

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

**PLAZMA SPREY KAPLAMA KALİTESİNE ETKİ
EDEN FAKTÖRLERİN TAGUCHİ YÖNTEMİYLE
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kimya Müh. Demet TOZKOPARAN

Enstitü Anabilim Dalı : MET. VE MALZ. MÜH.

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Sefer Cem OKUMUŞ
Prof. Dr. Fatih ÜSTEL**

Ekim 2010

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PLAZMA SPREY KAPLAMA KALİTESİNE ETKİ
EDEN FAKTÖRLERİN TAGUCHİ YÖNTEMİYLE
OPTİMİZASYONU**

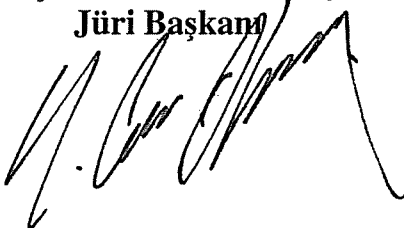
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kimya Müh. Demet TOZKOPARAN

Enstitü Anabilim Dalı : MET. VE MALZ. MÜH.

Bu tez 13 / 10 /2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

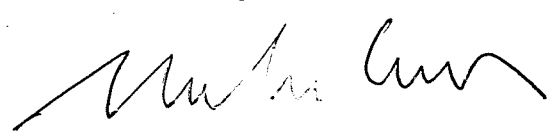
Doç. Dr. S. Cem OKUMUŞ
Jüri Başkanı



Prof. Dr. Sakin ZEYTİN
Üye



Yrd. Doç. Dr. Muhammet CERİT
Üye



ÖNSÖZ

Bu çalışmanın yürütülmesi ve sonuçlandırılmasında değerli fikir ve tecrübeleri ile beni yönlendiren danışman hocam sayın Doç. Dr. Sefer Cem OKUMUŞ' a,

Tezin hazırlanmasında, deneysel çalışmaların tamamı Sakarya Üniversitesi Plazma Sprey Kaplama Laboratuvarı' nda gerçekleştirilmiştir. Çalışmaların yönlendirilmesinde önemli katkısı olan Prof. Dr. Fatih ÜSTEL' e, yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Semra BORAN, Öğr. Gör. Ekrem ALTUNCU, doktora öğrencisi Savaş ÖZTÜRK ve tüm laboratuvar çalışanlarına,

Sağladığı imkanlardan dolayı 1'inci Ana Bakım Merkezi Komutanı sayın Bakım Albay Sıtkı VARLI' ya, yardımlarından dolayı 1'inci Ana Bakım Merkezi Komutanlığı çalışanlarından Celal HEPŞEN, Yasin DURGUN, Ali BOZTÜRK ve isimlerini burada sayamadığım her zaman yanımda olan arkadaşlarıma ve son olarak bu günlere gelmemde emeği geçen bana maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli aileme ve eşime,

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Demet TOZKOPARAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
SUMMARY.....	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
PLAZMA SPREY KAPLAMA TEKNOLİSİ.....	3
2.1. Plazma Prosesi.....	3
2.1.1. Plazmanın tanımı.....	3
2.1.2. Plazma oluşumu.....	4
2.1.3. Plazma gazları.....	5
2.2. Plazma Sprey Kaplama Yöntemleri.....	6
2.3. Plazma Sprey Kaplama Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları.	7
2.4. Plazma Sprey Kaplama Sistemi.....	8
2.4.1. Güç ünitesi.....	9
2.4.2. Gaz besleme ünitesi.....	9
2.4.3. Toz besleme ünitesi.....	9
2.4.4. Soğutma sistemi.....	10
2.4.5. Sprey tabancası.....	10
2.4.6. Kontrol ünitesi.....	12

2.5. Plazma Sprey Prosesi.....	12
2.6. Kaplanacak Yüzeylerin Hazırlanması.....	14
2.7. Kaplama Kalitesine Etki Eden Faktörler.....	15
2.8. Plazma Sprey Kaplamaların Uygulama Alanları.....	16
BÖLÜM 3.	
TERMAL BARİYER KAPLAMALAR (TBC).....	18
3.1. Giriş.....	18
3.2. Seramik Malzemeler.....	19
3.2.1. Zirkonya.....	20
3.2.1.1. Zirkonyanın özellikleri.....	20
3.2.1.2. Zirkonyanın kristal yapısı.....	21
3.2.1.3. Zirkonyanın kullanım alanları.....	24
3.2.2. Alümina.....	24
3.2.2.1. Alüminanın özellikleri.....	25
3.3. Bağ Tabaka	25
BÖLÜM 4.	
TAGUCHİ METODU.....	27
4.1. Giriş.....	27
4.2. Deneysel Metodların Tarihsel Gelişimi.....	28
4.3. Deneysel Tasarımı.....	29
4.4. Taguchi Felsefesi.....	30
4.5. Taguchi Metodunun Uygulama Kademeleri.....	30
4.5.1. Problemin tanımı.....	31
4.5.2. Beyin fırtınası (faktör ve seviyelerin belirlenmesi).....	32
4.5.3. Deneysel tasarımın belirlenmesi.....	33
4.5.3.1. Ortogonal diziler.....	33
4.5.3.2. Ortogonal dizilerin seçimi ve serbestlik derecesi.....	34
4.5.3.3. Faktörlerin sütunlara yerleştirilmesi.....	35
4.5.3.4. Rassallaştırma.....	36
4.5.4. Değerlerin analizi.....	37
4.5.4.1. Varyans analizi.....	37

4.5.4.2. Faktör etkilerinin grafiksel gösterimi.....	40
4.5.4.3. Sinyal / gürültü oranı.....	41
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	42
5.1. Deney Programı	42
5.2. Altlık Malzeme ve Kaplama Tozlarının Özellikleri.....	43
5.2.1. Altlık malzemenin özellikleri.....	43
5.2.2. Bağ tabaka (NiCrAlY).....	43
5.2.3. Termal bariyer kaplama ($ZrO_2 - Y_2O_3$).....	43
5.3. Kaplama İşlemi.....	45
5.3.1. Deney dizaynının belirlenmesi.....	45
5.3.2. Kaplanacak altlık malzemelerin yüzeylerinin hazırlanması...	47
5.3.3. Altlık malzemelere bağ tabakanın kaplanması.....	47
5.3.4. Altlık malzemelerin kaplanması.....	48
5.4. Termal Bariyer Kaplamaların ($YSZ - Al_2O_3$) Karakterizasyonu ve Analizi.....	49
5.4.1. Optik mikroskop ile yapılan metalografi çalışmaları.....	50
5.4.2. Yüzey pürüzlülüğü.....	52
5.4.3. Sertlik ölçümü.....	52
5.4.4. Taramalı elektron mikroskobu ile yapılan mikroyapı analizi.....	53
5.4.5. Çekme testi.....	54
BÖLÜM 6.	
DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	56
6.1. Kaplamaların Mikroyapısı ve Karakterizasyonu.....	56
6.2. Kaplama Kalınlığı.....	58
6.3. Çekme Testi.....	59
6.4. Yüzey Pürüzlülüğü.....	60
6.4.1. Yüzey pürüzlülüğü için verilerin minitab 15 ile taguchi analizinin yapılması.....	60
6.5. Kaplama Sertliği.....	61

6.6. Kaplamanın Porozitesi.....	63
BÖLÜM 7.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	67
7.1. Sonuçların Değerlendirilmesi.....	67
7.2. Öneriler.....	69
KAYNAKLAR.....	70
EKLER.....	74
ÖZGEÇMİŞ.....	75

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ANOVA	: Varyans analizi
APS	: Atmosferik plazma sprej
EDS	: Enerji dispersif spektrometresi
HVOF	: Yüksek hızlı oksiyakıt püskürtme
IPS	: İnert gaz altında plazma sprej
SEM	: Taramalı elektron mikroskop
S/N	: Sinyal - gürültü
SPS	: Su altında plazma sprej
YSZ	: Yitriya stabilize zirkonya
TBC	: Termal bariyer kaplama
VPS	: Vakum altında plazma sprej

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Plazma sprej kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması.....	6
Şekil 2.2.	Atmosferik plazma sprej kaplama sisteminin şematik olarak gösterimi.....	9
Şekil 2.3.	Toz besleme ünitesinin şematik olarak gösterimi.....	10
Şekil 2.4.	Sprej tabancasının şematik olarak gösterimi.....	11
Şekil 2.5.	F4-MB sprej tabancasının şematik olarak gösterimi.....	11
Şekil 2.6.	Kontrol ünitesinin şematik olarak gösterimi.....	12
Şekil 2.7.	Kaplama tabakalarının oluşumu ve yapışma mukavemeti.....	13
Şekil 2.8.	Plazma sprej prosesinin çalışmamızdaki uygulaması.....	13
Şekil 3.1.	ZrO ₂ – Y ₂ O ₃ denge diyagramı.....	23
Şekil 4.1.	Taguchi metodu uygulama kademeleri.....	31
Şekil 4.2.	L ₄ Lineer Grafiği.....	35
Şekil 4.3.	L ₈ Lineer Grafiği.....	36
Şekil 4.4.	Faktör Etkilerinin Grafikselsel Olarak Gösterimi.....	40
Şekil 5.1.	% 65 Metco 204NS (ZrO ₂ - % 8 Y ₂ O ₃) ve % 35 Metco 101NS (Al ₂ O ₃)'in SEM görüntüsü.....	44
Şekil 5.2.	YSZ-Al ₂ O ₃ Esaslı Kaplamanın X Işınları Difraksiyon Patternleri.	44
Şekil 5.3.	L ₉ lineer grafiği.....	46
Şekil 5.4.	Kumlama tezgahı, kumlanmamış ve kumlanmış kaplama numuneleri.....	47
Şekil 5.5.	NiCrAlY bağ tabakası kaplanmış altlık malzemeler.....	48
Şekil 5.6.	Plazma sprej kaplama prosesinin uygulaması.....	48
Şekil 5.7.	YSZ – Al ₂ O ₃ kaplanmış altlık malzemeler.....	49
Şekil 5.8.	(a) Kaba kesme cihazı, (b) Hassas kesme cihazı.....	50
Şekil 5.9.	Soğuk bakalit alma cihazı.....	50
Şekil 5.10.	Zımparalama ve parlatma cihazı.....	51

Şekil 5.11.	Optik mikroskop görüntüsü.....	51
Şekil 5.12.	Kaplanmış numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçümü.....	52
Şekil 5.13.	1 no'lu numunenin SEM görüntüsü.....	52
Şekil 5.14.	Vickers sertlik cihazı.....	53
Şekil 5.15.	9 no'lu numunenin SEM görüntüsü.....	53
Şekil 5.16.	Taramalı elektron mikroskobu.....	54
Şekil 5.17.	(a) Çekme cihazı, (b) FM-1000 yapıştırıcı, (c) Çekme numuneleri.....	54
Şekil 6.1.	9 no'lu numunenin optik mikroyapı görüntüsü.....	56
Şekil 6.2.	9 no'lu numunenin optik mikroyapı görüntüsü.....	57
Şekil 6.3.	9 no'lu numunenin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	57
Şekil 6.4.	9 no'lu numunenin NiCrAlY bağ tabakasının SEM görüntüsü...	58
Şekil 6.5.	9 no'lu numunenin SEM görüntüsü.....	58
Şekil 6.6.	Numunelerin SEM görüntüleri ve üst kaplama kalınlık değerleri.	59
Şekil 6.7.	Kaplamanın Çekme Testinde Adhezif veya Kohezif Hasarına Neden Olan Muhtemel Kusur Bölgeleri	60
Şekil 6.8.	Yüzey pürüzlülük değerlerinin analizi için S/N oranı sonuç grafikleri.....	61
Şekil 6.9.	Yüzey pürüzlülük verilerinin analizi sonucunda S/N oranına göre değerlendirme.....	61
Şekil 6.10.	Yüzey pürüzlülük verilerinin ANOVA testi.....	61
Şekil 6.11.	Üst kaplamaların Vickers Sertlik değerleri ve optik mikroskop görüntüleri.....	62
Şekil 6.12.	Kaplamaların Vickers sertlik değerlerinin analizi için S/N oranı sonuç grafikleri.....	63
Şekil 6.13.	Kaplamaların Vickers sertlik verilerinin analizi sonucunda S/N oranına göre değerlendirme.....	63
Şekil 6.14.	Kaplamaların Vickers sertlik verilerinin ANOVA testi.....	63
Şekil 6.15.	4 no'lu numunenin porozite yüzdesi hesabı.....	65
Şekil 6.16.	Kaplamaların porozite değerlerinin analizi için S/N oranı sonuç grafikleri.....	66
Şekil 6.17.	Kaplamaların porozite verilerinin analizi sonucunda S/N oranına göre değerlendirme.....	66

Şekil 6.18. Kaplamaların porozite verilerinin ANOVA testi..... 66

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Plazma gazlarının özellikleri.....	5
Tablo 3.1.	Zirkonyanın değişik kristal yapılarındaki tokluk ve mukavemet değerleri.....	24
Tablo 3.2.	Alüminanın özellikleri.....	25
Tablo 4.1.	2 seviyeli 3 faktörlü L_4 ortogonal dizisi.....	34
Tablo 4.2.	L_4 Üçgensel Tablo.....	36
Tablo 5.1.	Inconel 718'in özellikleri.....	44
Tablo 5.2.	Faktörlere karşı belirlenen seviye değerleri.....	45
Tablo 5.3.	3 seviyeli 4 faktörlü L_9 ortogonal dizisi.....	46
Tablo 5.4.	L_9 ortogonal dizisinde faktörlerin sütunlara atanması.....	46
Tablo 6.1.	Yüzey pürüzlülük değerleri (R_a).....	60
Tablo 6.2.	Kaplamaların porozite yüzdeleri.....	66

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Plazma Sprey Prosesi, Termal Bariyer Kaplama, Taguchi Metodu

Deneysel tasarım süreçleri mühendislik çalışmalarına önemli avantajlar getirmektedir. Mühendislik ve araştırma-geliştirme çalışmalarında ulaşılmak istenen başlıca hedef, gerek tasarlanan sistemin, gerekse geliştirilmek istenen ürünün maksimum performansa sahip olmasıdır. En iyi sonuçların elde edileceği şartları ortaya koyabilmek için öncelikle performansı belirleyen özellik belirlenmeli ve bu özelliği etkileyen faktörler incelenmelidir. Ardından bu faktörlerin performansı belirleyen özellik üzerindeki etkilerinin tespit edilmesi ve en uygun kombinasyonların bulunması için deneyler gerçekleştirilmelidir.

Bu çalışmada plazma sprej kaplama tekniği ele alınarak YSZ-Al₂O₃ esaslı termal bariyer kaplamaların elde edilen performans göstergesi Taguchi metodu ile değerlendirilip optimum şartlar tespit edilmiştir.

OPTIMIZATION WITH TAGUCHI EXPERIMENTAL DESIGN METHOD FOR FACTORS EFFECTING COATING QUALITY IN PLASMA SPRAYING

SUMMARY

Key Words: Plasma Sprey Process, Thermal Barrier Coating, Taguchi Method

Experimental design processes provide important advantages to engineering works. Primary objective which is wanted to reach in Engineering and research-development works, is have maximum performance of designed system and product of wanted to develop. For produce conditions to obtain the best results, firstly speciality of determine to performance must detect and factors which is effected to this speciality must examine. Than effect of this factors on the speciality of determine to performance must find and experiment must carry out for find of the best combination.

In this study, using plasma spray coating, obtained data of thermal barrier coating of YSZ-Al₂O₃ based assessment with Taguchi method and were determined optimum conditions.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Malzemelerin yüzeylerine başka bir malzemenin biriktirilmesi işlemine kaplama denilir. Kaplamalar kullanılacak malzemeye, isteğe göre değişik avantajlar sağlamaktadır. En çok aşınma, korozyondan korunma ve yüzey özelliklerini geliştirmek için kullanılırlar.

Bu yüzey biriktirme teknikleri kullanıcılar tarafından farklı alanlarda değerlendirilip kullanılırlar. Kullanılacak sistemin uygulanabilirliği; fiyat, uygulama kolaylığı, boyutu, avantajları – dezavantajları, çevreye ve çalışanlara etkisi vs. birçok etkiye bağlıdır. Kurumlar veya kişiler bu etkileri göz önüne alarak kendilerine uygun kaplama tekniğini seçer ve kullanırlar.

Günümüzde yüzey kaplama teknolojisinde, bu tekniklerden birisi olan termal sprey yöntemleri, gün geçtikçe artan performanslarıyla birçok uygulamada yer bulmuştur. Termal sprey, püskürtmeyle kaplama teknolojisinin genel adı olup; bu başlık altında birçok kaplama yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemin başlıcaları; alev sprey, ark sprey, plazma sprey, yüksek hızlı oksijen-yakıt sprey (HVOF) ve detonasyon tabancasıdır [1,2]. Çalışmamızda toz şeklindeki malzemenin iyonize olmuş bir gaz yani plazma ortamında ergitilip kaplanacak yüzeylere püskürtülmesi esasına dayanan plazma sprey yöntemi kullanılmıştır. Özellikle ısı engelleme amaçlı kaplamalarda kullanılan bu yöntem en çok havacılık ve uzay sanayisinde görülmektedir. Uygulanması kolay olan bu yöntemde zirkonya ve alümina esaslı seramiklere sık rastlanılmaktadır. CaO, MgO veya Y₂O₃ katkısı ile kısmen kararlı hale getirilen zirkonya kaplamalar aşınma, oksidasyon direncinin yüksekliği, termal şoka dayanıklılığı nedeniyle kaplama malzemesi olarak yaygın bir kullanım alanına sahiptir.

Literatür araştırmaları sonucunda YSZ-Al₂O₃ esaslı seramik kaplamaların özelliklerine kaplama tekniğinin ve kaplama parametrelerinin önemli etkilerinin olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, seçilen sprej parametrelerine bağlı olarak değişen kaplama kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve kaplamanın sertlik değerleri Taguchi deneysel tasarım yöntemi ile incelenmiştir.

Taguchi yöntemi ile prosesin çalışma şartları belirlenerek ürün parametrelerindeki değişimin en aza indirilmesi hedeflenmektedir. Bu yöntem yeni bir toz geliştirildiğinde, farklı tozların karıştırılarak kullanımında, kaplamalarda oluşan sorunların ortadan kaldırılmasında, farklı gazlar kullanılması halinde özelliklerin yeniden belirlenmesinde ve parametrelerin tespitinde kullanılmaktadır. Bu tekniğin kullanımı laboratuvar testlerini azaltmakta ve ürün kalitesini arttırmaktadır [3].

Benimsenen amaçlar doğrultusunda YSZ-Al₂O₃ tozu, F4 MB Plazma Sprej Kaplama Tezgahı'nda, Inconel 718 altlık malzemesinin üzerine kaplanmıştır. Toplam kaplama 400 – 500 µm kalınlıkta olup, ara tabaka olarak NiCrAlY kullanılmıştır. Kaplama parametreleri olarak akım, gaz karışım oranı ve tabancanın mesafesi belirlenmiştir. Taguchi deneysel tasarım yöntemine göre L₉ dizaynı seçilerek kaplama parametrelerinin kaplama kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve kaplama sertliği gibi değerlere etkisi nedenleriyle incelenmiştir. Böylece yapılan kaplamalar sonucunda istenilen özelliklerdeki kaplama parametre değerleri Taguchi yöntemi ile en az deneyle tespit edilmiştir.

BÖLÜM 2. PLAZMA SPREY KAPLAMA TEKNOLİSİ

Plazma sprej kaplama teknolojisinde ana düşünce; pahalı olmayan ana malzeme üzerine ince ve koruyucu değeri yüksek bir tabaka meydana getirmektir. Proses; bilinen herhangi bir malzeme tozunun ergime sıcaklığı üzerindeki gaz plazması içerisinde ergitilmesi ve kaplanacak yüzeye çok hızlı bir şekilde püskürtülmesiyle gerçekleşir. Böylece tok ve plastik olarak şekillendirilebilir metalik malzemelerle; yüksek sıcaklığa ve aşınmaya direnci yüksek olan seramik malzemelerin kombinasyonu mümkün olmaktadır. Bu teknoloji, aşınma ve ısı etkisiyle bölgesel olarak deforme olmuş alanların tamiratına da imkân sağlamaktadır [4,5].

Plazma sprej kaplama teknolojisi yüksek proses sıcaklığı ve spesifik özellikleriyle geniş bir alanda malzeme işlenmesine ve bunların endüstriyel sahada kullanılmasına imkan sağlar [6].

