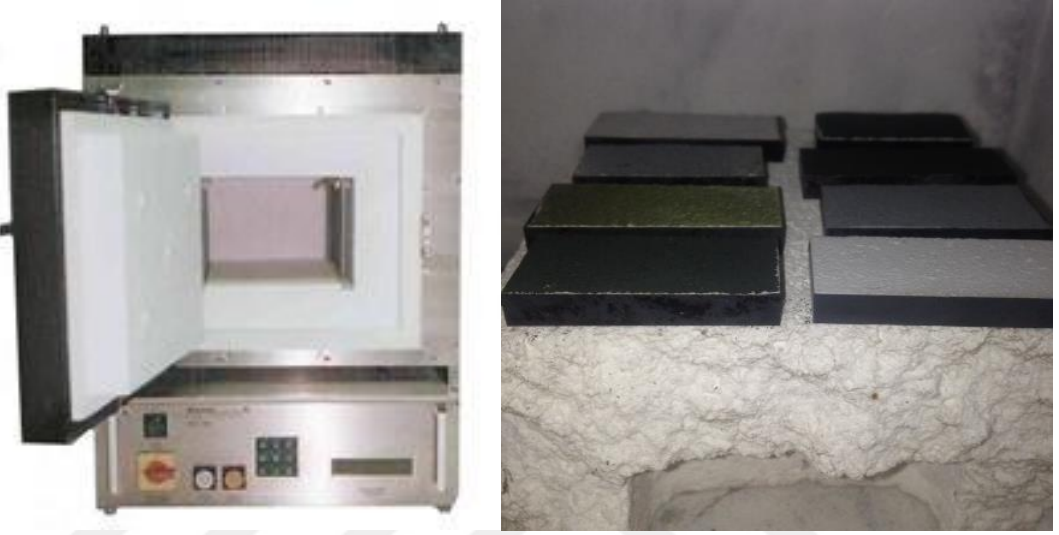


Şekil 3.8 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tabakası uygulanmış numune



### 3.2.3. Isıl işlem

Ekstrüder sisteminde vidanın çalışma koşullarında maksimum 350°C'ye ulaştığını göz önünde bulundurarak, kaplama sonrası numuneler bu koşullarda rahat çalışabileceğini test etmek amacıyla 400°C'de 60 saat ısıl işleme tabii tutulmuştur. (T460= 400°C'de 60 saat).



Şekil 3.9 : Isıl işlem fırını ve uygulaması

### 3.2.4. Aşınma testi

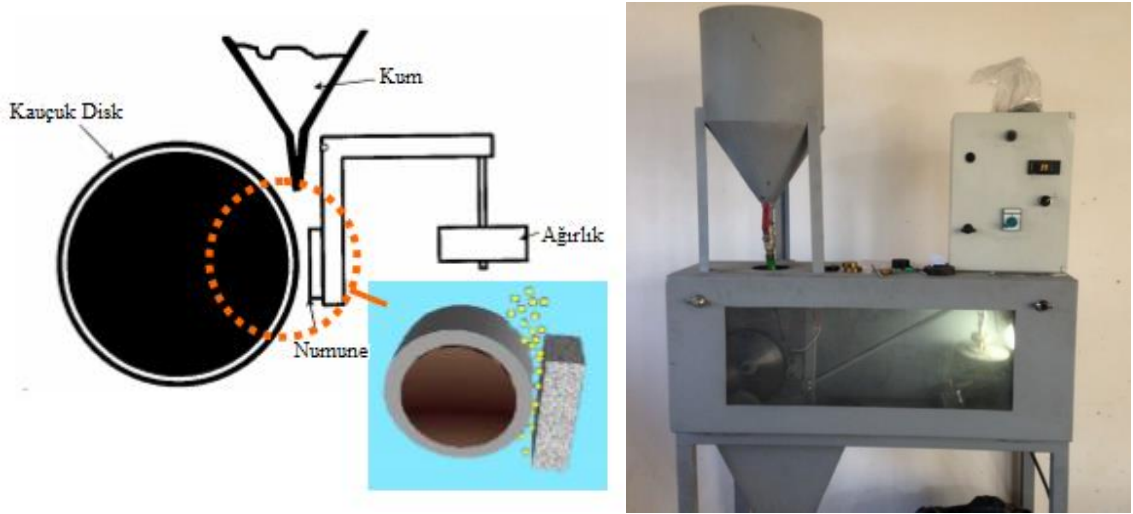
Aşınma testi olarak yapılan testlerin en yaygın olan ASTM G65 aşınma testidir. Bu test standartlarına uygun şekilde geliştirdiğimiz kaplamalara aşınma testi uygulandı. Sonuçları aşağıda verilmiştir. Aşınma kayıpları hacimce ve ağırlıkça hesaplanmıştır.

Aşındırıcı: Alümina

Besleme oranı: 300–600 gr/dk

Yük: 130 N

Dönme mesafesi: 6000 devir



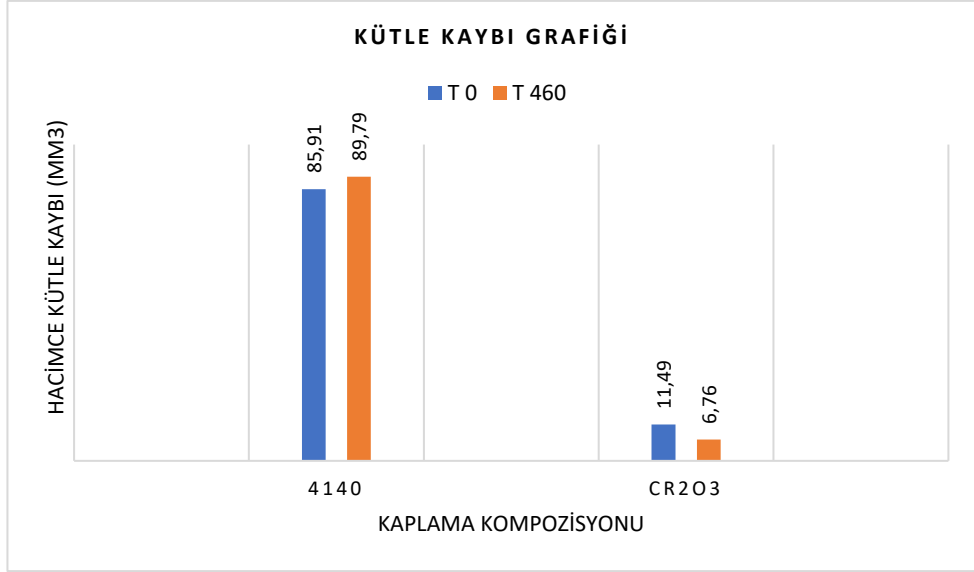
Şekil 3.10 : ASTM G65 aşınma testi temsili şekli ve uygulaması

Tablo 3.5 : Krom oksit esaslı kaplamaların ağırlıkça ve hacimce malzeme kayıpları

Kaplama Kompozisyonu	Ağırlıkça Malzeme Kaybı (Gr)	Hacimce Malzeme Kaybı (Mm <sup>3</sup> )
4140 T0	0,606	85,91
4140 T460	0,633	89,79
NiCr+ Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T0	0,081	11,49
NiCr+ Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T460	0,048	6,76