Plazma sprej kaplama, endüstriyel anlamda ilk kez 1939'da Alman bilim adamı Reinecke tarafından kullanılmış ve Amerikan firmalarınca sürekli olarak geliştirilmiştir. Plazma sprejin ilk endüstriyel uygulamaları 1960'lı yıllarda havacılık sahasında görülmüştür [7,8].

Plazma sprej kaplamada, gazların bir elektrik arkında iyonize olma özelliklerinden faydalanılır ve proseste yapılan ilk işlem plazma halini oluşturmaktır.

2.1. Plazma Prosesi

2.1.1. Plazmanın tanımı

Plazma halini ilk defa, Langmuir, eşit sayıda iyon ve elektronları ihtiva eden bir ortamı tarif etmek için kullanmıştır.

Plazma; maddenin katı, sıvı ve gaz hali yanında IV. hali olarak adlandırılan yüksek enerji düzeyine ulaşmış yoğunlaştırılmış bir gazdır [9].

Plazma oluşturmak için bir gaz kütlesine mekanik, ısı, ışın, manyetik ve elektrik enerjisi yardımıyla bir enerji vermek gereklidir. En basit ve yaygın yöntem, gaz kütlesine elektrik boşalması şeklinde enerji vermektir. Bu durum kararlı gaz yapıların bozularak denge dışı yoğun enerji bulutunun ortaya çıkmasına neden olur. Plazmanın en önemli avantajı; çok yüksek sıcaklığa çıkabilmesi ve maddelere iyi ısı transferi sağlamasıdır [10,11].

2.1.2. Plazma oluşumu

Plazma oluşumunu anlamak için gazları oluşturan atom ve moleküllerin durumu değerlendirilmelidir. Atom, çekirdek etrafında dönen elektronlara sahiptir. Atoma dışarıdan yeteri kadar yüksek bir enerji uygulanırsa en azından bir elektron kopartılarak yörüngenin dışına atılır. Uygulanan bu enerjiye iyonlaşma enerjisi denir.

İyonlaşma enerjisi; temel halde, gaz halindeki bir atomdan bir elektron koparmak için gerekli minimum enerjidir (kJ/mol). Bu tanımda atomun gaz halinde olduğu vurgulanmıştır. Bunun nedeni; iyonlaşma enerjisi ölçülürken, gaz atomlarının komşularından etkilenmemeleri ve moleküller arası etkileşmelerin ihmal edilebilir olmasıdır [12].

Kimyasal kuvvetlerle uygun bir düzenlemede bir arada tutularak en az iki atomun bir araya gelmesine molekül denir. Sadece iki atom içeren moleküllere ise diatomik molekül denir. Diatomik moleküller yapılarda yeterli seviyede enerji uygulandığında, ilk aşamada disosyasyon (parçalanma) gerçekleşirken ikinci aşamada iyonlaşma meydana gelir. Plazma hali; atomların iyonlaşması sonucu ortaya çıkmaktadır.

Plazmanın en önemli özelliği dış ortama karşı nötr olmasıdır. Ortamda pozitif iyonlar ve elektronlar aynı anda bulunur. Proseste disosyasyon, iyonlaşma ve rekombinasyon olayları sürekli bir şekilde meydana gelir [13].

2.1.3. Plazma gazları

Plazma sprey kaplama prosesinde kullanılan gazlar Ar, He, N₂ ve H₂ gazlarıdır. Kullanılacak gazın seçimi farklı özelliklere sahip olduklarından dolayı oldukça önemlidir.

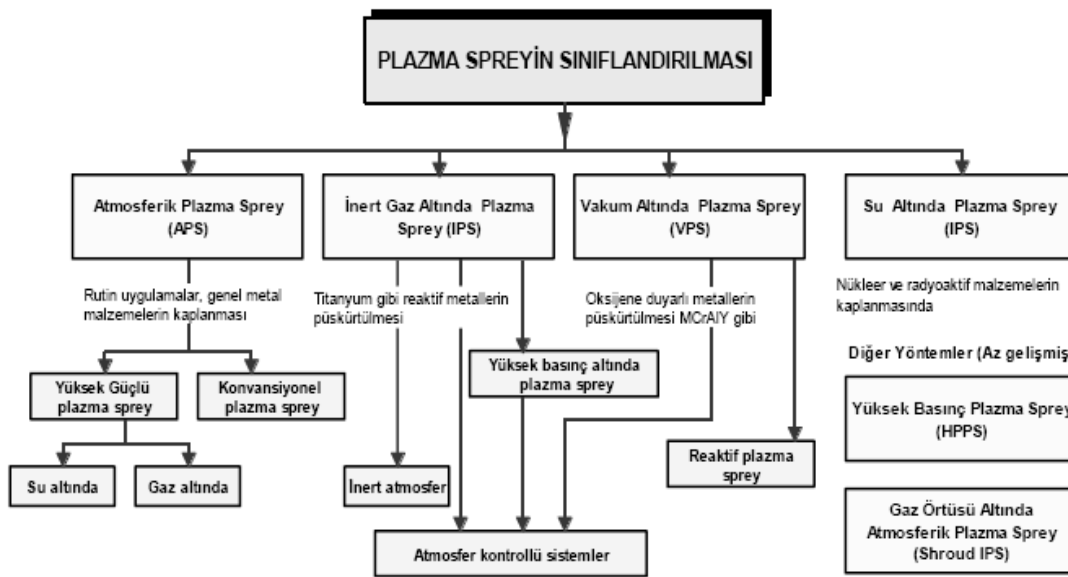
Çoğunlukla Ar ve H₂ gaz karışımları plazmayı oluşturmak için kullanılır. Ar gazı esas gaz olarak seçilir. Ar gazı N₂'ye göre daha düşük gerilimde ve yaklaşık iki kat fazla plazma ısıyı verdiği için yoğun kaplamaların üretimine olanak sağlamaktadır. N₂ nadiren plazma gazı olarak kullanılır. H₂ gazının ısıl iletim katsayısı Ar ve N₂ gazlarının neredeyse on katıdır fakat iyonlaşma sonucu ortaya çıkan plazma ısı çok daha düşüktür ve çift atomlu gaz olması nedeniyle gazın plazmaya transfer olması için daha yüksek çalışma voltajları gerektirir. Bunun için; Ar gazının yanında sisteme %5 - %25 oranlarında yardımcı gaz olarak katılır. He gazı da H₂ gibi, Ar ve N₂ gazlarına kıyasla çok daha yüksek bir ısıl iletkenliğe sahiptir. İyonlaşma sonucu oluşturduğu ısı kapasitesi H₂ gazının dört katıdır. Fakat iyonlaştırma için yüksek çalışma gerilimlerine ihtiyaç duyulur. Ar ve H₂ gaz karışımının ısıl enerjisini arttırmak için üçüncü gaz olarak sisteme ilave edilebilir. Kullanım açısından helyumun ABD'de bulunması nedeniyle Avrupa'da kullanımının çok pahalı olması bu gazın dezavantajıdır [9].

Tablo 2.1. Plazma Gazlarının Özellikleri [9]

Özellikler	Plazma Gazları			
	Ar	He	N ₂	H ₂
Relatif Mol Ağırlık	39,944	4,0002	28,016	2,0156
Özgül Ağırlık 0 °C, 100 Pa	1,783	0,1785	1,2505	0,0898
Isıl İletim Katsayısı (W/m K) x 10 ⁻³	16,3	143,6	23,8	175,4
Özgül Isı Kapasitesi (kJ/kg K) x 10 ⁻³	511	5233	1046	14268
İyonlaşma Potansiyeli (eV)	15,7	24,05	14,5	13,5
Başlangıç	27,5	54,1	29,4	-
Bitiş				
Plazma Arkı Sıcaklığı (K)	14000	20000	7300	5100

2.2. Plazma Sprey Kaplama Yöntemleri

Plazma sprej kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması atmosfer şartlarına (hava, inert gaz, vakum, su vb), plazma sprej tabancasının tipine ve kullanılan plazma parametrelerine bağlıdır [6]. Şekil 2.1.' de plazma sprej kaplama yöntemleri verilmiştir. En gelişmiş ve yaygın yöntemler “Atmosferik Plazma Sprej (APS)”, “İnert Gaz Altında Plazma Sprej (IPS)”, “Vakum Altında Plazma Sprej (VPS)” olmakla birlikte özellikle “Su Altında Plazma Sprej (SPS)” hakkında araştırmalar devam etmektedir [15].



Şekil 2.1. Plazma Sprej Kaplama Yöntemlerinin Sınıflandırılması [14]

Plazma sprej kaplama yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılan yöntem, atmosfer şartlarında gerçekleşen “Atmosferik Plazma Sprej” (APS)’ dir. Plazma tabancasından çıkan sprej partikülleri çevre atmosferi ve havanın oksijeni ile reaksiyona girerek kaplanacak malzemenin yüzeyine ulaşır ve ergimiş sprej partikülleri kısmen oksitlenir. Çalışmamızda bu yöntem kullanılacaktır.

“İnert Gaz Altında Plazma Sprej (IPS)” işlemi, inert veya koruyucu bir gaz atmosferi altında gerçekleşmektedir. Bu yöntemde genellikle Ar inert gaz olarak kullanılır. İnert gaz atmosferi eriyik sprej partiküllerini atmosferin oksitleyici etkisinden korur. Ayrıca bu yöntem, APS yöntemiyle kaplanmayan refrakter metaller gibi aktivitesi

yüksek ve parçalanmaya meyilli (TiC, TiN ve B₄C gibi) malzemelerle çalışmaya imkan sağlar [16].

“Vakum Altında Plazma Sprey (VPS)”, vakum altında veya düşük basınçlı gaz ortamında gerçekleştirilir. Sprey partikülleri seyreltilmiş bir gaz ortamından daha az soğuyarak ve daha az yavaşlayarak geçerler. Böylece kaplama daha yüksek kinetik enerjiye sahip partiküllerle üretilmiş olur. Elde edilen kaplamaların içerdikleri oksit ve porozite oranları daha düşüktür [5,17].

2.3. Plazma Sprey Kaplama Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları

Kaplama tabakalarının plazma sprej kaplama yöntemi ile oluşturulması, aşağıda maddeler halinde de belirtildiği gibi çok önemli avantajlar sağlamaktadır.

- a) Ulaşılan yüksek sıcaklıklar sayesinde yüksek erime sıcaklığına sahip seramik tozlarının eritilmesini mümkün kılmıştır.
- b) Kaplama malzemesi ve ana malzeme birbirinden bağımsız olarak seçilerek kombine edilebilmektedir. Plazma sprej kaplama tabakalarının bileşimi ve özellikleri çok geniş bir aralıkta değiştirilmekte ve özel uygulamalar için optimize edilebilmektedir.
- c) Püskürtme parametreleri değiştirilerek istenen oranda gözenek oluşturmak mümkün olabilmektedir.
- ç) Çok küçük ve büyük boyutlu parçalar kaplanabilmektedir.
- d) Son derece ileri teknoloji kullanılarak plazma spreyleme ile oluşturulan kaplamaların ekonomik performansı ve kalitesi yükseltilebilmektedir.
- e) Plazma sprej kaplama prosesi kolaylıkla bütün sistemlere entegre edilebilmektedir.
- f) Çevre dostu bir sistemdir çünkü kaplamanın yapılacağı ortam çevreden izole edilmektedir.

Plazma sprej kaplama yönteminin avantajlarının yanı sıra dezavantajları da mevcuttur. Bunlar;

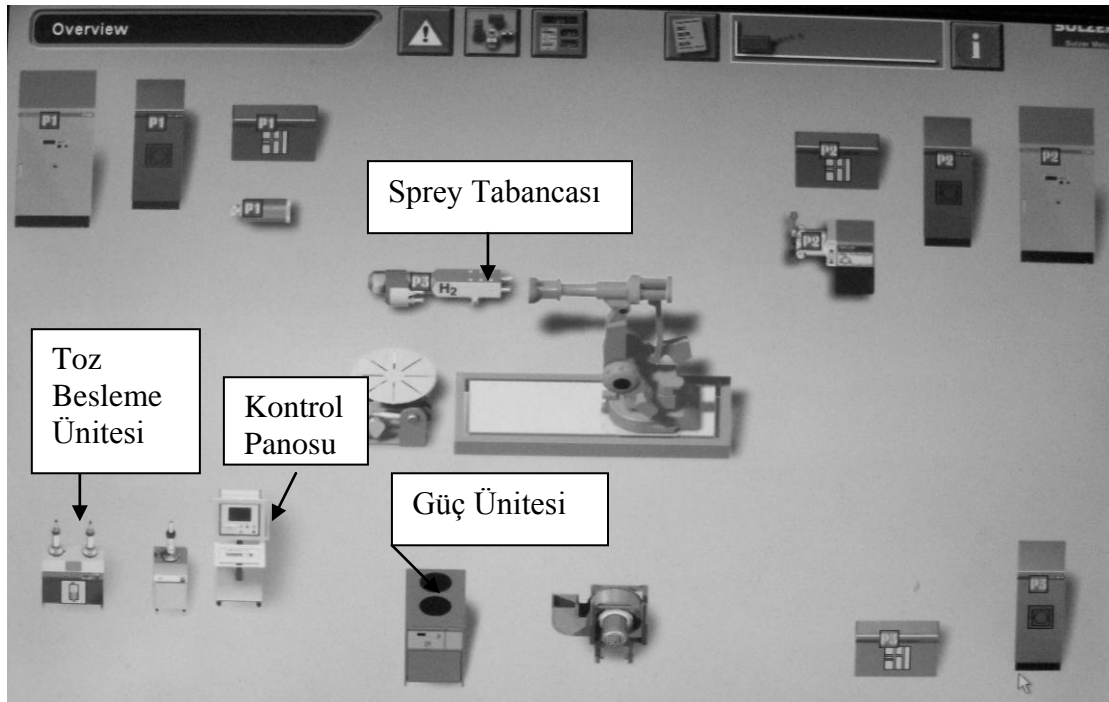
- Seramik esaslı kaplamalarda verim % 40 – 60 arasında değişmektedir. Bunun nedeni kaplama tozlarının, sprej tabancasından kaplanacak olan malzemeye ulaşıncaya kadar buharlaşması veya yörünge değiştirmesidir. Bu durum maliyeti arttırmaktadır.
- Kaplanacak olan alüminyum, çinko alaşımlı malzemeler ve ince et kalınlığına sahip malzemeler için yüksek ısıdan etkilenmelerinden dolayı ısı girdisi ayarlanmalı veya uygun bir soğutma işlemi uygulanmalıdır.
- Karbür esaslı tozların çok yüksek sıcaklıkta eriyip hızla soğuması kaplama tabacasında istenmeyen kararsız karbür fazların oluşumuna neden olur. Bu nedenle karbür esaslı kaplamanın mukavemet ve korozyon özelliklerini kötü etkilemektedir.

2.4. Plazma Sprej Kaplama Sistemi

Plazma spreyleme için gerekli ekipman, kaplamanın hangi amaçla tasarlandığına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle hava içerisinde spreyleme için genel olarak bir toz besleyicisi ile birlikte güç ve gaz kontrollü plazma tabancası elemanlarından oluşan bir sistem kullanılır. Bu tür bir sistem Şekil 2.2.' de şematik olarak gösterilmiştir.

Plazma sprej yöntemi ile kaplama işleminin gerçekleştirildiği sistem temel olarak,

- Güç ünitesi,
- Gaz besleme ünitesi,
- Toz besleme ünitesi,
- Soğutma sistemi,
- Sprej tabancası ve
- Kontrol ünitesinden meydana gelmektedir.



Şekil 2.2. Atmosferik Plazma Sprey Kaplama Sisteminin Şematik Olarak Gösterimi

2.4.1. Güç ünitesi

Gaz karışımlarının plazmayı oluşturacak şekilde iyonlaştırılması ve kaplama tozlarının tabancaya taşınması güç ünitesi ile gerçekleştirilmektedir. Plazma sprej kaplama sistemimizin gücü 2 – 220 kW' dır. Sistem ne kadar güçlüyse kaplama o kadar hızlı, verimli ve yoğun gerçekleştirilir. Bunun nedeni katoddan yayılan serbest elektronların hızının, anod ile olan potansiyel farkına bağlılığından dolayıdır.

2.4.2. Gaz besleme ünitesi

Plazma sprej kaplama prosesinde kullanılan gazlar N_2 , Ar, H_2 , He' dur. Görevi kaplama tozlarını hızlandırmak ve kaplama yüzeyine taşımak olan bu gazların, uygun karışımları ve akış hızları gaz besleme ünitesinde ayarlanır.

2.4.3. Toz besleme ünitesi

Seçilen sprej parametrelerine göre kaplama tozlarının taşıyıcı gaz yardımıyla sisteme pnömomatik olarak beslenmesini sağlayan ünite toz besleme ünitesidir. Plazma sprej

kaplama sistemimizin toz besleme hızı 40 – 80 g/dk'dır. Şekil 2.3.' de şematik olarak toz besleme ünitesi gösterilmiştir.



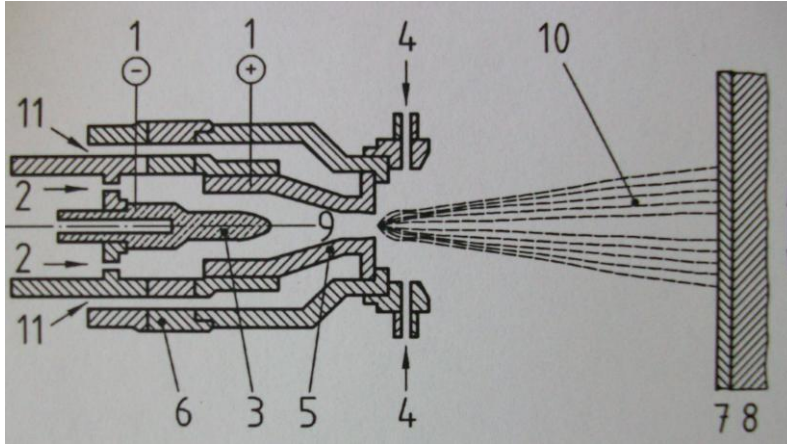
Şekil 2.3. Toz Besleme Ünitesinin Şematik Olarak Gösterimi

2.4.4. Soğutma sistemi

Çok yüksek sıcaklığa maruz kalan plazma tabancası, kaplama süresince sürekli devir daim yapan su, hava veya sıvı CO₂ ile soğutulur.

2.4.5. Sprey tabancası

Plazma sprej kaplama sistemimizin en önemli ünitesidir. Plazma oluşturulması ve tozun püskürtülmesi sprej tabancası sayesinde gerçekleştirilir. sprej tabancasının şekli şematik olarak 2.4.'de verilmiştir.

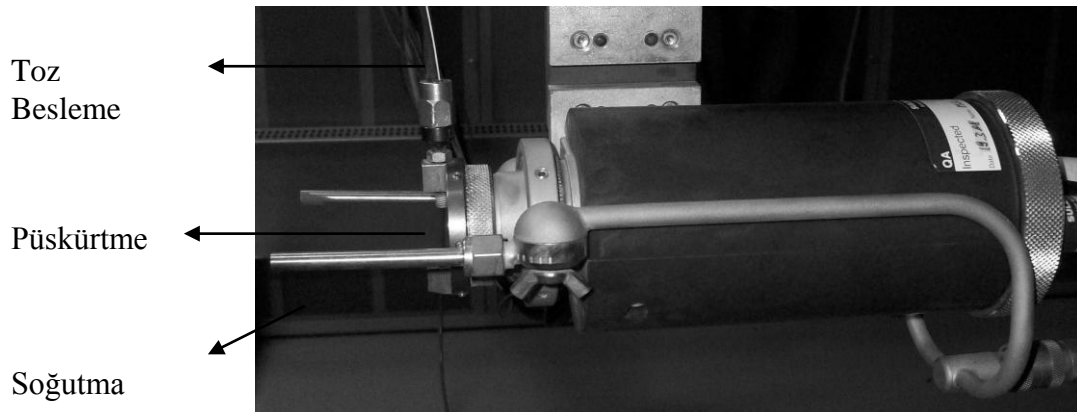


- 1 Voltaj
- 2 Plazma gazı
- 3 Katot
- 4 Toz ve taşıyıcı gaz
- 5 Anot
- 6 Yalıtkan
- 7 Biriktirilmiş Sprey
- 8 Altlık
- 9 Ark
- 10 Sprey Akışı
- 11 Soğutma suyu

Şekil 2.4. Sprey Tabancasının Şematik Olarak Gösterimi [18]

Anot olarak saf bakır ve katot olarak da tungstenin kullanıldığı sistemde, bu iki elektrot arasında oluşturulan elektrik arkı ile sisteme beslenen plazma gazları iyonize edilmekte ve böylece bilinen bütün malzemeleri ergitebilecek çok yüksek sıcaklıklar elde edilmektedir. Bu işlem bir ucu açık nozul içerisinde gerçekleştirildiğinden basınç nedeniyle açık uçtan altlık malzemesine doğru bir plazma alevi elde edilmekte olup, ortama beslenen kaplama malzemelerinin ergiyip aynı anda altlık yüzeyine püskürtülmesini sağlamaktadır. Kaplama malzemesi nozul ucunda ısıyla tamamen ya da kısmen ergimekte ve basınçlı plazma jeti ile de altlık yüzeyine yönlendirilmektedir. Bu işlemin tekrarlanmasıyla altlık yüzeyinde zaman içerisinde bir kaplama tabakası meydana gelmektedir [6].

Plazma sprey kaplama sistemimizdeki F4-MB sprey tabancasının şekli şematik olarak 2.5.'de verilmiştir.



Şekil 2.5. F4-MB Sprey Tabancasının Şematik Olarak Gösterimi

2.4.6. Kontrol ünitesi

Kontrol ünitesinde gaz karışım oranları, toz akış hızı, akım, hava basıncı, tabanca mesafesi, kaplama kalınlığı gibi kaplama kalitesini etkileyecek en önemli parametreler manüel veya bilgisayar yardımıyla ayarlanır. Plazma sprey kaplama sistemimizdeki kontrol ünitemizin şekli şematik olarak 2.6.'da verilmiştir.

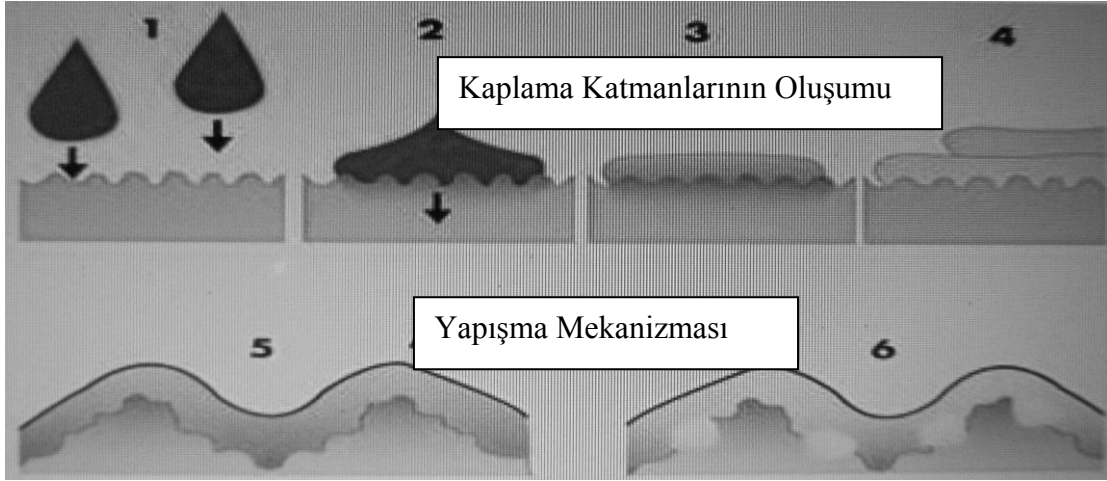


Şekil 2.6. Kontrol Ünitesinin Şematik Olarak Gösterimi

2.5. Plazma Sprey Prosesi

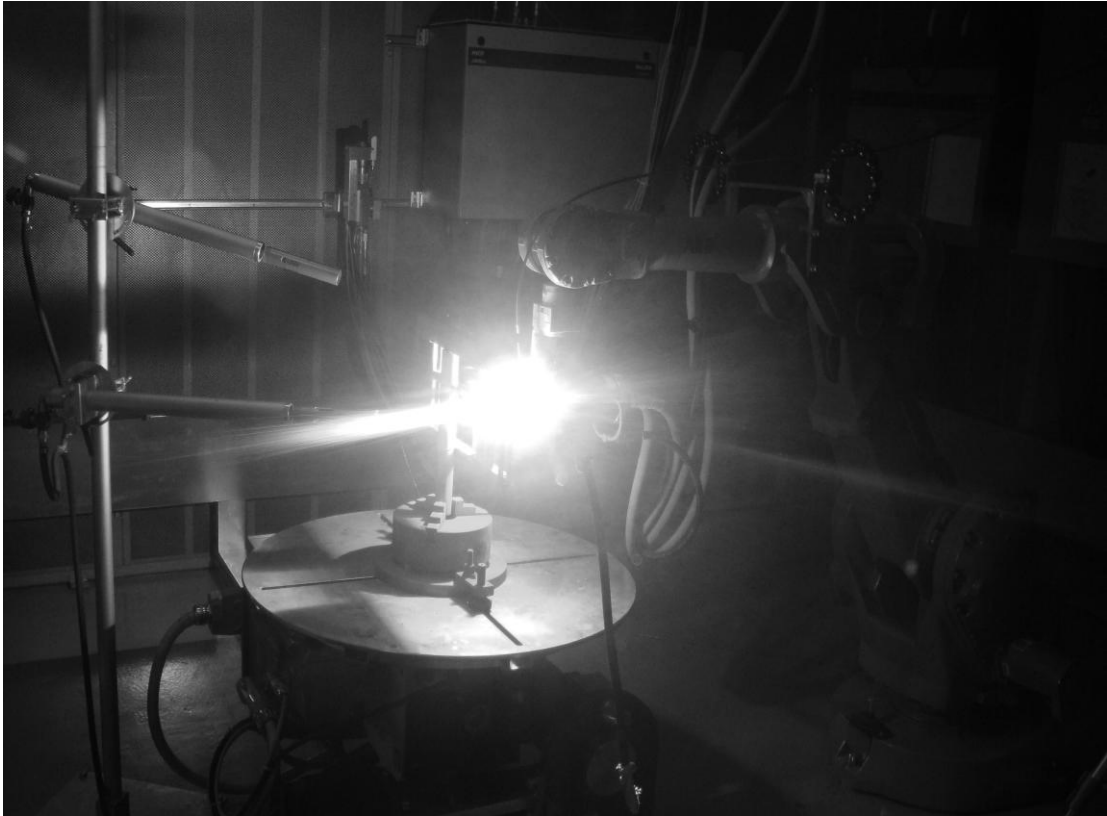
Nozul ile elektrot arasında meydana gelen elektrik arkı; plazma sprey prosesinde kullanılan gazları 1000 °C' yi aşan sıcaklıklara ısıtmak için kullanılmaktadır. Bu sıcaklıkta gazlar iyonize olmakta ve oluşan yüksek sıcaklık nedeni ile gazların hacminde büyük bir artış olmaktadır. Gazlar, nozuldaki yüksek hızlarda çıkmaktadır. Plazma jeti ses hızının birkaç katı hıza sahip olabilmektedir. Kapsama malzemesi, toz halinde bir taşıyıcı gazın yardımı ile bu yüksek enerjili plazma jeti içersine atılmaktadır. Plazma jeti içerisinde ergitilen partiküller altlık malzeme üzerine gönderilmekte ve yüksek sıcaklığın etkisiyle eriyen tozlar, kaplama yapılacak yüzeyin üzerinde hızlı bir şekilde katılarak birikmektedir. Eriyen tozlar; yüksek hızlarda altlık malzeme yüzeyine çarptıkları zaman disk şeklinde yassılaşımakta ve altlık malzemenin sıcaklığı düşük olduğu için her partikül yaklaşık olarak 10^6 Ksn⁻¹ 'lik soğuma hızları ile katılmaktadır. Bu katılma olayı, kaplama tabakalarının

oluşumu ve yapışma mekanizması olarak Şekil 2.7' de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Kaplama Tabakalarının Oluşumu ve Yapışma Mukavemeti [19]

Şekil, tane boyutu ve boyut dağılımı şeklinde özellikleri incelenen kaplama tozları, plazma spreyleme yöntemi kullanılarak yüksek kalitedeki kaplamalara dönüştürülebilmektedir. Şekil 2.8.' de plazma sprej prosesinin çalışmamızdaki uygulaması gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Plazma Sprej Prosesinin Çalışmamızdaki Uygulaması

2.6. Kaplanacak Yüzeylerin Hazırlanması

Kaplama ve altlık malzeme arasındaki yapışma mukavemetini arttırmak için altlık malzeme temizlenmeli ve kaplanacak yüzey pürüzlendirilmelidir. Optimum şartların sağlanması gerektiğinden yüzeydeki oksit filmlerin, nemin, organik veya inorganik maddelerin ortadan kaldırılması, yüzeye belirli bir pürüzlülüğün verilmesi gereklidir. Bunun için yağ giderme ve kumlama işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bu işlemlerden sonra maskeleye ve yüzey pürüzlülüğü tayini yapılarak kaplama öncesi altlık malzeme, kaplamaya hazır duruma getirilmektedir.

Altlık malzeme üzerinde bulunan yağ ve gres, kaplama sırasında yapışma mukavemetini düşürmektedir. Aynı zamanda kaplama sırasında altlık malzeme üzerindeki kirliliğin buharlaşması da kaplamayı olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle istenilen yüzey temizliğini sağlamak için kullanılan yağ giderme işlemi; düşük basınçlı suyla, 130 – 150 °C sıcaklığındaki buharla veya hidrokarbon içeren kimyasallarla yapılmaktadır.

Yağ giderme işleminden sonra kaplanacak yüzeye kumlama işlemi uygulanmaktadır. Kumlamadan amaç yüzeyi pürüzlendirip kaplanacak malzeme ile altlık malzeme arasında mekanik kilitlenmeyi sağlayarak bağlanma dayanımını arttırmaktır. Kumlama işlemi için genellikle SiC, Al₂O₃ tozları ve kuvars kumu kullanılmaktadır. Yüzey hazırlama işleminin tipi ve yüzeyin pürüzlülük derecesi kaplamanın cinsine ve kalınlığına bağlıdır. Kumlama için kullanılan havanın ve kumlama malzemesinin kuru olması gerekmektedir. Ayrıca kumlama malzemelerinin daha önce başka bir amaç için kullanılmamış olması, yağsız ve temiz olması önemlidir. Arzu edilen yüzey pürüzlülüğüne keskin köşeli kumlarla ulaşmak mümkündür. Kumlama sonucu elde edilen pürüzlülük derecesi; aşındırıcının tane boyutuna, hava basıncına, ana malzemenin yüzey sertliğine, püskürtme açısına, aşındırıcının şekline v.s. bağlıdır [20].

Kumlama işleminden sonra kaplama işlemi için çok fazla beklenmemelidir. Böylelikle kaplanacak yüzeyin istenmeyen bir şekilde tekrar oksitlenmesi azaltılabilir [21].

Maskeleme, kaplanmasını istemediğimiz yüzeylerin örtülmesi işlemidir. Yüzey pürüzlülüğü tayini ise altlık malzemenin hangi tür aşınmaya maruz kaldığının tespiti için kullanılmakta ve bu veriler ışığında kaplama işlemi için uygun malzeme ve kaplama yöntemi seçilerek kaplama öncesi yapılması gerekenler sonlandırılmaktadır.

2.7. Kaplama Kalitesine Etki Eden Faktörler

Kaplama kalitesine etki eden faktörler;

- a) Tabanca ile altlık malzeme arasındaki mesafe,
- b) Toz boyutu,
- c) Toz ve altlık malzeme cinsi,
- d) Püskürtme hızı,
- e) Tabancanın çeşidi,
- f) Gaz karışımlarının bileşimi ve
- g) Akımdır.

Tabanca ile altlık malzeme arasındaki mesafe önemli olup uygulama esnasında sabit tutulması gerekmektedir. Tabancanın altlık mesafesine yakınlığı altlık malzemenin sıcaklığını ve poroziteyi etkilemektedir. Püskürtme mesafesi az olduğunda, porozite düşük ve altlık malzemenin sıcaklığı yüksek olmaktadır. Ancak bu mesafe çok düşük olduğunda, mikro çatlaklar gelişmekte ve çekme dayanımı ile elastikiyet düşmektedir. Porozite; kaplamalarda altlık ile kaplama tabakası arasındaki yapışma mukavemetini azaltırken, kırılma dayanımını ise arttırmaktadır. Termal bariyer kaplamalarda ise, ısı izolasyonu için yüksek porozite arzu edilir [22]. Püskürtme hızı da poroziteyi etkileyen önemli faktörlerden biridir. Kaplama tozları çok çabuk püskürtüldüğünde, bu tozların ısınma ve bekleme süreleri yeterli olmadığından altlık malzeme üzerinde aynı yerde birikmelere ve dengesiz bir porozite oranına neden olmaktadır.

Toz boyutu dağılımı yine poroziteye etkileyen önemli faktörlerden biridir. Kaplama tozunun karışımında yer alan çok ince partiküller plazma sıcaklığında kolayca buharlaşır, iri taneler ise ergimeden kaplanacak yüzeye yapışır ve yapısının poroz olmasına neden olur [3]. Partiküllerin kütlesi arttıkça onların hızlanması ve son

hızları düşmektedir [23]. Aynı zamanda kaplama tozunun boyutu ve atılan paso değeri kaplama kalınlığını etkilemektedir. İç gerilmelerin artması kaplama kalınlığına bağlıdır. Tabaka içerisindeki gerilim artışı kaplamanın ana malzemeden koparak ayrılmasını teşvik etmektedir. Kaplamaların mukavemeti artan kaplama kalınlığı ile azalma gösterir. Ayrıca kaplama tabakalarının elastisite modülündeki artışlar, yüksek porozite ve oksit içeriği mukavemeti olumsuz etkiler. Tabaka lamelleri arasındaki kohezyon kuvveti, kaplamanın mukavemetini ifade etmektedir [22].

Tabancanın çeşidi kaplama prosesini değiştirmektedir. Kaplama proseslerinin parametreleri değişirken kaplama kalitesi, kullanılacak altlık malzeme ve kaplama tozu da değişmek zorundadır.

Gaz karışımlarının bileşimi ve akım, plazmanın oluşmasını etkileyen faktörlerdir. Plazmanın oluşabilmesi için çok yüksek güçte bir akım kaynağına ihtiyaç vardır. Akım gazların iyonlaşma oranlarında etkilidir.

Değişik kaplama tozlarıyla gerçekleştirilen kaplama tabakaları ve metal esaslı ana malzemeler farklı termal genleşme katsayılarına sahiptir. Kaplama tabakalarının termal genleşme davranışı ısıtma ve soğutma şartlarında önem arz etmektedir. Genelde metalik malzemelerin termal genleşme katsayısı, seramik malzemelerin genleşme katsayısından daha büyüktür. Her iki malzemenin termal genleşme katsayıları birbirine ne kadar yakın ise kaplama – ana malzeme uyumu o derece iyi olmaktadır [24].

2.8. Plazma Sprey Kaplamaların Uygulama Alanları

Plazma sprej kaplamaların en çok kullanıldığı alan, uçak endüstrisidir. Özellikle bu endüstride kullanılan termal bariyer kaplamalar (TBC), plazma sprej kaplama yöntemiyle üretilmektedir. Uçak gaz türbinlerinin yanma odaları, pervane statörleri, türbin paleleri ve pervane platformları gibi çeşitli gaz türbin parçaları sıcak gaz korozyonuna karşı dirençleri ile yüksek sıcaklık kararlılıklarını ve ısı kayıplarını arttırmak amacıyla TBC esaslı kaplamalarla kaplanır [25,26].

Otomotiv endüstrisinde dizel motorlarının piston başlıkları, subap yüzeyleri ve silindir kapakları seramik kaplamalarla kaplanmaktadır. Böylece motordaki yakıtın daha yüksek yanma sıcaklığına ulaşması, ısı kayıplarının azaltılması ve motor veriminin artırılması mümkündür [22].

Tekstil ve kağıt endüstrilerinde aşınmaya maruz kalan parçalar plazma sprej kaplama ile kaplanıp kullanılmaktadır.

Biyomedikal uygulamalarda da plazma sprej kaplamalar karşımıza çıkmaktadır. İnsan bünyesi ile uyumlu kaplamalar üretilmektedir.

Kimya ve makine endüstrisinde korozyona ve aşınmaya karşı plazma sprej kaplamalar kullanılmakta olup uzay endüstrisi başta olmak üzere birçok endüstride plazma sprej kaplamaların kullanımı yaygınlaşmıştır.

BÖLÜM 3. TERMAL BARIYER KAPLAMALAR (TBC)

3.1. Giriş

Termal bariyer kaplamalar, günümüzde özellikle ısıya dayanıklı malzemelerin önem kazandığı uçak, uzay endüstrisinde ve enerji santrallerinde kullanılmaktadır. 1950'li yıllarda NASA laboratuvarlarında termal bariyer kaplamalarla ilgili çalışmalara başlanmış ve günümüze kadar devam etmiştir. Bu çalışmaların amacı uçak ve roket motoru parçalarını korumaya yöneliktir.

Termal bariyer kaplamalar genellikle alev veya plazma sprej prosesi ile püskürtülmektedir. Alev spreyle erime noktası alev sıcaklığından yüksek olan malzemeler kaplanamamaktadır. Kolay ve ucuz olması bu yöntemin tercih nedenidir.

Plazma sprej kaplama prosesi ile bütün malzemeler kaplanabilmektedir. Bu prosesle üretilen seramik kaplamalarda ergitilerek altlık malzemeye püskürtülen her bir partikül altlık malzemeye çarparak katılır. Gelen partikülün sıcak olmasından dolayı, katılması esnasında büzülerek çekme gerilimlerinin oluşmasına neden olur. Yüze püskürtülen partiküller altlık malzemenin daha sıcak olduğundan, erimiş veya yarı erimiş partiküllerden altlık malzemeye ısı transferi oluşmaktadır. Gelen partiküllerin büzülmesi ile oluşan çekme gerilimleri kaplama içinde çatlakları oluşturur ve altlık malzeme de basma gerilimleri meydana gelir. Kaplama tabakası içinde çatlakları oluşturan diğer bir yol da altlık malzeme ve kaplama malzemesi arasındaki termal genişleme katsayısı uyumsuzluğundan kaynaklanabilir. Yüksek sıcaklıklarda, altlık malzeme genellikle seramik kaplamadan daha yüksek termal genişleme katsayısına sahip olduğundan, altlık malzemenin genişmesi kaplama içerisinde çekme gerilimlerine ve bundan dolayı da çatlakların oluşmasına neden olabilmektedir [20].

Termal bariyer kaplamalarda aranan özellikler şunlardır:

- Termal iletkenliğin düşük olması,
- Termal şoka dayanıklı olması,
- Altlık ile seramik kaplamanın termal genleşme karakteristiklerinin birbirine yakın olması,
- Mekanik gerilmelere karşı dayanıklı olması,
- Kırılma tokluğunun yüksek olması,
- Morfolojisinin sıcaklıkla değişmemesi ve
- Termodinamik kararlılıktır.

Termal bariyer kaplamalarda toz kullanılması ve püskürtme ile kaplanması yüksek poroziteye neden olmaktadır. Isı yalıtımının istendiği termal bariyer kaplamalarda porozite arzu edilen bir özelliktir. Ancak gözenekler mukavemeti düşürmektedir. Aynı zamanda porozite korozyona neden olmakta ve yapışma mukavemetini azaltmaktadır. Porozite, püskürtme şartlarına ve yüzey şartlarına bağlı olarak % 3 -20 arasında olmalıdır.

3.2. Seramik Malzemeler

Oksitli, silikatlı, nitrürlü, borürlü ve karbürlü bileşikler seramik malzemeler olarak adlandırılır. Yüksek sıcaklıkta kullanılmaya müsaittirler.

Yapıları gereği gevrek ve kırılğan olan seramik malzemeler, metalik malzemeler ile birlikte kullanılarak olumlu neticeler elde edilmiştir. Metalik malzemelerin oksidasyon, korozyon dirençleri ve yüksek sıcaklıktaki davranışları seramik malzemeler ile kullanılarak geliştirilmiştir. Seramik malzemeler bileşik halinde bulunmaları sebebiyle daha kararlı yapıya sahiptirler. Yüksek sıcaklıklarda kararlı yapıya sahip seramik seramikler metal malzemelerin yüzeylerini koruyucu kaplama amacıyla kullanılmaktadırlar. Kararlılık; malzemenin çeşitli ortamlarda yüksek sıcaklık, oksidasyon, hidrasyon, buharlaşma ve redüklenmeye karşı direnç göstermesidir. Gevrek yapıya sahip seramik malzemeler, dönüşümler sırasında parçalanma özelliği gösterirler. Yüksek sıcaklık kaplamalarında metalik malzeme ile

seramik kaplama malzemesinin genleşme miktarları arasındaki farkın büyük olması halinde kırılma ve dökülmeler de büyük olacaktır [3].