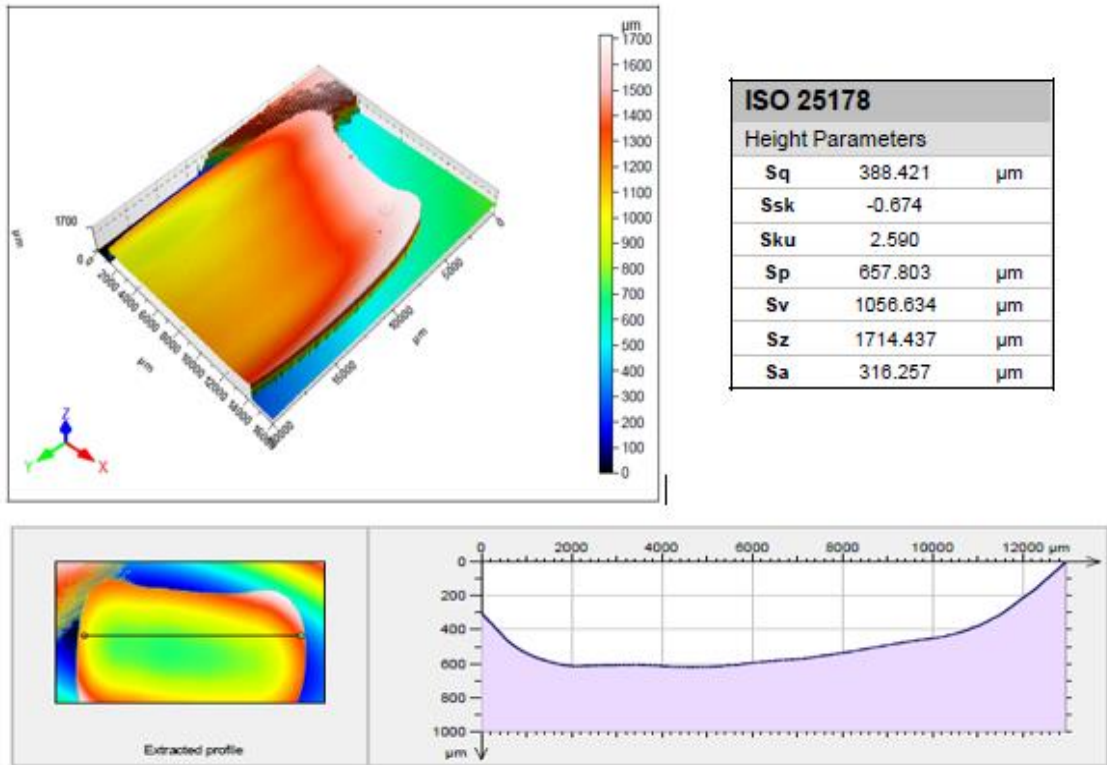


Şekil 3.11 : Yapılan kaplamaların aşınma sonrası fotoğrafları

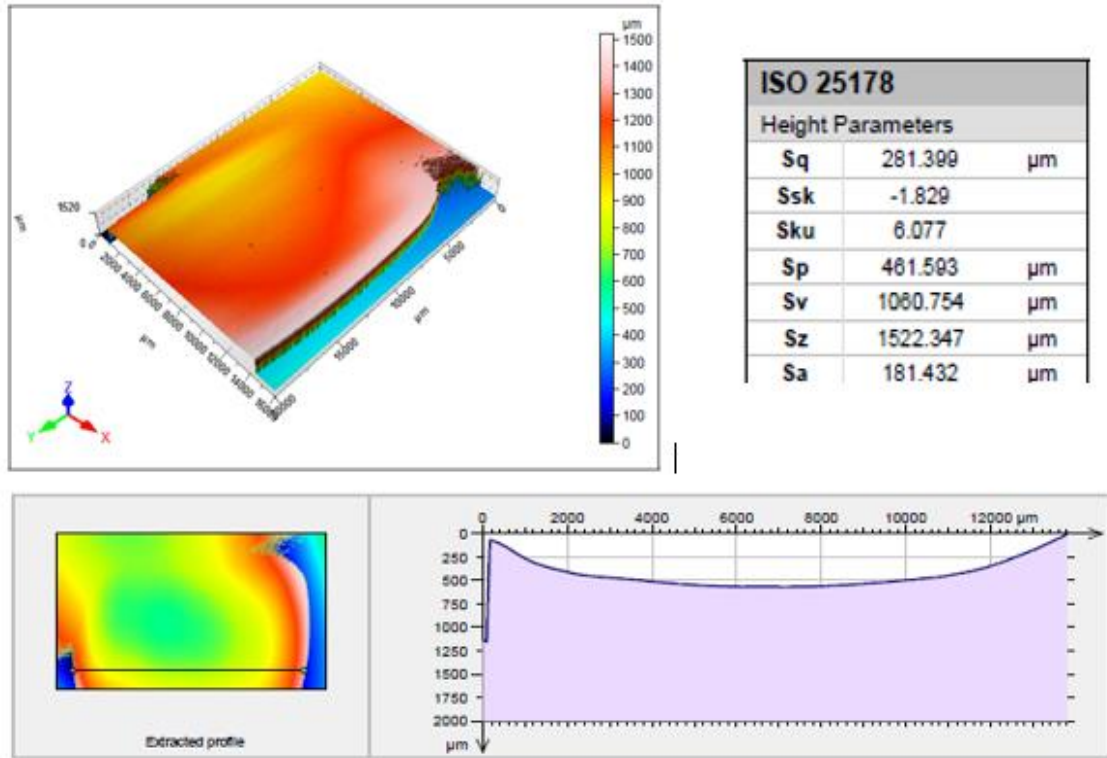


Şekil 3.12 : Hacimce malzeme kaybı grafiği

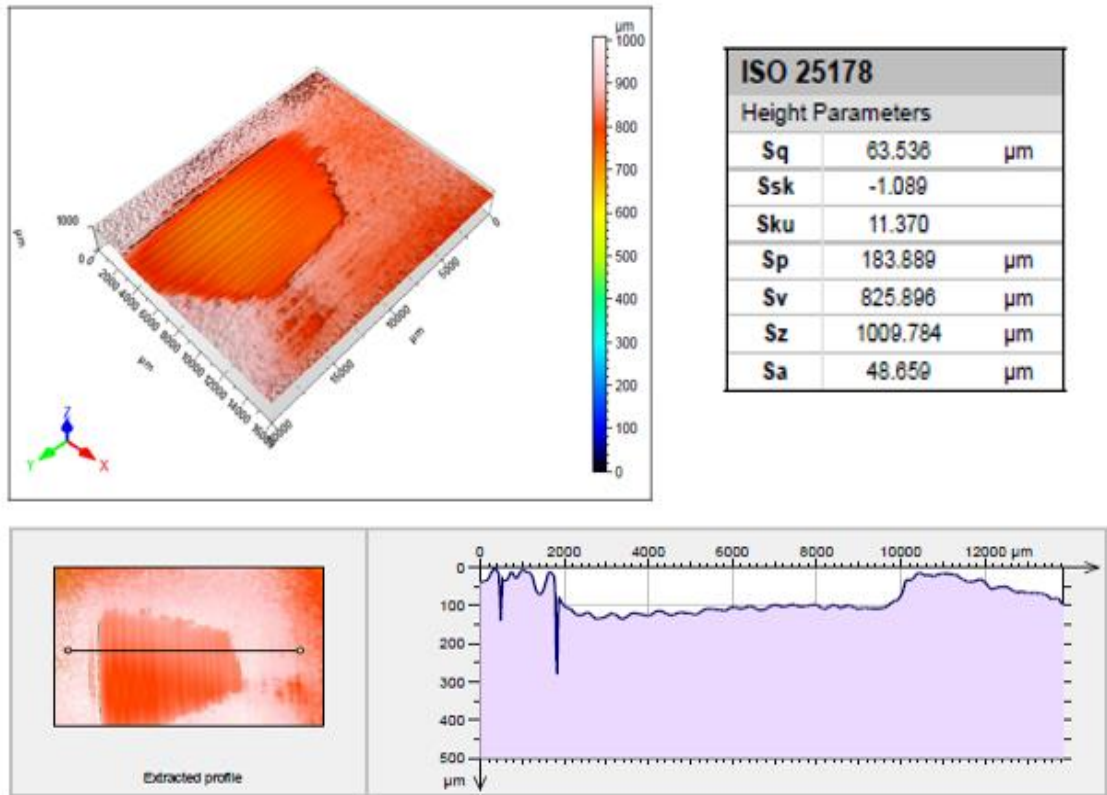
### 3.2.5. 3 Boyutlu Aşınma izi profilometresi