Seramik malzemeler, istenmeyen özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla kararlı hale getirilmiştir. Kararlı hale getirme çeşitli oranlarda bir veya birkaç seramik ilavesi ile gerçekleşmektedir. Yarı veya kısmen kararlı hale getirilen seramikler mukavemet, aşınma direnci ve genleşme miktarı açısından metalik malzemelerle daha uyumlu hale getirilmektedir.

3.2.1. Zirkonya

Zirkonya yer kabuğunda % 0,02 – 0,03 oranında ve Cu, Ni, Pb ve Zn gibi metallere daha bol miktarda ve iki farklı mineral formunda bulunmaktadır. Bunlardan ilki badelleyit (ZrO_2) olup Brezilya'da bulunmaktadır. Zirkonya silis ile birleşik oksit halinde bulunmaktadır. Bu bileşik oksitlerle birlikte az miktarda hafniyum oksit de bulunmaktadır. İkinci mineral formu ise zirkon ($ZrSiO_4$) olup Hindistan, Avustralya ve Florida'da bol miktarda bulunmaktadır.

Zirkonya aşağıda belirtilen yöntemlerle üretilmektedir.

- a) Klorlama ve termal parçalama
- b) Alkali oksit ilavesi ile parçalama
- c) Fluosilikat ilavesi ile parçalama
- d) Kalsiyum oksit ilavesi ile parçalama
- e) Plazma tekniği ile parçalama

3.2.1.1. Zirkonyanın özellikleri

Zirkonya içeren seramikler, termal bariyer kaplamalarda sıkça karşımıza çıkmaktadır. İleri teknoloji malzemeleri olarak kabul edilen bu seramik malzemelerin tercih edilmesinin sebebi şunlardır.

- Erime sıcaklığının yüksek olması,
- Asidik kimyasal maddelere, cürufa ve cama karşı direncinin yüksek olması,
- Korozyon, erezyon ve aşınmaya karşı dayanıklı olması,

- Düşük termal genleşme katsayısına sahip olması,
- Kırılma indisinin yüksek olması,
- Yüksek sıcaklıkta iyonik iletkenliğe sahip olmasıdır.

3.2.1.2. Zirkonyanın kristal yapısı

Zirkonya belli başlı üç farklı kristal yapısına sahiptir. Monoklinik, tetragonal ve kübik kafes sistemleri en belirgin yapılardır. Monoklinik faz 1170 °C'ye kadar kararlı olup, bu sıcaklıkta tetragonal faza, tetragonal faz 2370 °C'ye kadar kararlı olup, bu sıcaklıkta kübik faza dönüşmektedir. Bundan sonra 2680 °C olan ergime sıcaklığına kadar kübik faz mevcuttur. Ancak, zirkonya sıcaklığa bağlı olarak değişik faz yapılarına sahip olduğundan, soğutma sırasında tetragonal→monoklinik faz dönüşümü ile monoklinik fazda hacimce % 5 - 8 oranında artma meydana gelmektedir. Tetragonal→monoklinik faz dönüşümü sebebi ile meydana gelen bu hacimce genleşme seramiklerde bazı durumlarda tokluk ve mukavemet için avantaj sağlamaktadır. Çoğu durumda ise bu davranış malzemede çok zararlı etkilere neden olmaktadır [20].

Yüksek sıcaklıklarda kullanılan zirkonyanın faz dönüşümleri nedeniyle zarara uğramaması amacıyla stabilizörler yardımıyla tamamen veya kısmen stabilleştirme işlemi uygulanmaktadır. Stabilleştirme işlemi ile yapının genellikle tetragonal olmak üzere tek fazdan oluşması sağlanmaktadır. Bu faz stabilizörler yardımıyla oda sıcaklığında da kararlılığını sürdürmektedir. Sabitleştirici olarak MgO, CaO, CeO₂ veya Y₂O₃ yaygın olarak kullanılmaktadır [27].

ZrO₂ – CeO₂ İkili Sistemi:

CeO₂ ile stabilleştirilmiş zirkonyada stabilleşme mekanizması oksijen boşluklarının konsantrasyonu tarafından etkilenmektedir. Serya ile stabilleştirilmiş zirkonyanın püskürtülmesi esnasında CeO₂, Ce₂O₃ oluşturma eğilimi göstermektedir. Oksijen boşluklarının miktarı püskürtme esnasında yüzeyin soğumasına bağlıdır. Örneğin, yoğunlaştırma süresince yüzey sıcaklığının düşürülmesi, püskürtmeden sonra daha fazla miktarda Ce₂O₃ oluşumunu teşvik eder. Oksijen boşluklarının varlığı yüksek

sıcaklık fazlarının (kübik ve tetragonal) stabilleşmesine neden olmakta ve sonuç olarak yarı kararlı faz kompozisyonu elde edilmektedir. Stokiyometrik denklik, havada ve düşük sıcaklıkta sistemi tavlama ile sağlanabilmektedir. Bu tavlama işlemi tamamen oksitlenmeye neden olduğundan dönüşüme uğramış faz konsantrasyonu değişiminde dikkate değer etki oluşturmaktadır [27].

Zirkonya - serya alaşımında kullanılan CeO_2 miktarı % 12, 15, 20 ve 25 olarak tavsiye edilmekle beraber, % 25 CeO_2 kullanımında dahi, püskürtmeden sonra yapıda bir miktar kübik faz, daha düşük değerler için ise monoklinik faz bulunabilmektedir. Yine aynı şekilde Brandon ve Taylor, yapının tamamen tetragonal olabilmesi için tavlama işini önermektedir [28].

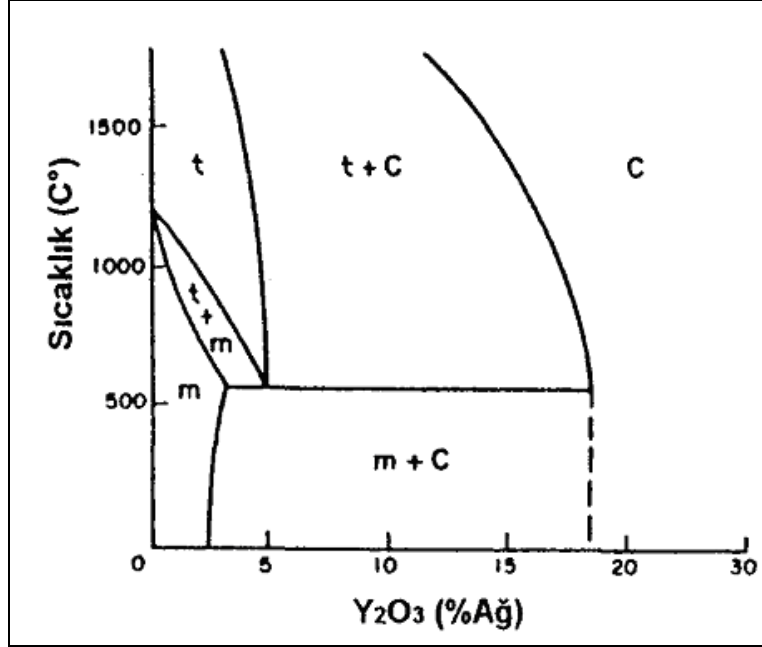
Tavlama veya termal çevrim ile püskürtülmüş kaplamaların tane yapısının büyümesi muhemeldir. Holmes ve Pilsner yaptıkları çalışmada, $\text{ZrO}_2 - \text{CeO}_2$ kaplamalardaki tane boyutunun, termal çevrim sonunda püskürtülmüş haldeki tane boyutunun 15 – 20 katına ulaştığını belirtmişlerdir [29].

$\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$ İkili Sistemi:

Termal şok hasarından korunmak amacıyla termal bariyer kaplama ömrünü arttırmada kullanılan stabilizatörler için Y_2O_3 en etkin karaktere sahip olmaktadır. Brandon ve Taylor, çalışmalarında % 8 Y_2O_3 ilavesi ile püskürtme işleminden sonra kaplamanın % 100 tetragonal faza sahip olacağını göstermektedirler. Ancak bu tür kaplamaların 1200 – 1600 °C’ de tavlama neticesinde orijinal tetragonal faz dekompoze olarak tetragonal ve kübik olmak üzere iki yüksek sıcaklık denge fazına ayrılmaktadır. Oda sıcaklığına soğutma sırasında, yüksek yitriyalı kübik faz olduğu gibi kalabilmekte veya yüksek yitriyalı tetragonal faza dönüşebilmektedir. Düşük yitriyalı faz ise monoklinik faza dönüşerek $\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$ ikili sistemleri için de hasar oluşumuna neden olabilmektedir [30].

Şekil 3.1.’de verilen $\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$ denge diyagramında faz dönüşümleri ve fazların kararlılık noktaları karmaşıktır. 600 °C’ de ve yaklaşık % 3 mol Y_2O_3 ile ötektoid nokta elde edilmektedir. Artan % Y_2O_3 oranları için tetragonal + kübik faz karışım

aralığı genişlemektedir. Daha yüksek oranda Y_2O_3 ilavesi ile oda sıcaklığında kararlı kübik faz elde edilmektedir.



Şekil 3.1. $ZrO_2 - Y_2O_3$ Faz Diyagramı (T = Tetragonal Faz; M = Monoklinik Faz; C = Kübik Faz)

$ZrO_2 - CaO$ ve $ZrO_2 - MgO$ İkili Sistemleri:

MgO veya CaO ile stabilize edilmiş ZrO_2 kaplamalarda, termal çevrim süresince stabilize edicilerin uçması kaplama kararlılığını bozduğu için ayrı bir hasar mekanizması olarak görülmektedir [21].

CaO , MgO ve Y_2O_3 gibi oksitlerin zirkonyayı kübik formda stabilize edici olarak kullanılmasının sebebi, bu tür oksitlerin kübik kristal yapısına sahip olması ve katyon yarıçaplarının zirkonyanınkine yakın olmasıdır [31].

ZrO_2 'in Mekanik Özellikleri:

ZrO_2 'in değişik kristal yapılarındaki kırılma mukavemeti ve tokluk değerleri Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Zirkonyanın Değişik Kristal Yapılarındaki Tokluk ve Mukavemet Değerleri

Kristal Yapısı	Kırılma Mukavemeti (MPa)	Tokluk (MPa/m ²)
Kübik	245	2 - 8
Monoklinik + Kübik	320	3 - 9
Tetragonal + Kübik	650	10

Tablo 3.1.'den görüldüğü gibi tetragonal + kübik yapıdaki ZrO₂'in mekanik özellikleri diğer kristal yapılara göre daha iyidir.

3.2.1.3. Zirkonyanın kullanım alanları

Zirkonyanın mekanik özelliklerini iyi olmasından dolayı, geniş bir kullanım alanı vardır.

Kullanıldığı alanlar: Isıtıcı elemanlar, yalıtım malzemeleri, refrakter malzemeler, kesici aletler, aşınmaya dayanıklı makine parçaları, seramik kaplamalar, yakıt hücreleri, devreler, türbin kanatları, pompalar vs.

3.2.2. Alümina

Alüminyum oksit veya alümina (Al₂O₃) yaygın kullanım alanına sahip çok önemli bir oksit seramik olup üretimi yaklaşık 35 milyon tonun üzerindedir. Bu üretimin yaklaşık % 93'ü alüminyum metalinin üretiminde kullanılmaktadır. Kalan miktar aşındırıcı ve parlaticı endüstrisinde, refrakter endüstrisinde, elektronik endüstrisinde, zırh yapımında ve seramik sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır [32].

Yüzde 99.9 safiyette olan tozlar hariç tüm Al₂O₃ tozları Bayer Prosesi ile boksit mineralinden üretilmektedir. Bu işlemde ıslak alkali yöntemi kullanılmaktadır. Yöntemde sodyum alüminat oluşturmak suretiyle Al₂O₃'i Fe₂O₃ ve diğer oksitlerden ayrıştırılmaktadır. Hidroliz yöntemi ile sodyum alüminat Al(OH)₃ ve daha sonra kalsinasyon işlemi ile Al₂O₃ 'te dönüştürülmektedir. Alüminyum oksit seramikler yaygın kullanım alanına sahip olup dayanımlarını % 90 oranında 1100 °C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda dahi koruyabilmektedir. Bu nedenle kesme takımlarında, aşındırıcılarda, yüksek sıcaklıklarda çalışan yatak ve burçlar gibi çok çeşitli

mekaniksel parçalarda kullanılmaktadır. Yüksek safiyette alüminyum oksit tozları alüminyum tabanlı tuzların (sülfat, klorat, nitrat) ayrıştırılması ile üretilmektedirler [33, 34, 35].

3.2.2.1. Alüminanın özellikleri

Çok sert bir malzeme olan alümina termal ve kimyasal olarak karardır. Dayanımı, aşınma direnci, kimyasal kararlılığı dışçılık ve kemik implant/protez uygulamaları için ideal bir malzemedir. Tek olumsuz özelliğı kırılğan olmalarıdır. Alümina içine kuvvetlendirici vazifesi gören ikinci bir faz dağıtılarak daha yüksek sertlikte, mukavemette ve kırılma tokluğunda kompozit malzemeler üretmekte ve yeni güvenilir kullanım alanları geliştirilmektedir.

Alümina Alüminanın bazı fiziksel özellikleri Tablo 3.2.'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Alüminanın Özellikleri [36, 37]

Özellikler	Alümina
Yoğunluk (g/cm ³)	3,7 – 3,9
Sertlik	Mohs 9
Erime Noktası (°C)	2015
Çalışma Sıcaklığı (°C)	
Havada	1600 – 1700
Azot Ortamında	2000
Termal İletkenlik Watt/m. °C	17 - 30

3.3. Bağ Tabaka

Altık ve kaplama malzemesi arasındaki bağlanma özelliklerini ve kaplama ömrünü arttırmak amacıyla, bağ tabaka uygulaması yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sayede korozif gazların altık malzeme yüzeyine ulaşımı engellendiğı gibi aynı zamanda kaplama ve altık malzeme arasındaki termal genleşme ve elastisite modülü uyumsuzluğunun ortaya çıkardığı dezavantaj da giderilmeye çalışılmaktadır. Genel

olarak, bir ara kaplama kullanımının kaplanmış sistemin bağlanma dayanımını da arttırdığı söylenebilmektedir [38].

Bağ tabaka kullanımının bir diğer nedeni de arzu edilen kimyasal özellikleri, kaplama sistemine dahil etmesi olarak verilebilmektedir. Paslanmaz çelik gibi bazı altlık malzemeler, kumlama esnasında korozyona dayanıklı ince film tabakalarını kaybetmektedirler. Böyle bir altlık malzemeye direk olarak bir oksitli seramik bileşiğinin uygulanması, altlık malzemenin paslanmasına neden olabilmektedir. Nikel – krom bir bağ tabaka kullanımı, bu istenmeyen sonucu giderebilir.

Bağlayıcı malzemenin, işlem sıcaklığında oksidasyona ve korozyona karşı direncinin yüksek olması gerekmektedir. Bu özelliklere sahip MCrAlY alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımlardan en çok tercih edileni ise CoCrAlY veya NiCrAlY'dır. Genellikle yaklaşık 50 – 200 µm kalınlığında bağ tabaka atılmaktadır.

BÖLÜM 4. TAGUCHİ METODU

4.1. Giriş

Üretimi yapan işletmeler, mamullerini müşterilerinin beklentilerinin ötesinde sunabilmek için sürekli rekabet içerisindedirler. İşletmelerin, müşterilerine fonksiyonunu yerine getirebilen, daha kaliteli, daha ucuz ve daha hızlı ürünler ulaştırabilmek için gösterdikleri çaba, kalite geliştirme bilincinin hızla yayılmasına sebep olmuştur. İşletmeleri yöneticileri işletmelerinin verimliliklerini artırmak ve rekabet avantajlarını yükseltmek için, kalitenin sadece üretim hattında değil mamul ve proses tasarımı aşamalarında da doğru bir şekilde planlanmasının gerektiği bilincindedirler [40].

Kalite iyileştirme ve geliştirme, pek çok organizasyonun rekabet edebilmesi ve ayakta kalabilmesi için en temel faaliyetler haline gelmiştir [41].

Bu doğrultuda üretim yönetimi araçlarında da gelişmeler olmuş ve günümüz gereksinimleri için teknikler ortaya konmuş ya da yıllardır teoride kalmış yöntemler uygulama alanına geçirilmiştir. Bunlardan biri de, özellikle sanayileşmiş ülkelerde kullanılmakta olan deney tasarım teknikleridir. Tasarım için teklif edilen istatistiksel deneyler, ürün parametrelerinin ve parametre sayılarının artması sonucu, ürün maliyetinin yükselmesine ve hızlı bir şekilde neticeye ulaşılamadığından dolayı da uygulanabilirliğini tamamen yitirmektedir. Ancak Taguchi uzun yıllar yaptığı çalışmalar sonucunda çok az deneme ile çok iyi neticeler veren ortogonal dizileri geliştirmiştir [42].

Ortogonal diziler eş zamanlı olarak faktör seviyelerini değiştirmektedir. Ürünlerin kaliteli olmasının yanı sıra kalite geliştirmede çok daha az deneme ile daha iyi sonuç alma imkanını vermektedir. Bu yüzden pek çok sektörde kabul görmüştür.

Çalışmamızda Taguchi metodu ile prosesin çalışma şartları belirlenerek ürün parametrelerindeki değişimin en aza indirilmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda istenilen özelliklerdeki kaplama parametreleri, Taguchi metodu kullanılarak en az deneyle tespit edilmiştir.

4.2. Deney Metotlarının Tarihsel Gelişimi

16 – 17. yüzyılda Francis Bacon (1581 – 1626) araştırmaların ancak doğru planlanmış deneylerle değişkenlerin etkilerini çözümleyebileceklerini savunmuştur. “Experimentum Crucis” adlı eserinde, deneyde sadece bir faktör A değiştirildiğinde ve diğer faktörler ve şartlar aynı kaldığında, gözlem değerindeki farklılıkların nedeni A faktörüdür açıklamasına yer vermiştir [43].

Daha sonra uygulanan “One factor at a time” metodu, 20. yüzyıla kadar değişmez deney tasarımı olarak kalmıştır. Bu düşünce ancak Ronald Alymer Fischer (1890 – 1962) tarafından değiştirilmiştir. Fischer modern matematik odaklı istatistiğin kurucusudur. 1925 yılında “Statistical Methods For Research Workers” başlıklı eseri yayınlanmış ve bunu 10 yıl sonra yazdığı temel eser olan “The Design of Experiments” takip etmiştir [44].

Fischer’in kesin olarak koyduğu sonuçlar “One factor at a time” metodunun araştırmalar için faydalı, uygun bir metot olmadığıdır. Bunun nedeni biyolojik, tıp ve teknolojik problemlerin çözümünde bu metodun faktörlerin karşılıklı etkileşimleri konusunda çok az bir açıklama yapmasıdır. Buna karşın çok faktörlü deney tasarımları, faktörlerin birbirlerinden bağımsız etkileşimleri durumunda, aynı işlem yoğunluğunda çok daha doğru sonuçlar doğurmaktadır [45].

Böylece Fischer faktöriyel deney tasarımı veya kısmi faktöriyel tasarım adı verilen modern deney planlarının ilk uygulayıcısıdır. Bugün bile çoklu faktöriyel varyans analizi, ortogonal polinomlar yardımı ile değerlendirme metotları, tam veya kısmi faktöriyel deney planları gibi genellikle kullanılan yöntemler Fischer’in eserlerinde yer almaktadır [46].

1937 yılında Fischer'in yardımcısı olarak beraber çalıştığı L.H.C. Tippet kısmi faktöriyel deney planlarını tasarlayarak uygulamıştır. Daha sonraları Cochran ve Cox, Davies, A. Linder, yakın zamanda da Box, Hunter, Hicks, Scheffler ve G.Taguchi bu geleneğe devam ettiler ve eserlerini yayınlayarak modern deney tasarımı metotlarına büyük katkıda bulundular [47].

Taguchi deney tasarımlarında genellikle kısmi faktöriyel deney planlarını başlangıç olarak göz önünde bulundurmuş ve ortogonal sahaların tanımını yaparak yeni ve işletmelerde çalışanların kolayca uygulayabilecekleri deney metodunu ortaya koymuştur [48].

4.3. Deney Tasarımı

Taguchi metodunun temelini oluşturan deney tasarımı, 1920'lerde istatistik biliminin babası sayılan İngiliz istatistikçi Sir Ronald Fisher tarafından, tarım alanında araştırmalar yaparken bulunmuş ve geliştirilmiştir. Fisher ayrıca deney verilerinin analizi için bugün klasik sayılan "Varyans Analizi (ANOVA)" yöntemini de geliştirmiştir. Yöntem, kısa bir süre içinde, Amerika'da tarım sektöründe üretimin geliştirilmesi için yoğun olarak uygulanmış ve Amerika'nın bu alanda dünyada lider konumuna gelmesine büyük katkıda bulunmuştur. Tarım alanında, çeşitli gübre ve dozları ile iklim koşullarının ve sulama düzeylerinin çeşitli ürünlere olan etkilerini belirlemek üzere uygulanmıştır [40].

1970'lere kadar deney tasarımı son derece kısıtlı kalmıştır. 1980'lerin başında Japon kalitesinin nedenlerini araştıran Amerika'da imalat sektörü deney tasarımını yeniden keşfetmiştir. O tarihlerde istatistiksel deney tasarımı, kalitenin geliştirilmesi için Japonya'da Genichi Taguchi'nin liderliğinde çok etkin bir biçimde uygulanmıştır. Aynı zamanda sanayi uygulamalarına yeni fikirler ortaya atılmış ve başarılı uygulamalar sergilenmiştir. Deney tasarımı bu nedenden dolayı imalat sektöründe kabul görmüştür.

Taguchi metodu; ürünlerin kalitesinin iyileştirilmesinde etkili olmasının yanı sıra, kalite geliştirmede çok daha az deneme ile daha iyi sonuç vermektedir. Bunun

yanında felsefe olarak, kalitenin tasarım ve proseste sağlanmasını öngörmektedir [48].

4.4. Taguchi Felsefesi

Taguchi'nin kalite felsefesinin yedi temel elemanı vardır [49].

- a) Bir ürünün kalitesinin boyutu; onun toplumda meydana getirdiği kayıptır.
- b) Rekabetin olduğu bir pazarda kalite geliştirme çalışmaları kaçınılmaz bir zorunluluktur.
- c) Kalite geliştirme çalışmaları ürünün nominal değerden sapmasını azaltmak amacını hedeflemektedir.
- d) Ürünün performansından dolayı tüketicilerin maruz kaldığı kayıp; o ürünün nominal değerden sapma miktarının karesiyle orantılıdır.
- e) Bir ürünün kalitesi ve maliyeti, o ürünün tasarım ve mühendislik prosesi tarafından belirlenir.
- f) Bir ürünün performansındaki sapmayı azaltmak için, o ürünün performans karakteristikleri üzerinde etkili olan parametrelerin olumsuz etkilerini azaltmak gerekir.
- g) İstatiksel deney metotları; o ürünlere ait performans değişikliğine etki eden faktörleri ortaya çıkarmak amacı ile kullanılır.

4.5. Taguchi Metodunun Uygulama Kademeleri

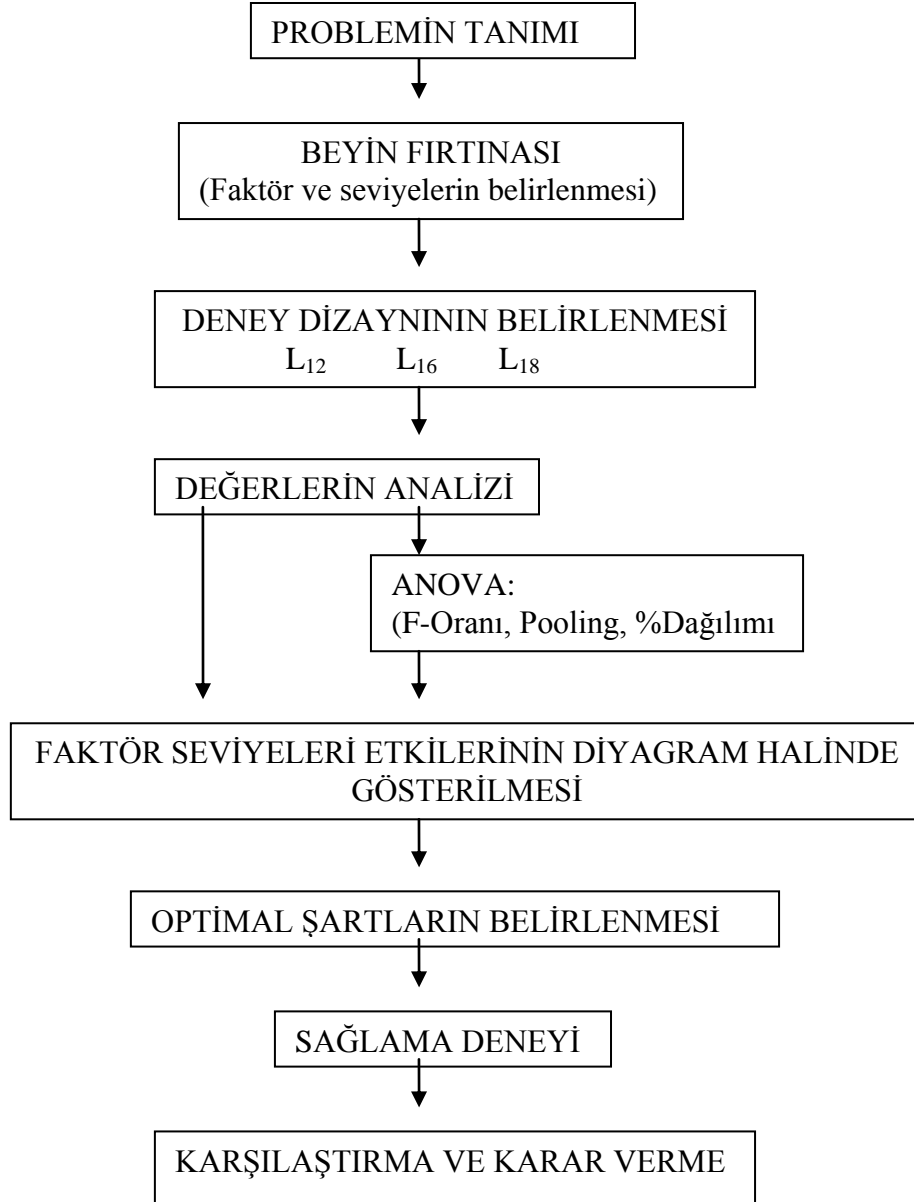
Deney planları Taguchi tarafından parametre dizaynı olarak tanımlanmakta olup, amacı ürün veya proses parametrelerinin, ürün özelliklerinin optimum seviyeye erişmesini sağlayan ve gürültü faktörlerine karşı en az etkileşimde bulunan değerlerin ortaya konulmasıdır [40].

Bir optimizasyon çalışması 5 ana bölümden oluşur [50]. Bunlar;

1. Deneylerin planlanması,
2. Deneylerin yapılması,
3. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi,

4. Deney sonuçlarının doğrulanması,
5. Standartlaştırmadır.

Şekil 4.1.'de belirtildiği gibi Taguchi metodu uygulama kademeleri gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Taguchi Metodu Uygulama Kademeleri [51]

4.5.1. Problemin tanımı

Problemin tanımı, deneyin kurulabilmesinde çok önemlidir. Daha önce karşılaşılan herhangi bir problemin çözümünde veya Kaizen felsefesi gereği yapılan sürekli

kalite geliştirme çalışmalarında tespit edilmiş herhangi bir aksaklık üzerinde durularak problem tespit edilmektedir.

4.5.2. Beyin fırtınası (faktör ve seviyelerin belirlenmesi)

Beyin fırtınası tekniği; problem belirlendikten sonra deney yapısını tartışmak üzere prosesle ilgili uzmanların bir araya gelerek önerilerde bulunmasıdır. Bu öneriler ışığında faktör ve seviyeler belirlenebilmektedir.

Faktör; deneyde ilgilenilen olay üzerindeki etkileri incelenen kontrollü veya kontrolsüz değişkenlerden her biridir. Faktör; ısı derecesi, saniye birimindeki zaman gibi nicelik olabileceği gibi, farklı tezgâhlar, farklı operatörler, anahtarın kapalı/açık olması durumlarındaki gibi nitelik de olabilir.

Bir faktörün seviyeleri, deneyde incelenmekte olan faktörlerin alabileceği değerlerdir. Nicelik faktörlerinde seçilen her bir değer, bir seviye şekline gelir. Örneğin eğer deney dört farklı ısıda yapılacaksa, ısı faktörünün dört seviyesi vardır. Nitelik faktörlerinde ise anahtarın açık veya kapalı olması anahtar faktörünün iki seviyesini göstermektedir.

Deneyde ilk önce performans karakteristiklerini etkileyeceği düşünülen tüm faktörler göz önünde bulundurulur. İlk deneyde az seviyesi olan çok sayıda faktör kullanımı tercih edilmelidir, çünkü ilk deneyin amacı bazı önemsiz faktörleri elemine etmek ve mamulün problemi ile ilgili ya da kalite değerini arttırmaya katkıda bulunan önemli birkaç faktörü belirlemektir [52].

Performans karakteristiğini etkileyen faktörler belirlendikten sonra bu faktörlerin kaç değişik seviyede inceleneceğinin belirlenmesi gerekmektedir. Faktörlerin kademeleri en az iki olmak üzere üç veya daha çok olabilir. Ancak seviyeleri iki veya üç olarak belirlemek büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

4.5.3. Deney dizaynının belirlenmesi

4.5.3.1. Ortogonal diziler

Taguchi, çok sayıda deneysel durumu açıklamak için ortogonal dizileri oluşturmuştur. Ortogonal düzenin en önemli özelliği, birçok faktörün minimum sayıda test ile değerlendirilmesini sağlaması ve klasik metottan farklı olarak faktör kademelerini teker teker değiştirmek yerine eş zamanlı olarak değiştirme yapmayı önermektedir [53,54].

Örneğin 2 seviyeli 7 faktörden oluşan bir deneyde geleneksel yok tercih edildiğinde deney sayısı $2^7 = 128$ olur. Burada 2 seviye sayısını, 7 ise faktör sayısını göstermektedir. Tamamlanmış faktöriyel deneyler sadece birkaç faktör incelendiğinde kabul edilebilir, çok sayıda faktör incelendiğinde pek kullanışlı değildir. Zaman ve finansman açısından kısıtların bulunması dolayısıyla tamamlanmamış faktöriyel deneyler tercih edilmemektedir. Oysa istatistikçiler kısmi faktöriyel deneyler diye bilinen daha etkili test planları geliştirmişlerdir. Kısmi faktöriyel deneyleri, tüm faktör etkileri ve sadece bazı etkileşimleri kestirebilmek için tüm kombinasyonların sadece bir kısmını kullanmaktadır. Taguchi tarafından gerçekleştirilen 8 denemeli L_8 dizisi bu deney için uygundur. Yapılacak 8 deney ile istenilen analizler yapılabilir ve $128 - 8 = 120$ deney yapmak için geçen süre ve maliyetten tasarruf edilir. Aynı zamanda istatistiksel açıdan da proses ya da tasarımların genellikle bağıl olarak daha az parametre ile de uygun olarak ifade edilebileceği göz önünde bulundurulduğunda tam faktöriyel tasarım ve denemenin çok gerekli olmadığı da bir gerçektir [55].

Ortogonal dizilerden en çok kullanılanları 2 ve 3 seviyeli faktörler için geliştirilmiş dizilerdir. Tablo 4.1.'de 2 seviyeli 3 faktörlü L_4 ortogonal dizisi örnek verilmiştir.

Tablo 4.1. 2 Seviyeli 3 Faktörlü L_4 Ortogonal Dizisi

Deneme No	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

4.5.3.2. Ortogonal dizilerin seçimi ve serbestlik derecesi

Ortogonal dizilerin seçiminde, öncelikle her bir faktörün serbestlik derecesi ve serbestlik derecelerinin toplamı olan toplam serbestlik derecesi hesaplanmaktadır. Toplam serbestlik derecesi, hangi ortogonal diziyeye uygunsa o tercih edilmektedir. Toplam serbestlik derecesi hesaplanırken, faktörler arasında etkileşimin olup olmadığını da göz önünde bulundurmamak gerekmektedir.

Bir faktörün serbestlik derecesi seviye sayısının 1 eksiğidir [56].

$$v_A = k_A - 1 \quad (4.1)$$

v_A : A faktörünün serbestlik derecesi

k_A : A faktörünün seviye sayısı

Eğer varsa karşılıklı etkileşimin incelenmesi durumunda (AxB) serbestlik derecesi, faktörlerin serbestlik dereceleri çarpımına eşittir.

$$v_{(AxB)} = v_A \times v_B \quad (4.2)$$

$v_{(AxB)}$: (AxB)'nin serbestlik derecesi

v_A : A faktörünün serbestlik derecesi

v_B : B faktörünün serbestlik derecesi

Böylece deneyin asgari serbestlik derecesi; faktörlerin ve varsa karşılıklı etkileşimlerin serbestlik derecelerinin toplamına eşittir. Deney planı toplam serbestlik derecesi ise, seçilen ortogonal dizideki deney sayısının 1 eksiği olmaktadır.

$$v_T = N - 1 \quad (4.3)$$

v_T : Deneş planı toplam serbestlik derecesi

N : Deneş sayısı

Örneğın; 2 seviyeli 7 faktörün etkileri incelenmek istendiğında ve karşılıklı etkileşim mevcut olmadığında aşağıda belirtilen işlemler gerçekleştirilir.

$$\left. \begin{array}{l} v_A = 2 - 1 = 1 \\ v_B = 2 - 1 = 1 \\ v_C = 2 - 1 = 1 \\ v_D = 2 - 1 = 1 \\ v_E = 2 - 1 = 1 \\ v_F = 2 - 1 = 1 \\ v_G = 2 - 1 = 1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} v_T = N - 1 \\ N = 8 \text{ olduğundan ideal ortogonal dizi } L_8 \text{ seçilmektedir.} \end{array}$$

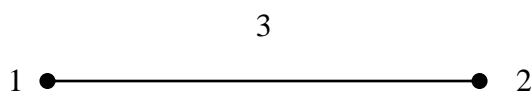
4.5.3.3. Faktörlerin sütunlara yerleştirilmesi

Taguchi, faktörlerin ve varsa etkileşimlerin yerleştirilmesi için iki yöntem geliştirmiştir [50]. Bunlar;

- Lineer grafikler ve
- Üçgensel tablolardır.

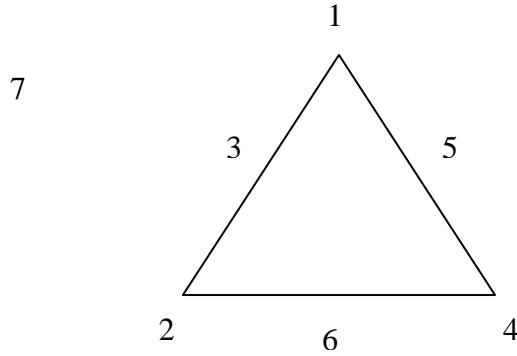
Lineer grafikler veya üçgensel tablolar faktörlerin ve varsa etkileşimlerin ortogonal dizide hangi sütunlara yerleştirildiğini göstermektedir. Bu grafik ve tablolar, Taguchi tarafından standartlaştırılmış olup, uygun ortogonal diziye göre seçilmektedir.

Lineer grafiklere bir örnek Şekil 4.2.'de verilmiştir. 1. sütuna A faktörü, 2. sütuna B faktörü, 3. sütuna ise AxB etkileşimi veya C faktörü yerleştirilmektedir.



Şekil 4.2. L_4 Lineer Grafiğı [56]

Şekil 4.3.'de aynı mantıkla kurulmuş farklı bir lineer grafik örneği verilmiştir. 1, 2, 4 ve 7 numaralı sütunlara A, B, C ve D faktörleri yerleştirilmektedir. 3, 5 ve 6 numaralı sütunlara ise varsa AxB, AxC ve BxC etkileşimleri veya E, F ve G faktörleri yerleştirilmektedir.



Şekil 4.3. L₈ Lineer Grafiği [56]

Üçgensel tablo, etkileşen faktörlerin hangi sütunlara yerleştirileceğinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Tablo 4.2.'de üçgensel tabloya bir örnek verilmiştir. Ortogonal diziye atanacak ilk faktör herhangi bir sütuna atanabilir, örneğin 2. sütuna. İkinci bir faktör de herhangi bir sütuna atanabilir, örneğin 3. sütuna. Eğer A faktörü 2. sütuna, B faktörü de 3. sütuna atanırsa, üçgensel tablo AxB etkileşiminin 1. sütunda olması gerektiğini belirlemektedir [57].

Tablo 4.2. L₄ Üçgensel Tablo

Sütun		B	
		2	3
A	1	3	2
	2	1	AxB

4.5.3.4. Rassallaştırma

Yukarıda belirtilen bilgiler ışığında faktörler sütunlara yerleştirilmektedir. Deney esnasında oluşabilecek olumsuz etkileri önlemek için, denemeler sıra ile değil rasgele belirlenerek yapılmaktadır. Ancak bazı deney düzeneklerinde faktörlerin değiştirilmesi zor ve pahalı olabilmektedir. Bu gibi durumlarda bloklar halinde

rassallaştırma uygulanmaktadır. Yani değiştirilmesi zor aynı faktörler art arda yapılarak kolay çözüm yoluna gidilmektedir.

4.5.4. Değerlerin analizi

Denemeler için tek gözlem yapılması riskli olmakla beraber doğru ölçümün yapılabilmesi için denemeler birden fazla tekrarlanmalıdır. Eğer ekonomik açıdan denemeler çok pahalı ise, bir deneme kullanılabilir.

Deney sonuçlarının kaydedilmesinde en iyi yöntem, bilgisayar ortamında hazırlanan formların kullanılmasıdır. Örneğin Minitab 15 paket programı, deneyde kullanılması düşünülen dizayn, ilgili menüden girildiği takdirde ,deney sonuçlarının kaydedilmesi için hazır bir form vermektedir [39].

4.5.4.1. Varyans analizi

Deneysel verilerin yorumlanmasında ve gerekli kararların verilmesinde varyans analizi yani ANOVA istatistik metotları uygulanmaktadır. ANOVA denemeler arasındaki performans farklılığını ortaya koymak için kullanılan istatistiğe dayalı bir araçtır. Varyans analizi, toplam varyasyonu bileşenlerine ayıran matematiksel bir tekniktir ve serbestlik derecesi, kareler toplamı, ortalama kareler (varyans) vb. gibi niceliklerin hesaplanmasında kullanılmaktadır [52].

Kareler Toplamı (Varyasyon):

A ve B gibi iki faktörün ve bu faktörlerin arasında etkileşimin toplam varyasyonu aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{A \times B} + SS_e \quad (4.4)$$

SS_T : Toplam kareler toplamı

SS_A : A faktörünün kareler toplamı

SS_B : B faktörünün kareler toplamı

$SS_{A \times B}$: A ve B faktörü etkileşiminin kareler toplamı

SS_e : Ortogonal dizide boş bırakılmış olan kolonların kareler toplamı (hata kareler toplamı)

$$SS_T = \left[\sum_{j=1}^N y_j^2 \right] - \frac{T^2}{N} \quad (4.5)$$

N : Deneme sayısı

T : Tüm gözlemlerin toplamı

y_j : j. Gözlem

$$SS_A = \frac{(A_1 - A_2)^2}{N} \quad (4.6)$$

A_1 : A faktörü 1. seviyesinde olduğunda gözlenen sonuçların toplamı

A_2 : A faktörü 2. seviyesinde olduğunda gözlenen sonuçların toplamı

Serbestlik Derecesi:

4.1, 4.2 ve 4.3'de serbestlik dereceleri formülleri verilmiştir. Hata serbestlik derecesi, toplam serbestlik derecesinden tüm faktör ve etkileşimlerin serbestlik dereceleri çıkartılarak bulunmaktadır.

$$v_e = v_T - v_A - v_B - v_{A \times B} \quad (4.7)$$

v_e : Hata serbestlik derecesi

Varyans:

Bir faktörün varyansı, faktöre ait kareler toplamının, o faktöre ait serbestlik derecesi ile bölümünden elde edilen değere eşittir.

$$V_A = \frac{SS_A}{v_A} \quad (4.8)$$

V_A : A faktörünün varyansı

F Testi:

Testler yapıp sonuçlar elde edildikten ve varyanslar bulunduktan sonra, hangi faktörlerin önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermek için F testi uygulanmaktadır.