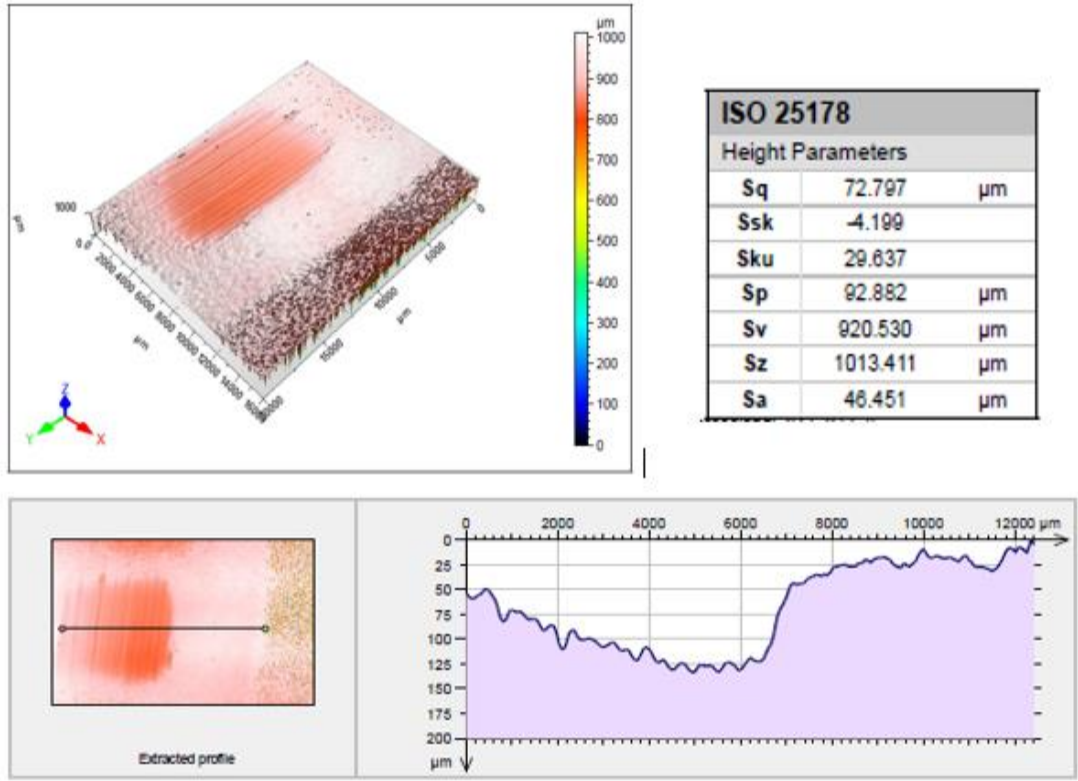
Şekil 3.13 : Isıl işlemsiz 4140 Çeliği 3d aşınma izi grafiği



Şekil 3.14 : Isıl işlemlı 4140 çeliği 3d aşınma izi grafiği



Şekil 3.15 : Isıl işlemsız Krom oksit kaplamasının 3d aşınma izi grafiği



Şekil 3.16 : Isıl işlemlili Krom oksit kaplamasının 3d aşınma izi grafiği

### 3.2.6. Mikrosertlik ölçümü

Kaplanmış numunelerin yüzey temizliği yapıldıktan sonra Struers Duramin A300 marka bir Vickers (HV300) sertlik ölçüm cihazıyla ölçülmüştür. Kaplamanın her katmanından en az 3'er ölçüm değeri alınıp ortalaması kabul edilmiştir.



Vickers sertlik ölçümü

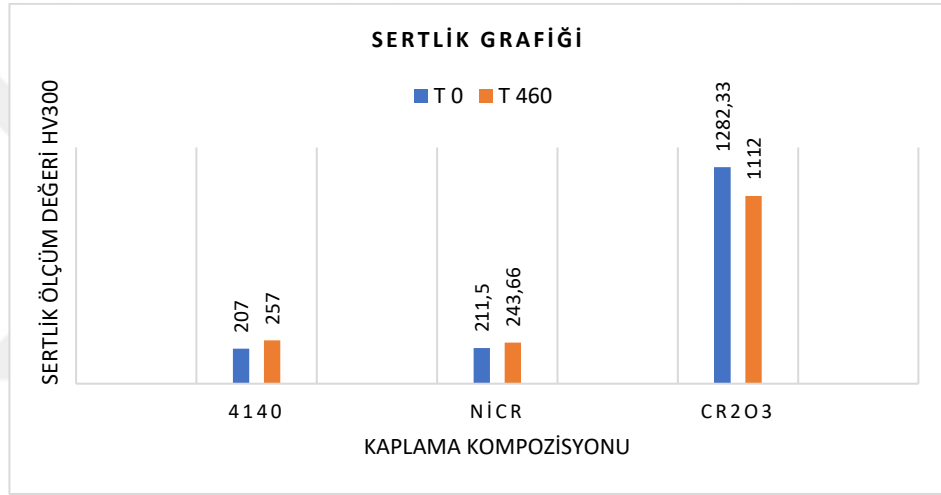
HV<sub>300</sub>, Yük: 2942N

Bekleme süresi: 10sn

Şekil 3.17 : Mikrosertlik ölçüm cihazı

Tablo 3.6 : Mikrosertlik ölçüm sonuçları

NiCr+Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4140	NiCr KATMANI	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> KATMANI
T0	207 HV <sub>300</sub>	211,5 HV <sub>300</sub>	1282,33 HV <sub>300</sub>
T460	257 HV <sub>300</sub>	243,66 HV <sub>300</sub>	1112 HV <sub>300</sub>



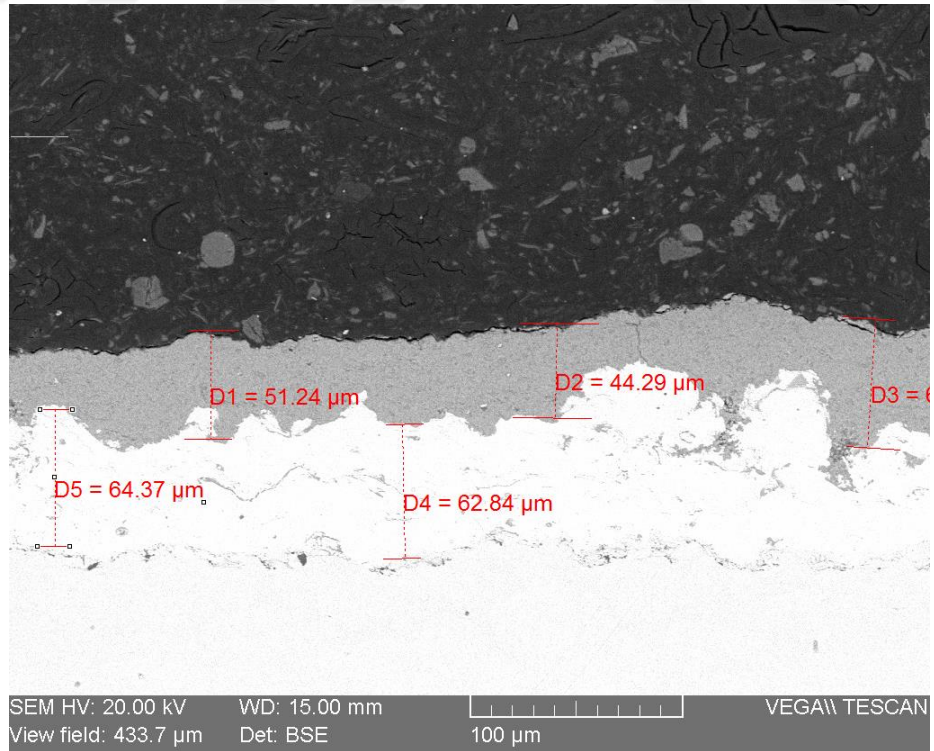
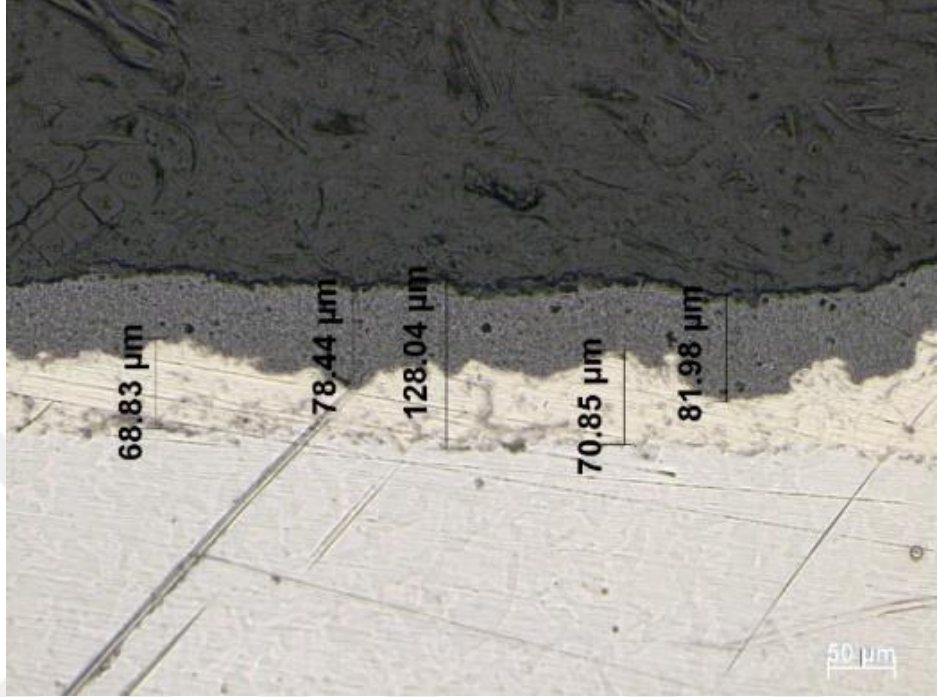
Şekil 3.18 : Sertlik grafiği