Standart F testi uygulanırken, hataların eşit sapmalarla normal dağıldığı ve bağımsız olduğu varsayılmaktadır. F testi varsayımları yerine getirilmediği takdirde önem derecesi hesapları doğru sonuçları yansıtmayabilir. Bununla birlikte standart F testinin varsayımlardan sapmalara karşı duyarsız olması nedeniyle bazı varsayımları sağlamasa da kullanılabilirliği belirtilmektedir [55].

Taguchi, hangi faktörlerin performansı etkilediğini tanımlamaya çalışmaktadır ve F oranını referans değer olarak kullanmaktadır. F değeri, istatistiksel olarak faktöriyel etkinin büyüklüğünü değil varlığını göstermektedir.

Deneyde elde edilen F değerleri, F tablosundan bulunan F oranı ile karşılaştırılmış ve bu değerden küçük F değerine sahip faktör veya etkileşimler hata faktörüne ilave edilmiştir.

$$F_A = \frac{V_A}{V_e} \quad (4.9)$$

F_A : A faktörüne ait F değeri

Faktörlerin varyasyonu azaltmadaki gücünü ifade eden katkı yüzdesi bulunmadan önce karelerin net toplamları hesaplanmaktadır.

$$SS'_A = SS_A - (V_e) (v_A) \quad (4.10)$$

SS'_A : A faktörünün karesinin net toplamı

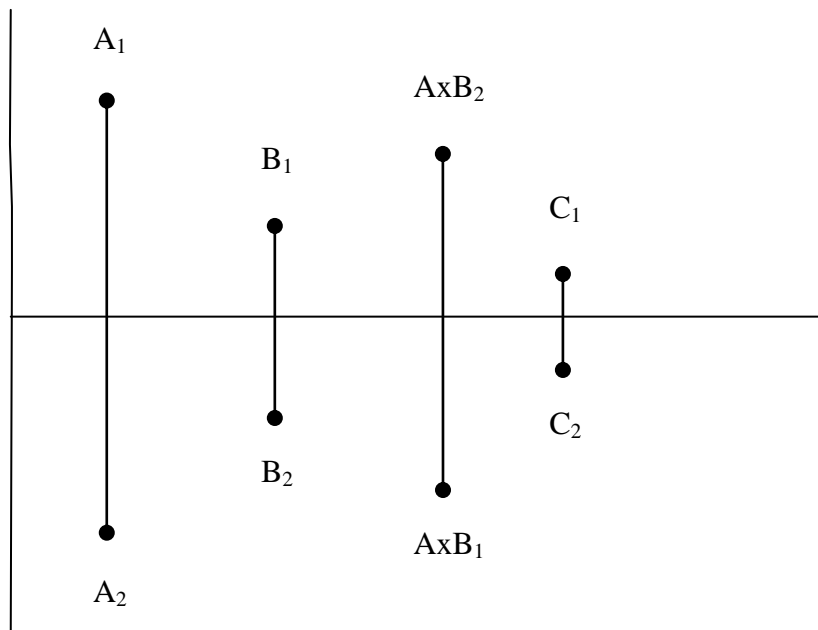
$$P_A = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100 \quad (4.11)$$

P_A : A faktörünün katkı yüzdesi

4.5.4.2. Faktör etkilerinin grafiksel gösterimi

Bu metot da faktör ve etkileşime ait farklı seviyelerdeki gözlemlerin ortalamaları bulunmaktadır. Bunların büyüğü ve küçüğü belirlenip, tüm ortalama değerlerini kapsayan düşey bir skala çizilmektedir. Tüm verilerin ortalamasını gösteren genel ortalamadan yatay bir çizgi çizilmektedir. Her bir faktörün yüksek seviyedeki ve düşük seviyedeki ortalamaları grafikte işaretlenmekte ve bu noktalar birleştirilmektedir. Bu noktalardan biri genel ortalama çizgisinin altında diğeri ise üzerinde olmalıdır. Bunlar genel ortalamadan eşit uzaklıktadır [58].

Lochner ve Matar'a göre deneysel tasarımın kullanımının en önemli sebebi, sonuçlardaki değişkenliği minimize edecek faktör seviyeleri kombinasyonunu bulmaktır. Bu sebeple, varyans analizinin yerine faktör etkilerinin grafiksel gösterimini tavsiye etmektedirler [58].



Şekil 4.4. Faktör Etkilerinin Grafiksel Olarak Gösterimi

4.5.4.3. Sinyal / gürültü oranı

Gürültü faktörleri sistemi etkileyen ancak pratikte yönlendirilemeyen büyüklüklerdir. Dış gürültü faktörleri, iç gürültü faktörleri ve imalatla ilgili gürültü faktörleri olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Dış gürültü faktörlerine örnek vermek gerekirse; bir otomobil için sıcaklık ve yağıştır. İç gürültü faktörlerine örnek ise; bir malzemede meydana gelen gerilimler olabilir [59].

Performansın ölçütü sinyal-gürültü (S/N oranı) olup, ürün kalitesinin değerlendirilmesi anlamını taşımaktadır. Performansın seviyesi S/N oranı ile belirlendiği gibi aynı zamanda gürültü faktörlerinin performansa olan etkilerini de ortaya koymaktadır [51].

S/N oranı, ortalama değer ve varyansın göz önünde tutularak objektif bir değerlendirme ölçütüdür ve aşağıda verilen 3 standart koşul bazında saptanılmaktadır.

- En büyük en iyi
- En küçük en iyi
- Nominal en iyisi

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Deney Programı

Bu çalışmada; plazma sprej kaplama prosesiyle uygulanan termal bariyer kaplamaların Taguchi metoduyla optimizasyonu sağlanmıştır. F4 MB Plazma Sprej Kaplama Tezgahı'nda, Inconel 718 altlık malzemesinin üzerine termal bariyer kaplama atılmıştır. Toplam kaplama 400 – 500 µm kalınlıkta olup, ara tabaka olarak NiCrAlY kullanılmıştır. Kaplama parametreleri olarak akım, gaz karışım oranı ve tabancanın mesafesi belirlenmiştir. Taguchi deneysel tasarım yöntemine göre L₉ dizaynı seçilerek sprej parametrelerine bağlı olarak değişen kaplama kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve kaplamaların sertlik değerleri Taguchi deneysel tasarım yöntemi ile incelenmiştir. Böylece yapılan kaplamalar sonucunda istenilen özelliklerdeki kaplama parametre değerleri Taguchi yöntemi ile en az deneyle tespit edilmiştir.

Çalışmamızda yapılanların sırası şöyledir:

1. Deney dizaynının belirlenmesi,
2. Kaplanacak altlık malzemelerin yüzeylerinin hazırlanması,
3. Altlık malzemelere bağ tabakanın kaplanması,
4. Altlık malzemelerin kaplanması,
5. Metalografik çalışma, çekme testi, yüzey pürüzlülüğü ve mikrosertlik ölçümlerinin gerçekleştirilmesi,
6. Deney sonuçlarının Minitab 15 programı ile değerlendirilmesi,
7. Deney dizaynında en iyi sonuçları veren parametre değerlerinin saptanması ve yorumlanmasıdır.

5.2. Altlık Malzeme ve Kaplama Tozlarının Özellikleri

5.2.1. Altlık malzemenin özellikleri

Çalışmamızda altlık malzeme olarak Inconel 718 kullanılmıştır. Inconel 718, Ni – Cr alaşımıdır. Korozyona karşı dayanıklı olan bu malzemenin 700 °C’ nin üzerinde kopma dayanımı iyidir. Inconel 718’in kimyasal bileşimleri ve fiziksel özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 5.1. Inconel 718’in Özellikleri

Kimyasal Bileşimi (%)	Ni (+Co): 50 -55 Cr: 17 – 21 Nb(+Ta): 4,75 – 5,5 Mo: 2,8 – 3,3 Co: 1
Yoğunluk (g/cm ³)	8,19
Erime Noktası (°C)	1260 - 1336
Sertlik (HRc)	36
Eğilme Mukavemeti (MPa)	1240

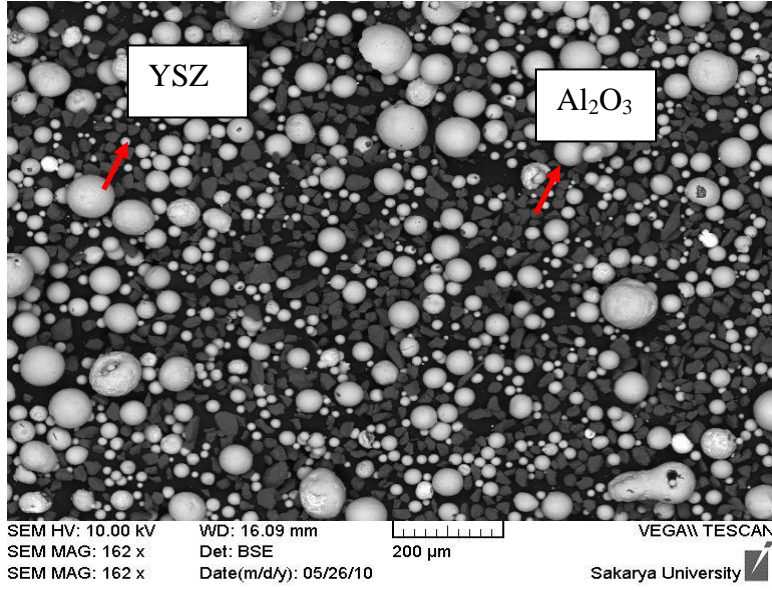
5.2.2. Bağ tabaka (NiCrAlY)

Altlık ve kaplama malzemesi arasındaki bağlanma özelliklerini ve kaplama ömrünü arttırmak amacıyla, bağ tabaka uygulaması yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle yaklaşık 50 – 200 µm kalınlığında bağ tabaka atılmaktadır. NiCrAlY kimyasal içeriği : % 22 Ni, % 10 Cr, % 10 Al, % 1 Y. Termal genleşme katsayısı 13 - 16 a (C⁻¹) 10⁶’ dır. Elastik modülü 200 GPa’ dır.

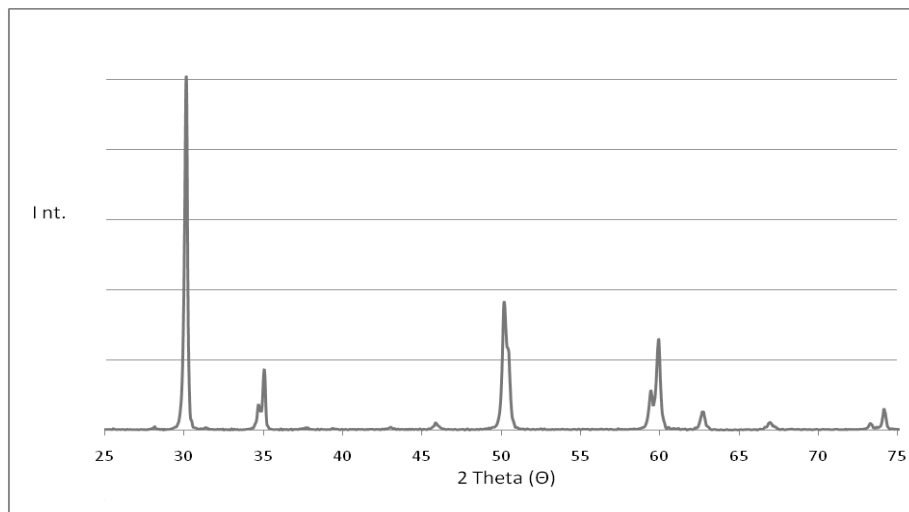
5.2.3. Termal bariyer kaplama (YSZ – Al₂O₃)

Termal şok hasarından korunmak amacıyla termal bariyer kaplama ömrünü arttırmada ZrO₂, stabilizatör % 8 Y₂O₃ ile kullanılmaktadır. Metco 204NS (ZrO₂ - % 8 Y₂O₃)’in ve Metco 101NS (Al₂O₃)’in kullanıldığı çalışmamızda SEM

(Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüsü şekil 5.1.'de verilmiştir. Çalışmamızda optimum şartları elde edeceğimizi düşündüğümüz % 65 YSZ ve % 35 Al_2O_3 homojen bir şekilde karıştırılmıştır. YSZ' ye alüminanın katkısı mekanik özellikleri iyileştirmektedir. Literatür araştırmaları sonucunda % 35 Al_2O_3 katkısı optimum şartları sağlamaktadır.



Şekil 5.1. % 65 Metco 204NS (ZrO_2 - % 8 Y_2O_3) Ve % 35 Metco 101NS (Al_2O_3)'ın SEM Görüntüsü



Şekil 5.2. YSZ- Al_2O_3 Esaslı Kaplamanın X Işınları Difraksiyon Patternleri

5.3. Kaplama İşlemi

5.3.1. Deney dizaynının belirlenmesi

Çalışmamızda belirlenen plazma sprej kaplama prosesini etkileyen faktörler:

- Akım,
- Gaz karışım oranı ve
- Sprej mesafesidir.

Bu faktörlerde incelenmek istenen değerler aşağıdaki tabloda verilmektedir.

Tablo 5.2. Faktörlere Karşı Belirlenen Seviye Değerleri

	1.Seviye	2.Seviye	3.Seviye
A.Akım	575 A	600 A	625 A
B.Gaz Karışım Oranı	40/8	40/10	40/12
C.Sprej Mesafesi	100 mm	120 mm	150 mm

Faktörler arasında etkileşim olmadığı kabul edilmektedir. Denklem 4.1' e göre serbestlik dereceleri aşağıda hesaplanmıştır.

$$\begin{array}{l}
 v_A = 3 - 1 = 2 \\
 v_B = 3 - 1 = 2 \\
 v_C = 3 - 1 = 2
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} v_A \\ v_B \\ v_C \end{array}} \right\} \text{Toplam serbestlik derecesi} = 6$$

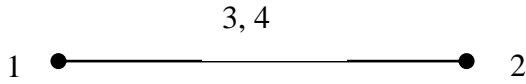
Denklem 4.3'e göre toplam serbestlik derecesi seçilecek dizayndaki deney sayısının 1 eksiğine eşit veya küçük olmalıdır. 3 seviyeli deney dizaynları incelendiğinde, seçilmesi gereken dizaynın L₉ olması gerekmektedir. Çünkü L₉ 'da uygulanması gereken deney sayısı 9, bir eksiği 8 ve belirlenen serbestlik derecesi 6'dan büyüktür.

Aşağıdaki tabloda L₉ ortogonal dizisi verilmektedir. Bu tabloya göre faktörler sütunlara yerleştirilmiştir.

Tablo 5.3. 3 Seviyeli 4 Faktörlü L₉ Ortogonal Dizisi

	1	2	3	4
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Faktörlerin sütunlara yerleştirilebilmesinde L₉ lineer grafiği dikkate alınmaktadır.

Şekil 5.3. L₉ Lineer Grafiği

Yukarıdaki lineer grafiğe göre A faktörü 1. sütuna, B faktörü 2. sütuna, eğer etkileşimler varsa 3. ve 4. sütuna yerleştirilmelidir. Ancak çalışmamızda etkileşim olmadığı kabul edildiğinden C faktörü 3. sütuna yerleştirilmelidir.

Faktörlerin hangi sütunlara nasıl yerleştirileceği aşağıdaki tabloda verilmektedir.

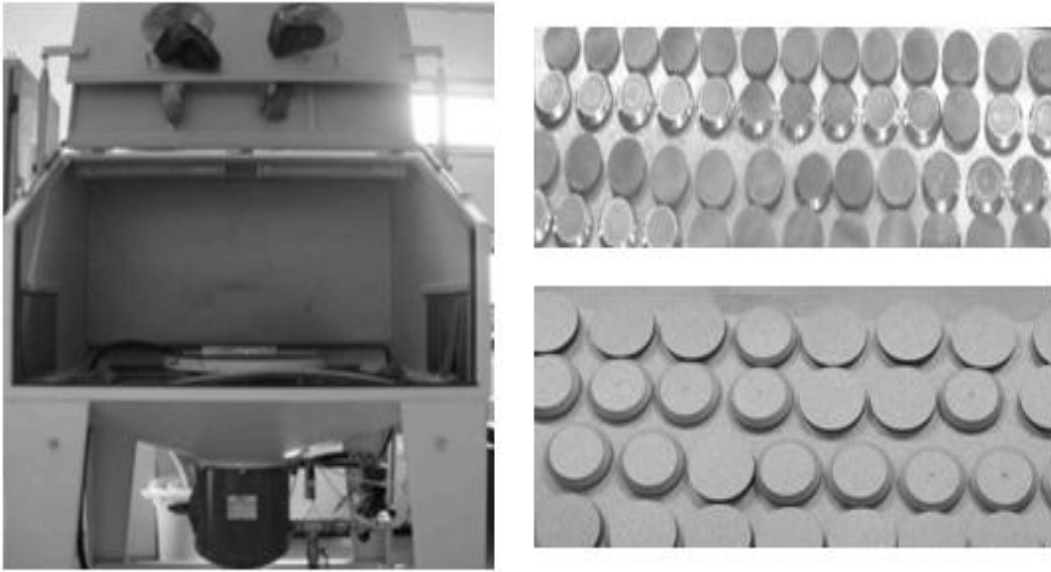
Tablo 5.4. L₉ Ortogonal Dizisinde Faktörlerin Sütunlara Atanması

		1	2	3	4
Sıra No	Deney No	A	B	C	-
1	7	575 A	40/8	100 mm	1
2	4	575 A	40/10	120 mm	2
3	1	575 A	40/12	150 mm	3
4	5	600 A	40/8	120 mm	3
5	2	600 A	40/10	150 mm	1
6	8	600 A	40/12	100 mm	2
7	3	625 A	40/8	150 mm	2
8	9	625 A	40/10	100 mm	3
9	6	625 A	40/12	120 mm	1

Deney numaraları bloklaştırma yöntemi kullanılarak sıralanmıştır. Bunun nedeni sprey mesafesinin değiştirilmesinin zorluğudur.

5.3.2. Kaplanacak altlık malzemelerin yüzeylerinin hazırlanması

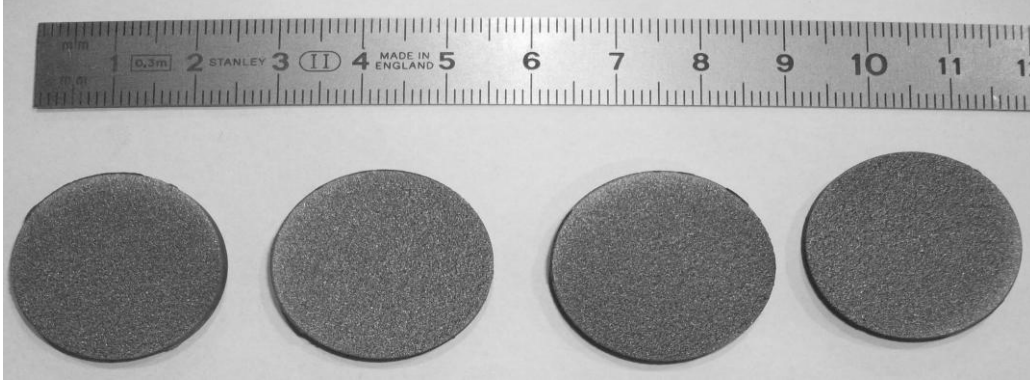
İyi bir yapışmanın sağlanabilmesi ve kaplanacak yüzeyin çevre şartlarından etkilenmemesi için yüzeyin temizlenmesi gerekmektedir. Yüzeylerin temizlenmesi için alkol kullanılmış ve ısı ile yağların yakılması sağlanmıştır. Bir sonraki aşama kumlama işlemi olup kaplama yapılacak yüzey kumlama işlemine tabi tutulmuştur. Yüzeyi pürüzlendirmek için de kullanılan bu yöntemde kumlama malzemesi 35 grit Al_2O_3 'dir. Kumlama basıncı yaklaşık 8 bar'dır. Kumlama yüzeyi ile tabanca açısı 75° 'dir.