### 3.2.7. Mikroskobik incelemeler

Kaplanmış numuneler laboratuvar tipi Struers (Labotom-3) marka bir kesme cihazı ile kaplama tabakasının altlıktan ayrılmasını engellemek amacıyla kaplamadan altlığa doğru kesilip Struers (citoPress-10) marka sıcak kalıplama cihazı ile bakalite alınarak Buehler marka parlatma cihazı ile 500-1200-240'lük SiC zımparalar kullanarak zımpara işlemi gerçekleştirilmiştir. Parlatma aşamasında parlaticı olarak Alümina kullanılmıştır. Kaplama yüzeylerinin karakterizasyonunda Vega Tescan II marka bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Carl Zeiss marka bir Stereo Mikroskobu kullanılmıştır. Kesit incelemesinde ise Carl Zeiss marka bir optik mikroskop ve yine Vega Tescan II marka bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Mikroskobik incelemelerde kaplamaların üst yüzey ve kesit görüntüleri karakterize edilmiştir.

### 3.2.7.1. Kaplama kalınlığı ölçümü

Metalografik olarak hazırlanan numunelere Carl Zeiss marka optik mikroskopta ve Elektron mikroskobunda kesitten kaplama kalınlığı ölçümü yapılmıştır.

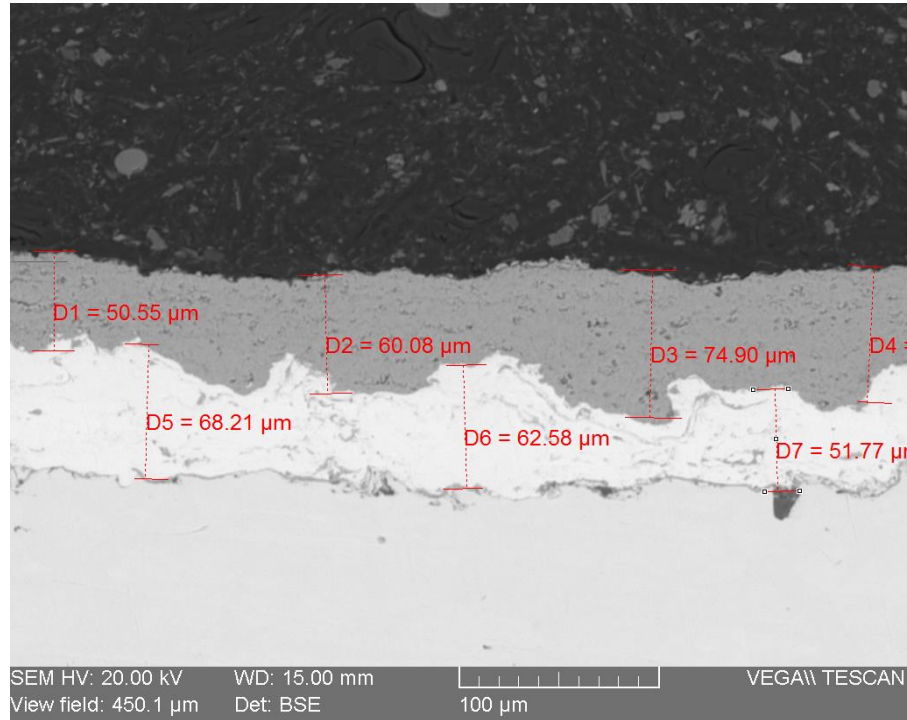
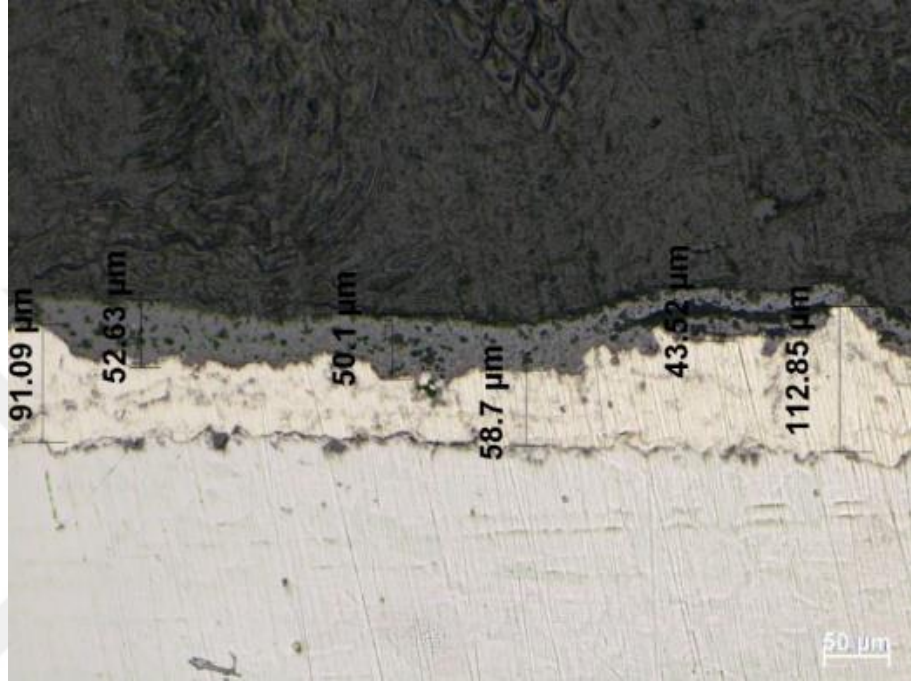


Şekil 3.19 : Isıl işlemsiz krom oksit kaplaması kaplama kalınlığı ölçümü

Isıl işlemsiz numunenin 200 büyütme görüntüsünde;

- ✓ Ort. Bağ tabaka NiCr kalınlığı: 69,84  $\mu\text{m}$ 'dir,
- ✓ Ort.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  Oksit tabaka kalınlığı: 80,21  $\mu\text{m}$ 'dir.

Kaplama yüzeyi stabil durumdadır.



Şekil 3.20 : Isıl işlemlili krom oksit kaplaması kaplama kalınlığı ölçümü

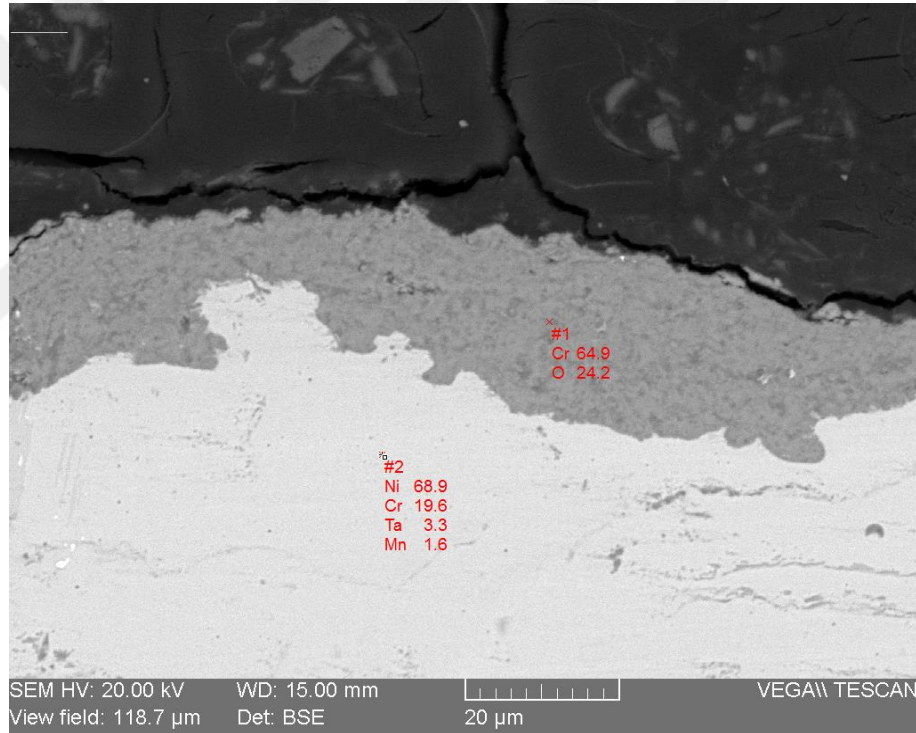


Isıl işlemlenmiş numunenin 200 büyütme görüntüsünde;

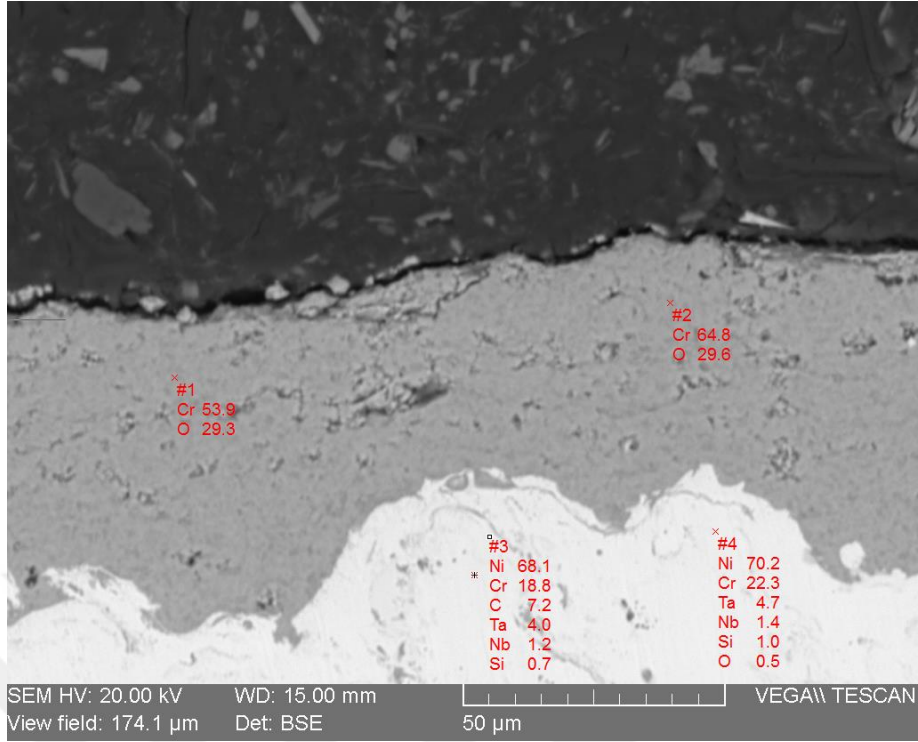
- ✓ Ort. Bağ tabaka NiCr kalınlığı: 87,55  $\mu\text{m}$ 'dir,
- ✓ Ort.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  Oksit tabaka kalınlığı: 48,75  $\mu\text{m}$ 'dir.

### 3.2.7.2. Element Analizi

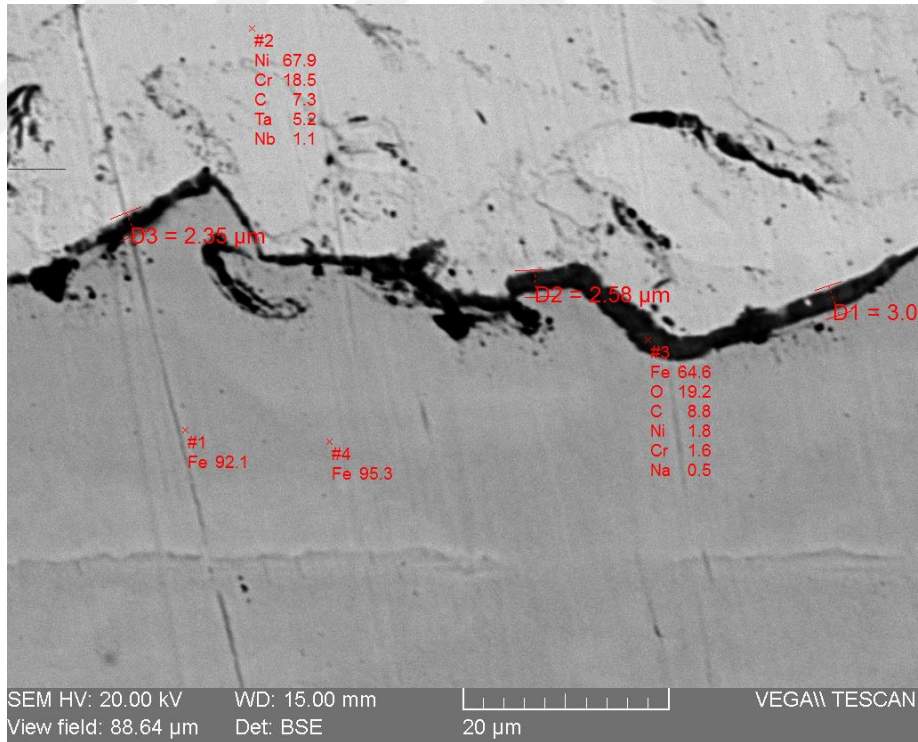
Metalografik olarak hazırlanan numunelere Elektron mikroskopunda kesitten kaplamanın element analizi (EDX) yapılmıştır. EDX analizleri, Kromoksit tabakasında %65 Cr, %30 O elementleri içerdiğini, Nikelkrom tabakasında ise %70 Ni, %20 Cr elementleri içerdiğini göstermektedir. Isıl işlemlenmiş numune analizinde Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'de görüleceği üzere yüzeyde çok ince bir demir oksit tabakası oluşmaktadır.