Şekil 5.4. Kumlama Tezgahı, Kumlanmamış ve Kumlanmış Kaplama Numuneleri

5.3.3. Altlık malzemelere bağ tabakanın kaplanması

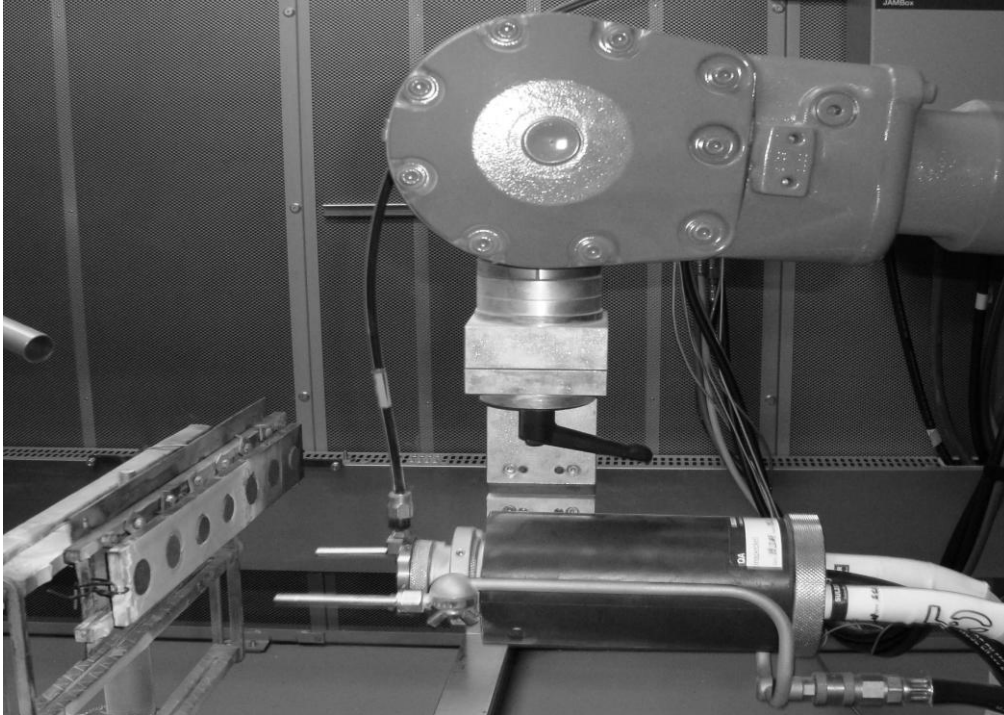
Altlık malzeme yüzeylerine önce NiCrAlY bağ tabakası atılmıştır. Bağ tabakamız yaklaşık 125 – 150 μm kalınlıktadır. Bu kalınlığı sağlamak için 5 paso bağ tabaka atılmıştır. Sprey mesafemiz 150 mm iken, Ar/H₂ oranımız 50/5'dir. NiCrAlY tozu plazma sprey prosesi ve F4 MB sprey tabancasıyla püskürtülmüştür.



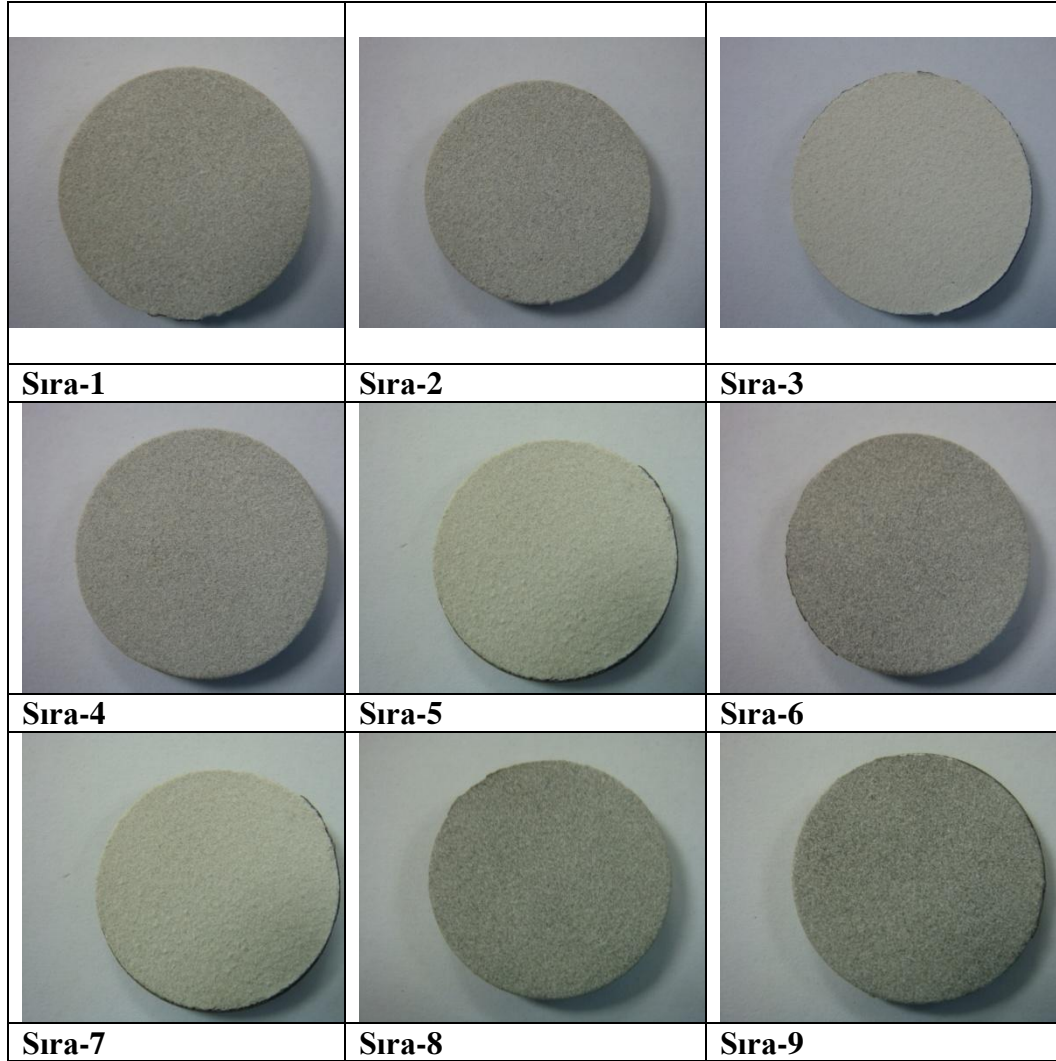
Şekil 5.5. Nicraly Bağ Tabakası Kaplanmış Altlık Malzemeler

5.3.4. Altlık malzemelerin kaplanması

Bağ tabaka atılmış altlık malzemelerin üzerine YSZ – Al₂O₃ yaklaşık 200 – 250 µm kalınlığında 20 paso olarak atılmıştır. Toz besleme hızı 45 g/dk'dır. Şekil 5.6.'da plazma sprey prosesinin uygulaması gösterilmiştir. Tablo 5.4.'de belirtilen deney sırası takip edilerek Şekil 5.7.'de gösterildiği gibi numunelerimiz kaplanmıştır.



Şekil 5.6. Plazma Sprey Kaplama Prosesinin Uygulaması



Şekil 5.7. YSZ – Al₂O₃ Kaplanmış Altlık Malzemeler

5.4. Termal Bariyer Kaplamaların (YSZ – Al₂O₃) Karakterizasyonu ve Analizi

Plazma sprey kaplama prosesi ile üretilen kaplamaların karakterizasyonu çalışmaları çerçevesinde,

- Metalografik çalışma (optik mikroskop),
- Yüzey pürüzlülüğü ölçümü,
- Mikrosertlik deneyi,
- Taramalı elektron mikroskobu analizleri gerçekleştirilmiştir.

5.4.1. Optik mikroskop ile yapılan metalografi çalışmaları

Kaplanmış numunelerden bakalite alınarak metalografik incelemesi yapılmıştır. Bakalite alınabilmesi için öncelikle kaba kesme daha sonra hassas kesme gerçekleştirilmiştir. Uygulamada Struers Labotom-3 marka kaba kesme cihazı ve Struers Accutom-5 marka hassas kesme cihazlarıyla kesme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.8.'de bu cihazlar gösterilmiştir.



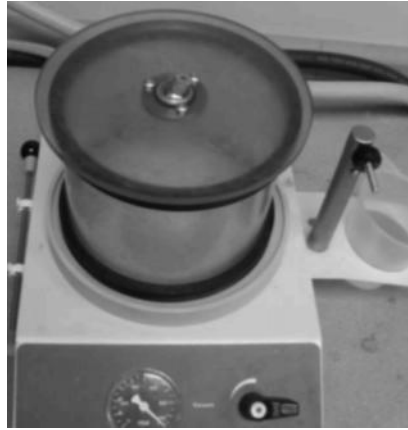
(a)



(b)

Şekil 5.8. (A) Kaba Kesme Cihazı, (B) Hassas Kesme Cihazı

Kesilen numuneler Şekil 5.9.'da verilen Struers Epovac markalı cihaz ile soğuk kalıplanarak zımparalama, parlatma ve mikroskop incelemesinde daha rahat çalışma imkânı ve homojen yüzey özelliklerinin elde edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 5.9. Soğuk Bakalit Alma Cihazı

Kesilen numunelerin yüzeylerinin düzleştirilerek parlatılması için zımpara işlemi uygulanır. Uygulamada Buehler 2 Speed Grinder-Polisher marka zımparalama cihazı ile yüzey parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.10.'da zımpara cihazı görülmektedir. Cihaz iki adet zımpara yapılmasına imkân sağlayan birbirine bağımlı zımpara yüzeyine sahiptir. Dairesel bir kesite sahip olan bu yüzeyler düşük ve yüksek hızlara ayarlanarak dönebilmektedirler. Üzerlerinde birer musluk bulunmaktadır, bu musluklar yardımıyla zımparaya akıtılan su miktarı ayarlanabilmektedir.



Şekil 5.10. Zımparalama ve Parlatma Cihazı

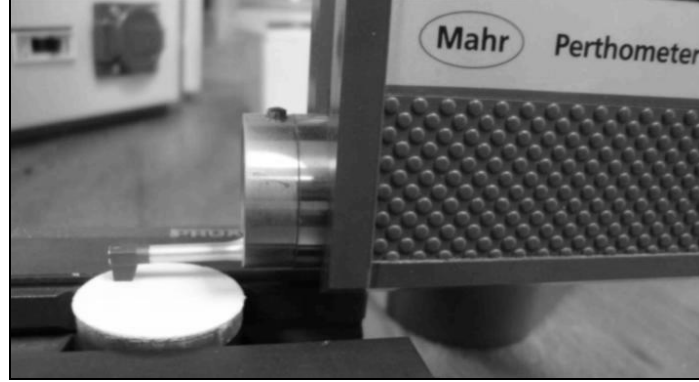
Bu incelemeler Zeiss Imager Aim marka bir optik mikroskop yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Metalografik inceleme ile kaplamanın yapısı, kaplama kalınlığı ve kaplamanın porozitesi hakkında bilgilere ulaşılmıştır. Porozite ölçümleri için renk farkı yardımıyla hesaplama yapan Image-J programı kullanılmıştır. Bu program sayesinde porozite yüzdesi hesaplanmıştır.



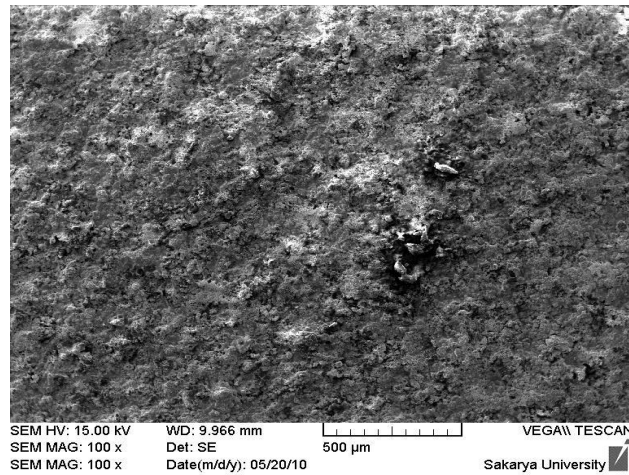
Şekil 5.11. Optik Mikroskop Görüntüsü

5.4.2. Yüzey pürüzlülüğü

Kaplama işlemi sonucu elde edilen farklı bileşimlerin kaplama sonrası yüzey pürüzlülük değeri (Ra), Perthometer Mİ marka cihazla μm cinsinden ölçülmüştür.



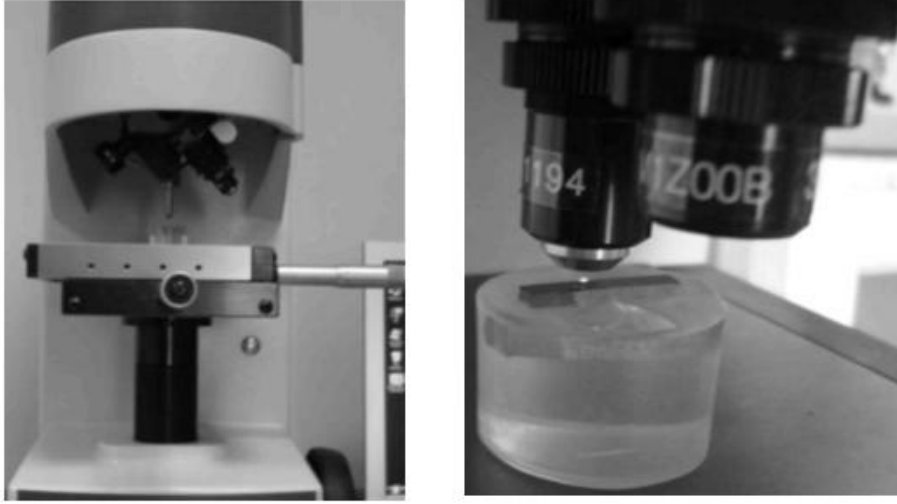
Şekil 5.12. Kaplanmış Numunelerin Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü



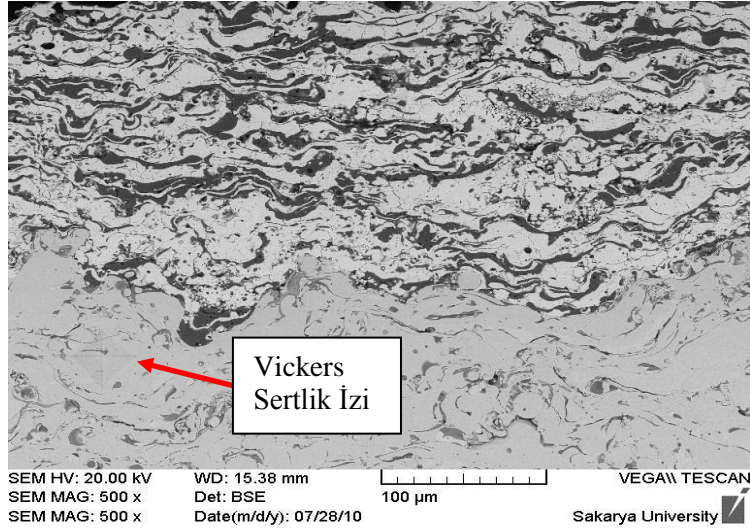
Şekil 5.13. 1 No'lu Numunenin SEM Görüntüsü

5.4.3. Sertlik ölçümü

Kaplamaların sertlikleri parlatılmış yüzeyde üst ve alt kaplama kesiti üzerinde Struers Duramin-A300 marka cihazla mikro sertlik ölçme yöntemi kullanılarak 300 g yük uygulanarak ve yaklaşık 15-20 sn yükün sabit bekletilmesi ile standart mikro sertlik ölçümü HV cinsinden gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.14. Vickers Sertlik Cihazı



Şekil 5.15. 9 No'lu Numunenin SEM Görüntüsü

5.4.4. Taramalı elektron mikroskobu ile yapılan mikroyapı analizi

Homojen olarak karıştırılmış YSZ – Al₂O₃ tozların görüntüsü Şekil 5.1.'deki SEM görüntüsü gibi Vega Tescan Marka taramalı elektron mikroskobu kullanılarak alınmış olup kaplamaların görüntüleri de aynı şekilde alınmıştır. Elementel dağılım analizinin yapılabilmesi de taramalı elektron mikroskobu ile mümkündür. Taramalı elektron mikroskobu bir milyon 10⁶ X büyötmeye imkân vermektedir.



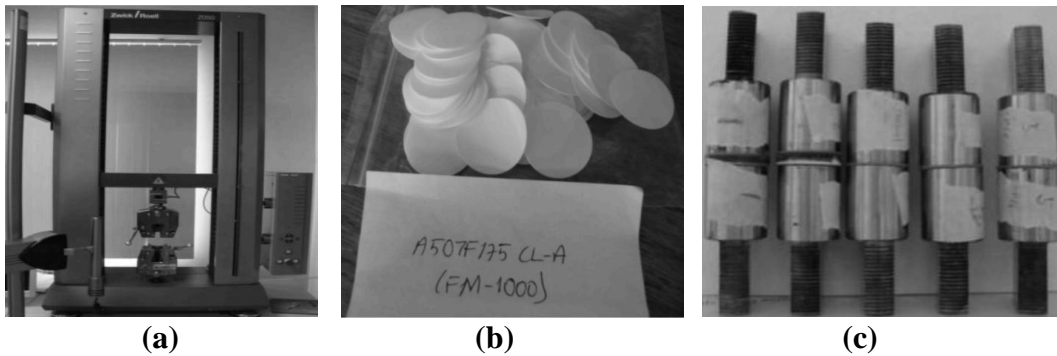
Şekil 5.16. Taramalı Elektron Mikroskobu

5.4.5. Çekme testi

Yapısal özelliklerin belirlenmesinde kullanılan deneysel yöntemlerden çekme işlemi kullanılmıştır. Çekme cihazının markası Zwick/Roell Z050' dir.

Çekme testi için cihaza çekme çeneleri yerleştirilmiş ve çekme işlemi uygulanmıştır. Çekme test cihazı Şekil 5.17' de verilmiştir. Çekme test cihazının maksimum kapasitesi 15000 kg kuvvettir.

Plazma püskürtme ile kaplanmış numunelerin adhezyon ve/veya kohezyon mukavemetlerinin belirlenmesi amacıyla çekme testine tabii tutulması için epoksi adı verilen yapıştırıcı maddeler kullanılmıştır. Yapıştırıcı olarak FM 1000 kullanılmıştır. Kürleşme sıcaklığı 194 – 213 °C'dir.



Şekil 5.17. (A) Çekme Cihazı, (B) FM-1000 Yapıştırıcı, (C) Çekme Numuneleri

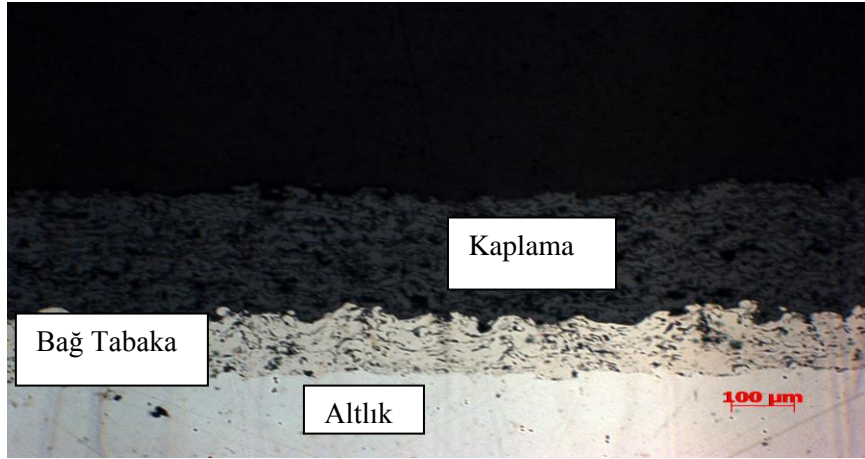
Uygulamada yapıştırıcı ile yapılan kütleme işlemlerinde 160-200°C sıcaklık aralığına önceden ısıtılmış fırına yapışacak çekme aparatları yerleştirilerek yapıştırma/kütleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Çekme testi uygulamasında çekme çene hızı 0,01 mm/sn olarak gerçekleştirilmiştir. Çekme testinde amaç kaplamanın adhezyon-kohezyon mukavemetleri ve yapıştırıcı mukavemetlerinin belirlenmesidir.

BÖLÜM 6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

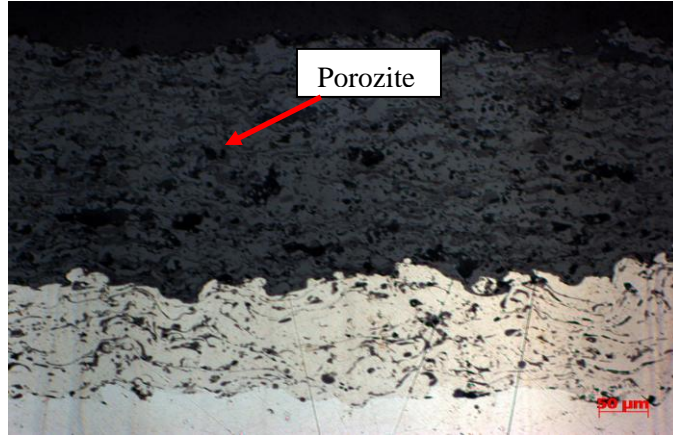
6.1. Kaplamaların Mikroyapısı ve Karakterizasyonu

Tablo 5.4.'de Sıra 9 ile belirtilen parametrelerle kaplanmış numunenin optik mikroyapı görüntüsü Şekil 6.1.'de bulunmaktadır. Plazma sprej kaplama tekniği ile üretilen TBC'lerde optik mikroyapıdan da görüldüğü üzere kaplama-altlık ara yüzeyinde mekanik bir bağ oluşmaktadır.