Şekil 3.21 : Isıl işlemlenmiş krom oksit kaplaması EDX analizi



Şekil 3.22 : Isıl işlemlili krom oksit kaplaması EDX analizi



Şekil 3.23 : Isıl işlemsiz krom oksit kaplaması EDX analizi (Demir oksit oluşumu)

### 3.2.7.3. Aşınma izi analizi



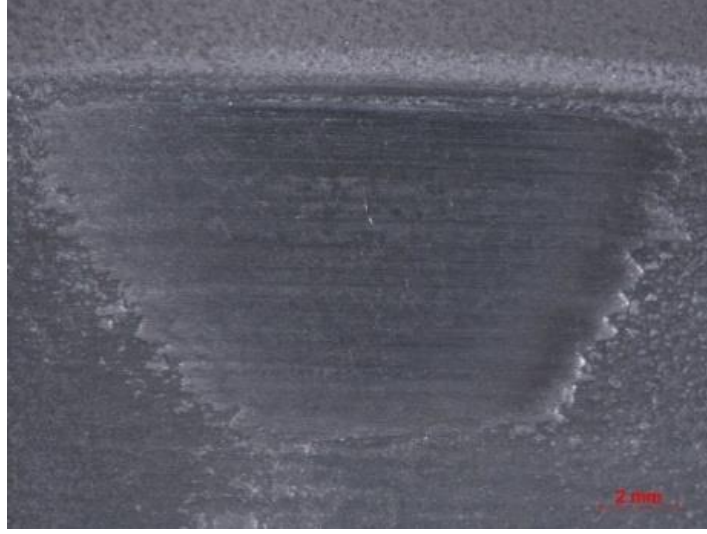
Şekil 3.24 : Isıl işlemsiz 4140 çeliği aşınma izi görüntüsü

Isıl işlemsiz numunenin stereo mikroskop altında çekilmiş görüntüsü Şekil 3.24’de verilmiştir. Aşınmanın derin ve yüksek oranda olduğu görülmektedir.



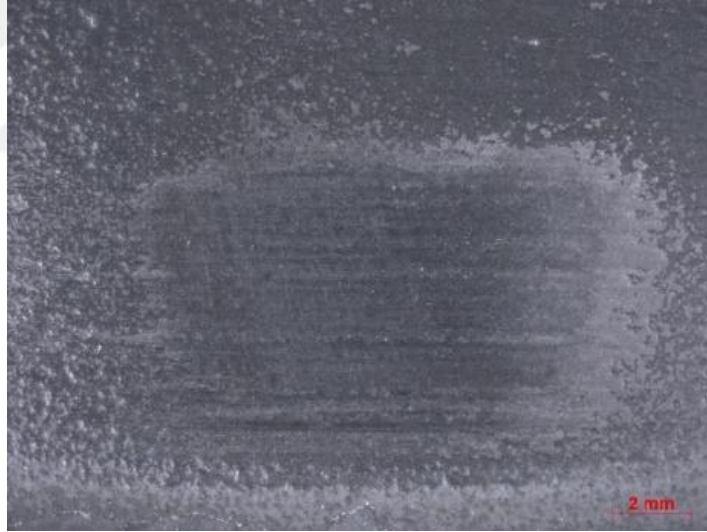
Şekil 3.25 : Isıl işlemlili 4140 çeliği aşınma izi görüntüsü

Isıl işlemlili numunenin stereo mikroskop altında çekilmiş görüntüsü Şekil 3.25’de verilmiştir. Aşınmanın ısılsız numuneden de derin ve yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 3.26 : Isıl işlemsiz krom oksit kaplamalı numunenin aşınma izi görüntüsü

Isıl işlemsiz Krom oksit esaslı kaplama uygulanmış numunenin stereo mikroskop altında çekilmiş görüntüsü Şekil 3.26’de verilmiştir. Aşınmanın hemen hemen yok denilebilecek kadar az olduğu görülmektedir.

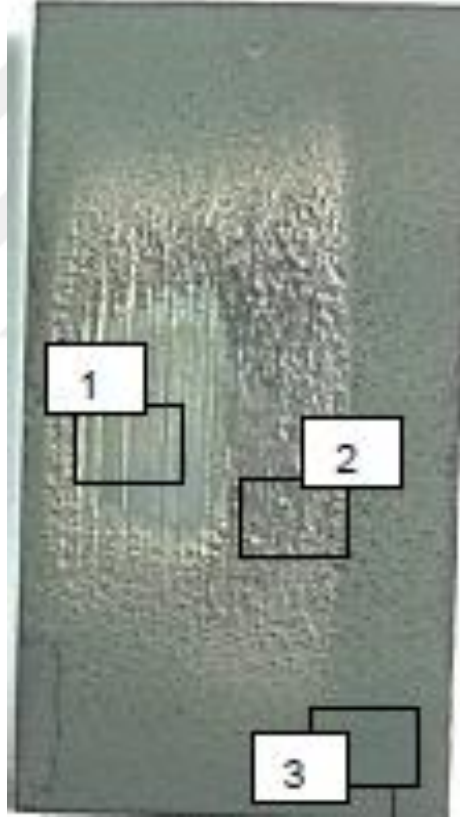


Şekil 3.27 : Isıl işlemlili krom oksit kaplamalı numunenin aşınma izi görüntüsü

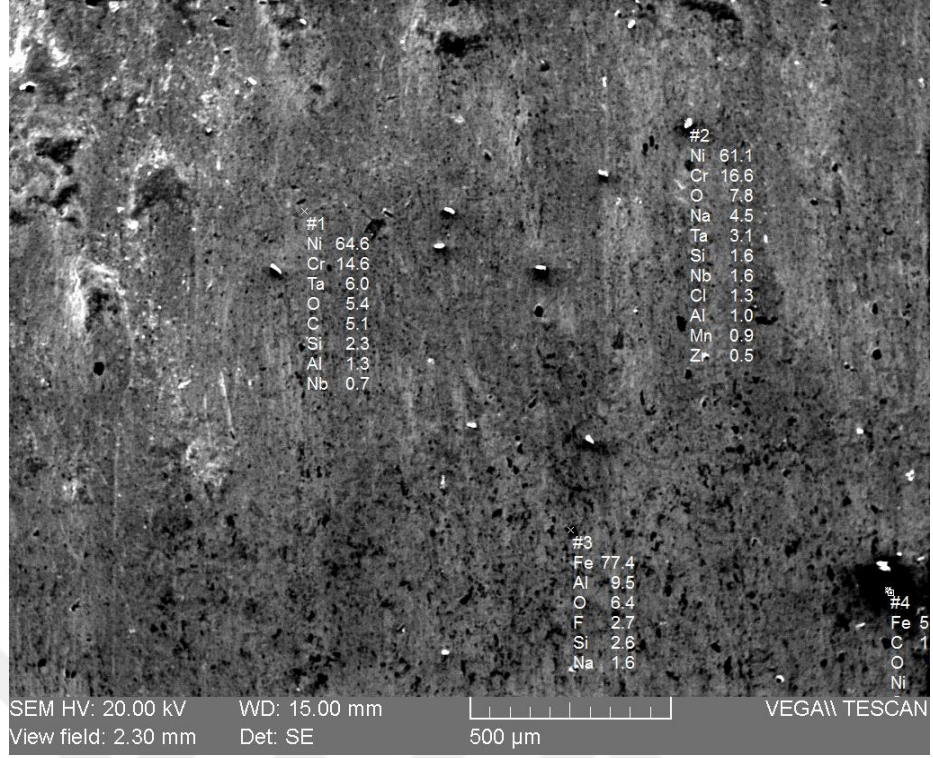
Isıl işlemlili Krom oksit esaslı kaplama uygulanmış numunenin stereo mikroskop altında çekilmiş görüntüsü Şekil 3.27’te verilmiştir. Aşınmanın ısılsızdan de az olduğu görülmektedir.

#### 3.2.7.4. Aşınma izleri üzerinde elektron mikroskobu incelemeleri

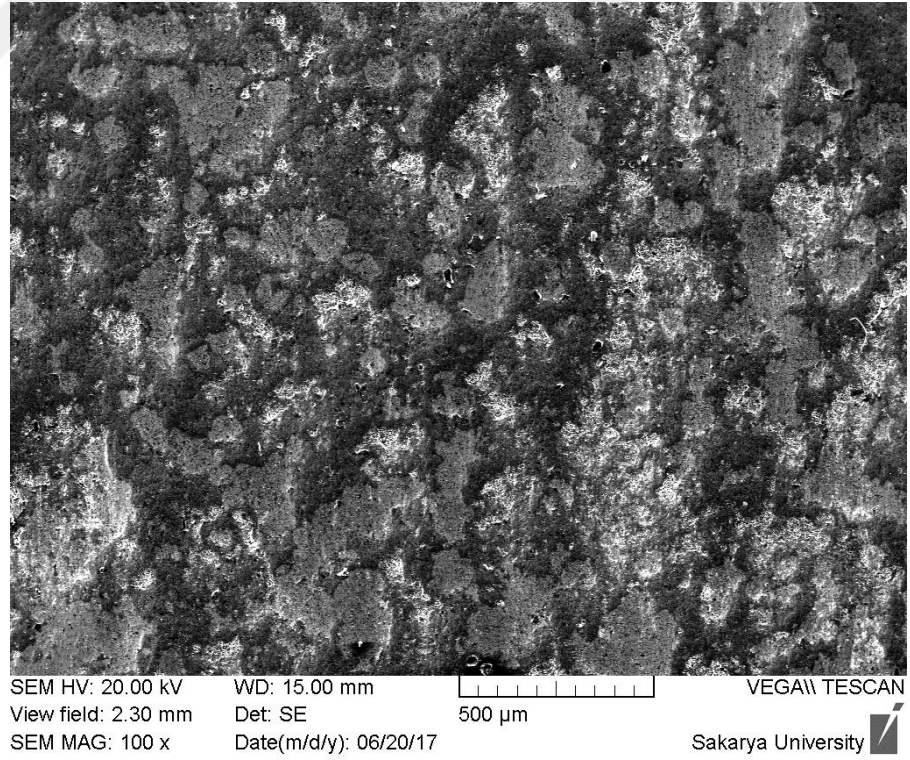
Aşağıda Şekil 3.28 de ısıtılmış krom oksit tabakasının elektron mikroskobunda aşınma izi bölgesi incelenmiştir. Aşınma izi bölgesinde 3 farklı bölgeden görüntü alınmıştır. Aşınmayan kaplama bölgesinden (Şekil 3.31), aşınma izi merkez bölgesinden (Şekil 3.29) ve aşınma izi geçiş bölgesinden (Şekil 3.30). Görüleceği üzere kaplama 1 no'lu bölgede kaplamanın hemen altındaki bağ tabakaya ulaşılmasına karşın en iyi abrazyon aşınma direnci elde edilmiştir. Yüzeyle 100µm kalınlığında bir kaplama tabakasının sağladığı direnç altlığın korunmasında önemli rol oynamıştır. 2 no'lu bölgede ise üst oksit tabakası ile bağ tabaka geçiş zonu oluşturmakta ve aşınma izi profilini oluşturmaktadır. Bu bölgede hem bağ tabaka hem de üst tabaka kalıntıları bir arada yer almaktadır.



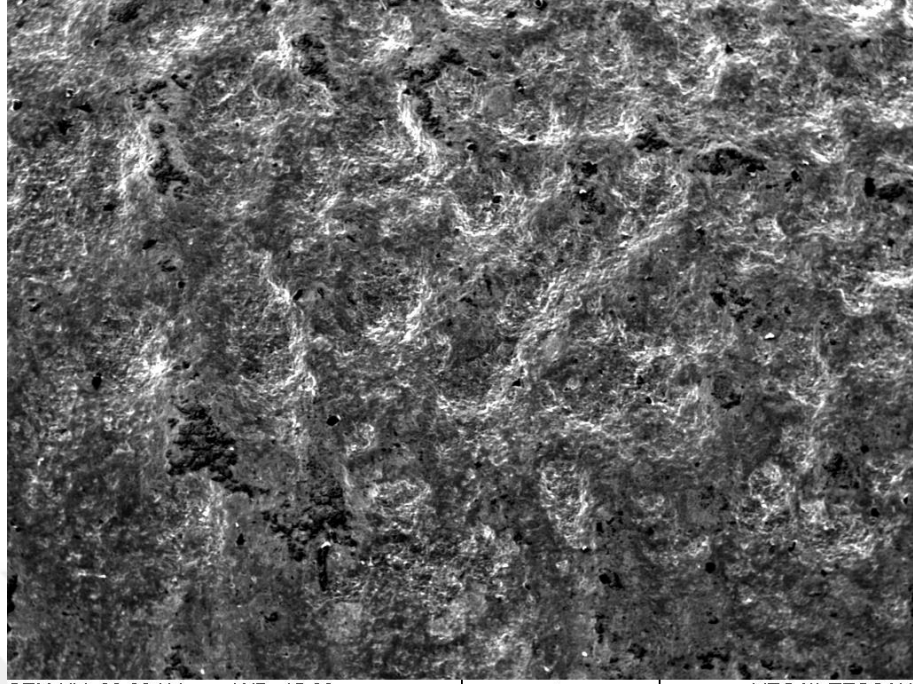
Şekil 3.28 : Isıtılmış krom oksit esaslı aşınma numunesi elektron mikroskobu incelemesi



Şekil 3.29 : 1 nolu bölge: Aşınma izi içi EDX analizinde bağ tabaka elementleri Ni, Cr gözlenmektedir.



Şekil 3.30 : 2 nolu bölge: Aşınma izi uç bölgesi SEM görüntüsü



SEM HV: 20.00 kV WD: 15.00 mm VEGA\\ TESCAN  
View field: 2.30 mm Det: SE 500  $\mu$ m  
SEM MAG: 100 x Date(m/d/y): 06/20/17 Sakarya University

Şekil 3.31 : 3 nolu bölge: Krom oksit tabakası üst yüzeyi morfolojisi görüntüsü

## BÖLÜM 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Deneysel çalışmalarda fleksikord alev sprej prosesi ile ekstrüder vidaların aşınma ömrünü artırmak amacıyla belirli bir kalınlıkta krom oksit kaplama 4140 çeliği üzerinde başarılı bir şekilde biriktirebilmiştir. Oksit esaslı kaplama tabakasının metal altlığa tutunabilmesi ve genleşme farklarının azaltılabilmesi için önce NiCr esaslı bir bağ tabaka ve üzerine krom oksit seramik aşınma tabakası kaplanmıştır. Ön kaplama deneme çalışmalarında elde edilen optimum sprej parametreleri ile kaplamaların üretimi tekrarlanabilir kalitede gerçekleştirilmiştir. Sprej parametrelerine bağlı olarak kaplamaların mikroyapısal özelliklerinin değiştiği açık bir şekilde gözlemlenmektedir. Kaplamanın yüzey kalitesi ve ara yüzey özelliklerinin kaplamanın aşınma performansı üzerinde etkin rol oynadığı tespit edilmiştir. Kaplama işlemleri sırasıyla yüzey hazırlama, kaplama parametrelerinin optimizasyonu ve tekrarlanabilir kalitede kaplamaların üretimi doğrultusunda tamamlanmıştır. Kaplama sonrasında 400 °C de ısıl işlem uygulanarak hedef uygulama alanı olan ekstrüder vidalarda çalışma şartları belirlenerek kaplamanın aşınma performansının oda sıcaklığında test sonuçları ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Deneysel aşınma test plakaları üzerinde yapılan testlerden sonra kaplamalar metalürjik açıdan karakterize edilmiş, aşınma testi sonrasında aşınma kayıpları ağırlıkça ve hacimce ölçülmüştür. Elektron mikroskopunda hem kesit hem üst yüzey hem de aşınma izleri irdelenmiş, yüzey profilleri üç boyutlu tarayıcıda analiz edilmiştir. Aşınma mekanizması ve aşınmaya etki eden faktörler detaylı bir şekilde tartışılmıştır.

- ✓ Nitrasyon çeliğine göre daha ekonomik olan 4140 çeliği üzerinde yapılan aşınma testlerinde hacimce aşınma kaybı ısıl işlem öncesinde 85mm<sup>3</sup> olup ısıl işlem sonrasında aşınma hızı daha da artmaktadır. Alaşımın 400°C de sıcaklıklara maruz kalması kaplamasız halde alaşımın ömrünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu



nedenle mutlak surette ekstrüder vidalar için aşınmaya dirençli kaplamalara gereksinim ortaya çıkmaktadır.

- ✓ Çalışma hedefleri arasında ekstrüder vida alaşımı üzerinde hacimce maksimum 50 mm<sup>3</sup> aşınma kaybı olması arzulanmıştır. Bu doğrultuda üretilen kaplamaların hem ısıtılmış halde hemde ısıtılmış işlem sonrasında aşınma kaybı hedefini sağladığı belirlenmiştir. Fleksikord alev sprej kaplama yönteminin krom oksit esaslı kaplamaların üretiminde başarılı bir şekilde uygulanabileceği ortaya çıkarılmıştır.
- ✓ En yüksek aşınma direnci (hacimce aşınma kaybı <15mm<sup>3</sup>) kromoksit esaslı kaplamalarda elde edilmiştir. Isıtılmış işlem sonrasında aşınma kaybı önemli ölçüde azaltılarak 10mm<sup>3</sup>'ün altına indirilebilmiştir. Krom oksit kaplamalı ekstrüder vidaların kullanım ömrü artırılabilir. Krom oksit kaplamalı ekstrüder vidaların kullanım ömrü artırılabilir.
- ✓ Isıtılmış işlem öncesinde kaplama yapısında splatlar arası mikroboşlukların ve artık gerilmelerin ısıtılmış işlemden sonra azalmasıyla birlikte daha yoğun bir kaplama tabakası ve sertlik kazanımı elde edilebilmiştir. Bu durum kaplamaların aşınma performansının iyileşmesine neden olmuştur.
- ✓ Kaplamaların aşınma iz profilleri incelendiğinde aşınma mekanizmasında mikro kesme, yüzeyden parça ayrılması ve mikron ölçeğinde sıvanma etkisi ile aşınmanın gerçekleştiği tespit edilmiştir.
- ✓ Bu tez çalışması sonucunda plazma sprej ve hvof prosesine alternatif bir termal sprej kaplama yönteminin uygulanabileceği ortaya konmuştur. Krom oksit kaplamaların ekstrüder vidalara rahatlıkla fleksikord alev sprej yöntemi ile kaplanabilirliği gözlenmiştir.
- ✓ Bu kaplamanın yüksek sertliği, üstün korozyon direnci ve yüzey kalitesi ile birlikte üstün bir aşınma performansına sahip olmasıyla ekstrüder vidalar için etkin bir yüzey kaplama çözümü olduğu belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International, Materials Park, OH, USA, p. 171.
- [2] K. Sugiyama, S. Nakahama, S. Hattori, K. Nakano, Slurry wear and cavitation erosion of thermal-sprayed cermets, *Wear* 258 (2005) 768–775.
- [3] R.B. Heimann, Applications of plasma-sprayed ceramic coatings, *Key Eng. Mater.* 122–124 (1996) 399–442.
- [4] S. Guessasma, M. Bounazef, P. Nardin, T. Sahraoui, Wear behavior of alumina–titania coatings, analysis of process and parameters, *Ceram. Int.* 32 (2006) 13–19.
- [5] Y. Xie, H.M. Hawthorne, Wear mechanism of plasma-sprayed alumina coating in sliding contacts with harder asperities, *Wear* 225–229 (1999) 90–103.
- [6] R. Westergard, L.C. Erickson, N. Ax'én, H.M. Hawthorne, S. Hogmark, The erosion and abrasion characteristics of alumina coatings plasma-sprayed under different spraying conditions, *Tribol. Int.* 31 (1998) 271–279.
- [7] G. Bolelli, V. Cannillo, L. Lusvardi, S. Riccò, Mechanical and tribological properties of electrolytic hard chrome and HVOF-sprayed coatings, *Surf. Coat. Technol.* 200 (2006) 2995–3009.
- [8] A. Kulkarni, A. Vaidya, A. Goland, S. Sampath, H. Herman, Processing effects on porosity-property correlations in plasma-sprayed yttria-stabilized zirconia coatings, *Mater. Sci. Eng. A* 359 (2003) 100–111.
- [9] J.D. Gates, Two-body and three-body abrasion: a critical discussion, *Wear* 214 (1998) 139–146.
- [10] Q. Yang, T. Senda, A. Ohmori, Effect of carbide grain size on microstructure and sliding wear behaviour of HVOF-sprayed WC–12%Co coatings, *Wear* 254 (2003) 23–34.
- [11] Sulzer-Metco web site, <http://www.sulzermetco.com>.
- [12] Guagliano M., “Fatigue failure of a bar of a twin-screw extruder for plastics”, *Engineering Failure Analysis* 12 (2005) 950–962
- [13] Song, E.P., Ahn, J., Lee, S., Kim, N.J., Effects of critical plasma spray parameter and spray distance on wear resistance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-8 wt.%TiO<sub>2</sub> coatings plasma-

sprayed with nanopowders, Surface and Coatings Technology 202, 2008, 3625-3632.

- [14] Heimann, R.B., Plasma-spray coating, VCH, New York, 1996.
- [15] Sun, Y., Li, B., Yang, D., Wang, T., Sasaki, Y., Ishii, K., Unlubricated friction and wear behaviour of zirconia ceramics, Wear 215, 1998, 232-236.
- [16] Ferrari, D.; Extrusion Coating Resins – Troubleshooting, TAPPI PLC Conference, 2000.
- [17] Wagner, J. R. Jr; Handbook of Troubleshooting Plastic Processes: A Practical Guide, John Wiley and Sons, 2012.
- [18] Polimer işleme teknikleri, Ankara üniversitesi. Erişim tarihi 20.06.2021, “[https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/99517/mod\\_resource/content/1/KYM%20445%20Polimerlerin%20%C4%B0%C5%9Flenmesi%20%28Estr%C3%BCsyon-Kal%C4%B1plama%29-2018.pdf](https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/99517/mod_resource/content/1/KYM%20445%20Polimerlerin%20%C4%B0%C5%9Flenmesi%20%28Estr%C3%BCsyon-Kal%C4%B1plama%29-2018.pdf)”
- [19] Enjeksiyon makinelerinde kontrol, MEGEP. Erişim tarihi 20.06.2021, [http://megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/Enjeksiyon%20Makinelerinde%20Kontrol.pdf](http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Enjeksiyon%20Makinelerinde%20Kontrol.pdf)
- [20] Url-1 <<http://former.com.tr/dokumanlar/plastik-enjeksiyon-nedir>>, erişim tarihi 29.06.2021.
- [21] Url-2 < [https://www.dynisco.com/userfiles/files/The\\_Screw\\_and\\_Barrel\\_System.pdf](https://www.dynisco.com/userfiles/files/The_Screw_and_Barrel_System.pdf) >, erişim tarihi 23.06.2021.
- [22] Url-3 <<https://www.muhendisbeyinler.net/asinma-nedir-asinma-cesitleri/> >, erişim tarihi 25.06.2021.
- [23] A. Dreiblatt, “In twin screw compounding, distinguish between disease and illness”, Century extrusion, 2010.
- [24] Url-4 <<https://www.metaluzmani.com/plazma-ark-kaynagi/> >, erişim tarihi 27.06.2021.
- [25] W.F. Gale, T.C. Totemeier, “Smithells Metals Reference Book”, 2004. P. 35-1, 35-16.
- [26] Url-5 <<https://cremer-coating.com/flame-spraying/wire-flame-spraying.html>>, erişim tarihi 28.06.2021.
- [27] Url-6 <<https://cremer-coating.com/flame-spraying/powder-flame-spraying.html> >, erişim tarihi 28.06.2021.
- [28] Url-7 <<https://teslab.sakarya.edu.tr/tr/icerik/10716/42049/hvof> >, erişim tarihi 28.06.2021.
- [29] Url-8 <<https://teslab.sakarya.edu.tr/tr/icerik/10729/42142/termal-sprey-nedir> >, erişim tarihi 29.06.2021.
- [30] Url-9 <<https://empoweringpumps.com/tstcoatings-microstructures-science-thermal-spray-coatings/> >, erişim tarihi 28.06.2021.