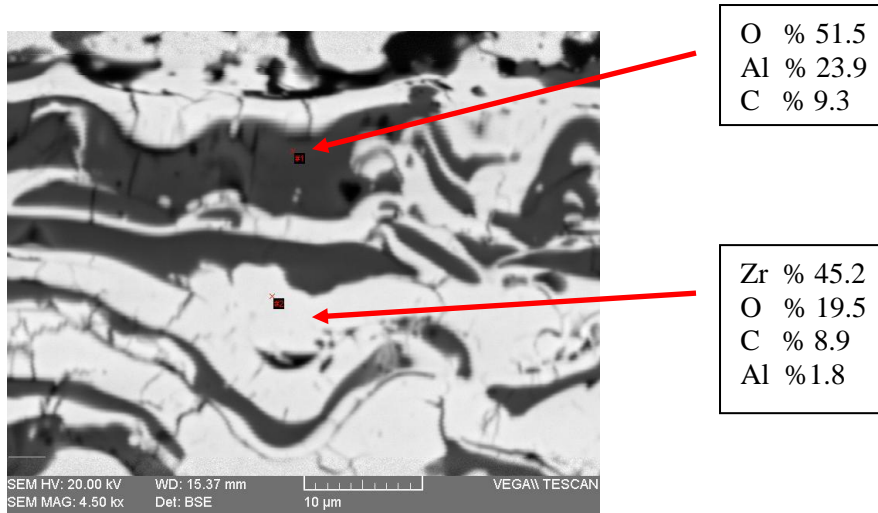
Şekil 6.1. 9 No'lu Numunenin Optik Mikroyapı Görüntüsü

Mikroyapı görüntülerine bakıldığında herhangi bir çatlak ve üst tabakanın, bağ kaplamadan ayrılmasını sağlayacak delaminasyon görülmemektedir. Şekil 6.2.'de TBC'lerde olması gereken poroziteler gösterilmektedir. Porozite plazma püskürtme kaplamaların karakteristik bir özelliğidir. Kullanılan toz malzemelerin cinsine bağlı olarak kaplamalarda % 20'lere kadar porozite bulunabilir [60]. Sujanta Widjaja ve arkadaşlarının gaz tünel tipli plazma püskürtme ile yaptığı çalışmada, YSZ kaplama tozu içerisinde Al_2O_3 miktarı arttığında kaplamalarda porozitede meydana geldiği tespit edilmiştir [61].



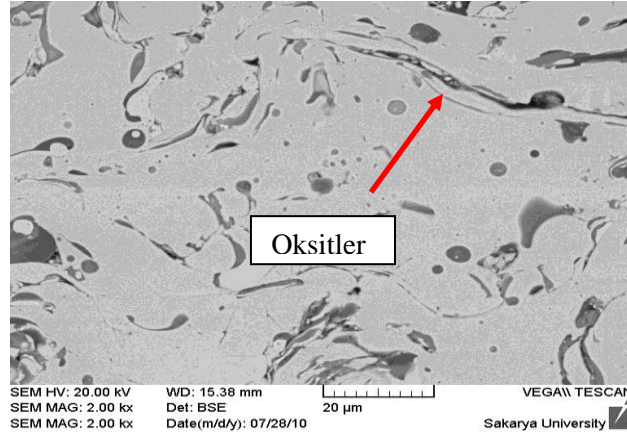
Şekil 6.2. 9 No'lu Numunenin Optik Mikroyapı Görüntüsü

Şekil 6.3.'de Tablo 5.4.'de Sıra 9 ile belirtilen parametrelerle kaplanmış numunenin SEM ve bu görüntü üzerinden noktasal EDS analizi verilmiştir. Bu SEM görüntülerinden faydalanarak plazma kaplamaların tipik yapısı olan deniz dalgası şeklinde birikmiş kaplama mikroyapısında koyu bölgelerin alümina, açık bölgelerin zirkonya olduğu EDS analizlerinde tespit edilmiştir.

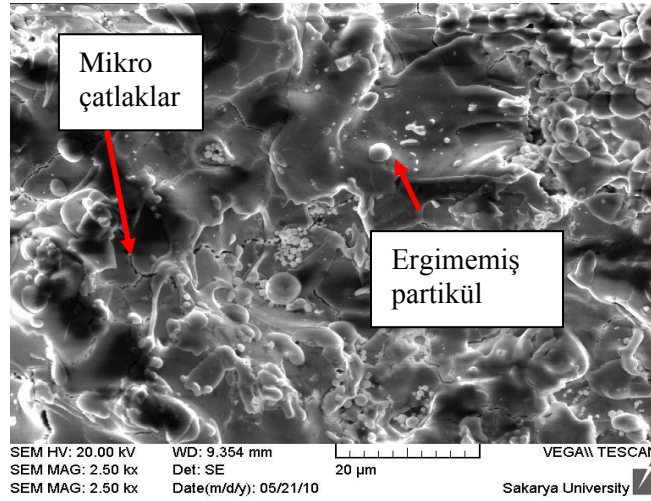


Şekil 6.3. 9 No'lu Numunenin SEM Görüntüsü ve EDS Analizi

Kaplamalarda yüksek sıcaklık nedeniyle oksitlenmeler görülebilmektedir. Kaplamalarımızda oksitlenme özellikle NiCrAlY bağ tabakasında görülmüştür. Tablo 5.4.'de belirtilen parametrelerle kaplanan numunelerimizin hepsinin bağ tabakalarında ince çizgiler halinde oksit yapısı gözlenmiştir. Bu oksitler Şekil 6.4.'de SEM görüntüsünde mevcuttur.



Şekil 6.4. 9 No'lu Numunenin Nicraly Bağ Tabakasının SEM Görüntüsü

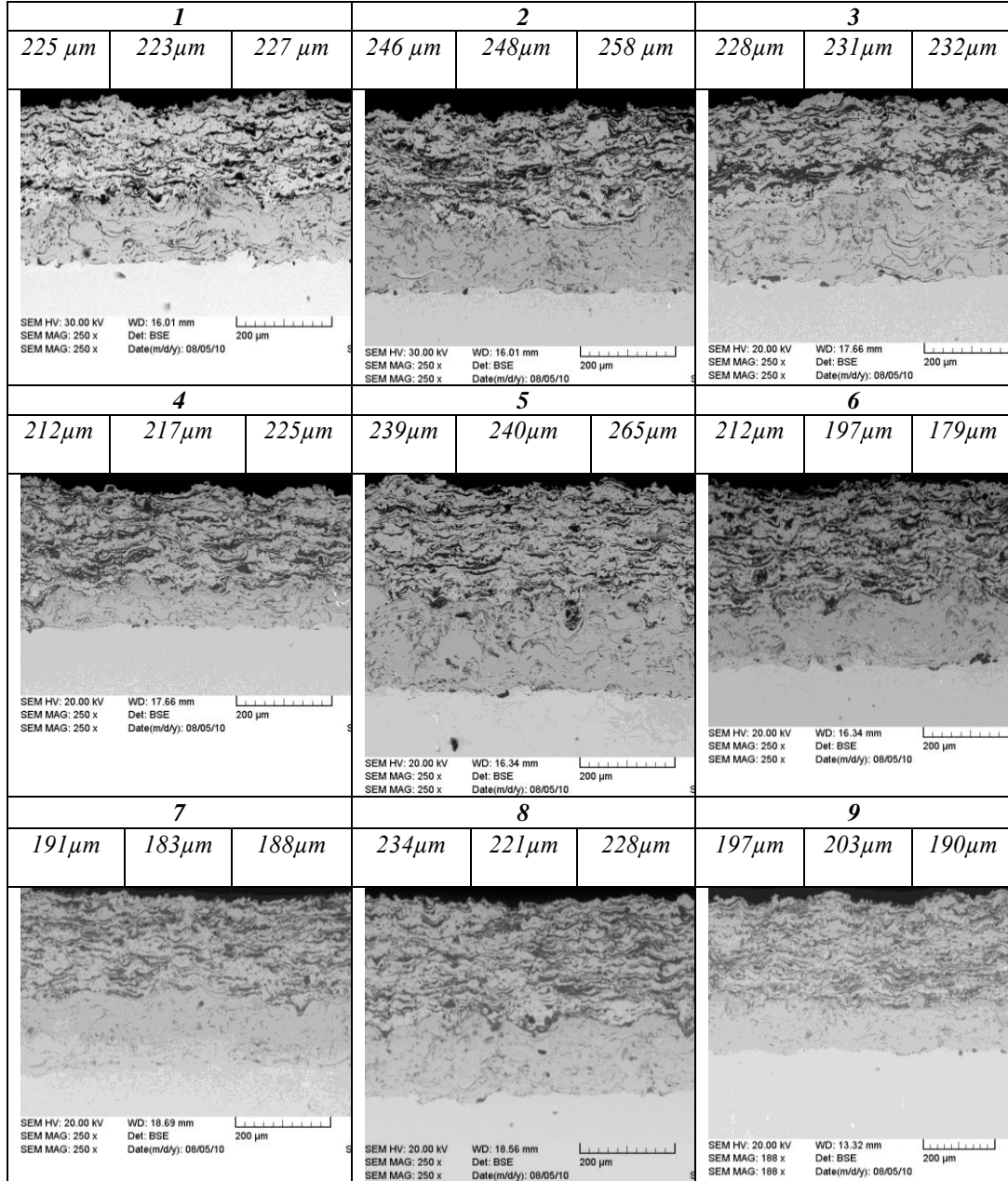


Şekil 6.5. 9 No'lu Numunenin SEM Görüntüsü

Plazma püskürtme kaplamalarda mevcut yapılardan biri de ergimemiş partiküldür. Kaplamalarımızın hemen hemen hepsinde ergimemiş partikül içeriği görülmektedir. Mikro çatlaklar ve ergimemiş partiküller Şekil 6.5.'de gösterildiği gibidir.

6.2. Kaplama Kalınlığı

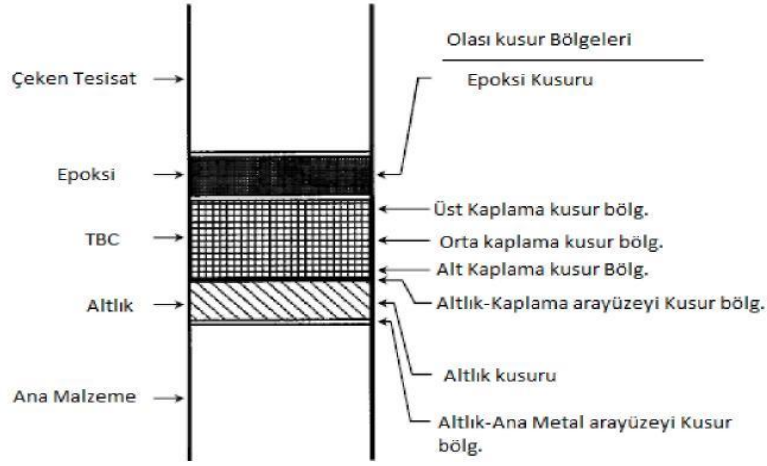
Üretilen kaplamaların kaplama kalınlıkları SEM ve optik mikroskoptaki görüntülerin ölçekleri yardımıyla tespit edilmiştir. Şekil 6.6.'da bütün numunelerimizin sıra numarasına göre SEM görüntüleri ve üst tabaka kaplama kalınlık ölçümleri verilmiştir.



Şekil 6.6. Numunelerin SEM Görüntüleri ve Üst Kaplama Kalınlık Değerleri

6.3. Çekme Testi

Çekme testi sonrası elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde Şekil 6.7' ye göre yapılması amaçlanmış ancak, Ek A' da verildiği üzere çekme testi sonrası elde edilen tüm sonuçların kaplamanın adhezif veya kohezif hasarını belirleyemeyecek şekilde yapıştırma yüzeylerinde sadece yapıştırıcının hasarından kaynaklandığı gözlenmiştir. Bu nedenle kaplamaların hasarını ifade etmeyen bu veriler değerlendirmeye alınmamıştır



Şekil 6.7. Kaplamanın Çekme Testinde Adhezif veya Kohezif Hasarına Neden Olan Muhtemel Kusur Bölgeleri

6.4. Yüzey Pürüzlülüğü

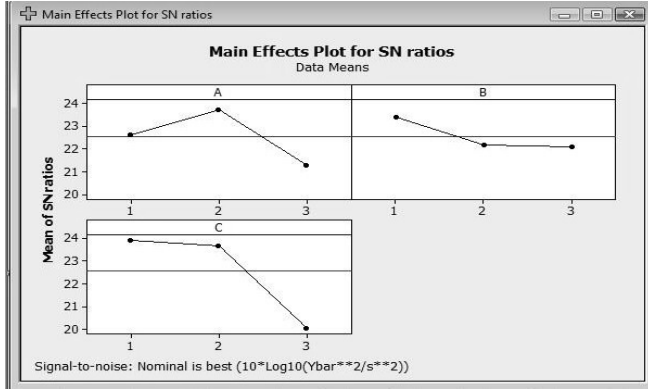
6.4.1. Yüzey pürüzlülüğü için verilerin minitab 15 ile taguchi analizinin yapılması

Minitab 15, veri analizi ve sunumu için kapsamlı ve kullanımı kolay bir istatistiksel yazılım paketidir. Birden fazla çalışma sayfasını ve grafiği saklayabilmek, grafikleri birden fazla formatta kaydedebilmek ve grafikleri diğer uygulamalara ihraç edebilmek yazılımın özelliklerinden birkaçıdır.

Kaplama işlemi sonucu elde edilen farklı bileşimlerin kaplama sonrası yüzey pürüzlülük değeri (Ra), Mahr marka cihazla µm cinsinden ölçülmüş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 6.1. Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Ra)

Sıra No	Ra1	Ra2	Ra3	Ra4	Ra5	Ra6
1	6,5	6,95	6,85	6,36	6,1	6,73
2	6,7	7,26	6,76	5,99	5,94	6,63
3	8,27	7,26	7,14	6,4	6,7	6,2
4	6,51	6,8	7,4	7,0	6,4	6,7
5	6,8	6,7	6,0	7,1	7,1	7,6
6	7,0	6,0	6,9	6,0	6,4	6,6
7	6,8	7,7	6,9	5,4	6,1	6,9
8	6,7	5,5	6,9	6,1	6,4	6,6
9	6,8	7,5	6,1	6,8	6,9	7,2



Şekil 6.8. Yüzey pürüzlülük değerlerinin analizi için S/N oranı sonuç grafikleri (Mean of SN ratios: S/N oranlarının değerleri, Signal to Noise: Sinyal-Gürültü oranı, Nominal is best: Ortalama en iyi, A: Akım, B: Gaz karışım oranı, C: Sprey mesafesi)

Response Table for Signal to Noise Ratios			
Nominal is best ($10 \cdot \text{Log}_{10}(\bar{Y}^2/s^2)$)			
Level	A	B	C
1	22,65	23,40	23,93
2	23,74	22,17	23,69
3	21,27	22,09	20,04
Delta	2,47	1,31	3,89
Rank	2	3	1

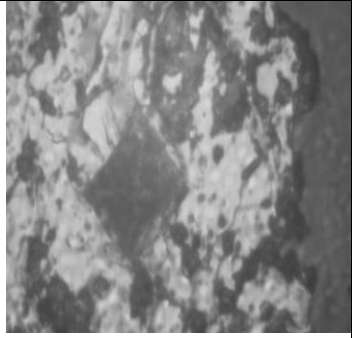
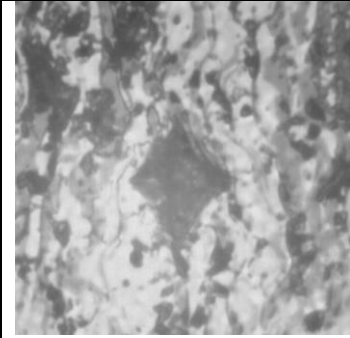
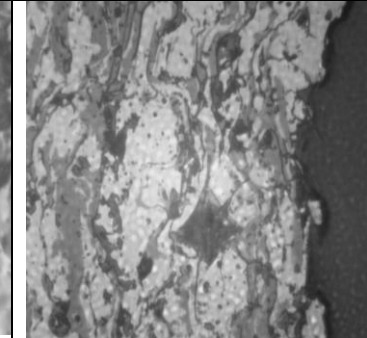
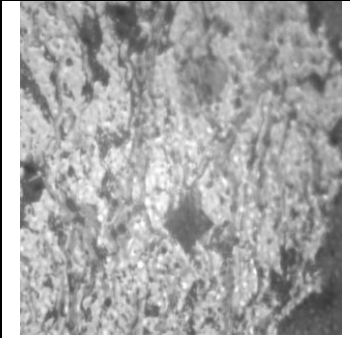
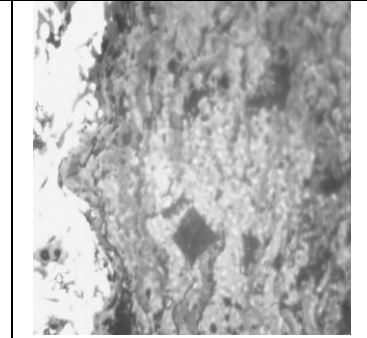
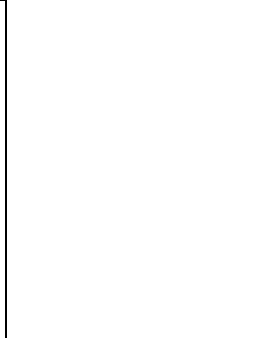
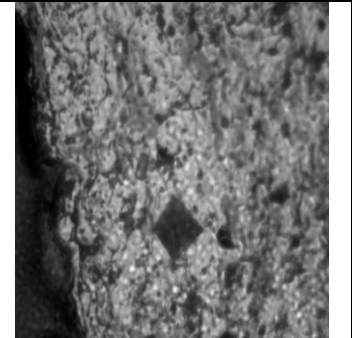
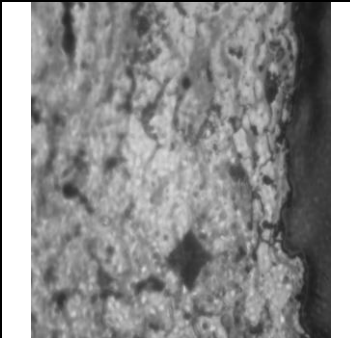
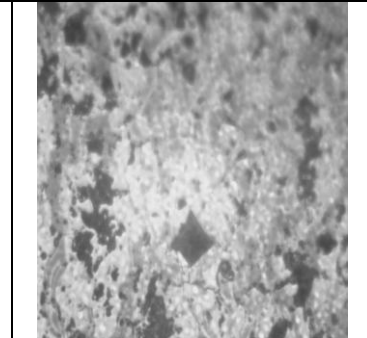
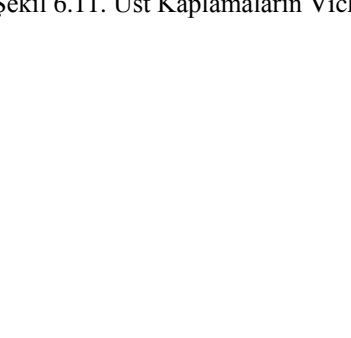
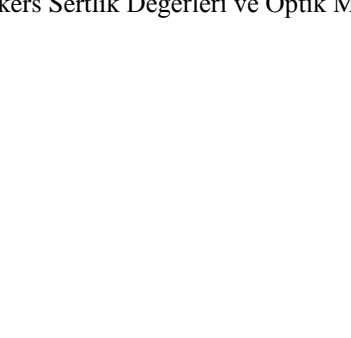




Şekil 6.9. Yüzey Pürüzlülük Verilerinin Analizi Sonucunda S/N Oranına Göre Değerlendirme

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
A	2	9,221	9,221	4,611	0,99
B	2	3,219	3,219	1,609	0,34
C	2	28,529	28,529	14,265	3,06
Error	2	9,333	9,333	4,666	
Total	8	50,302			

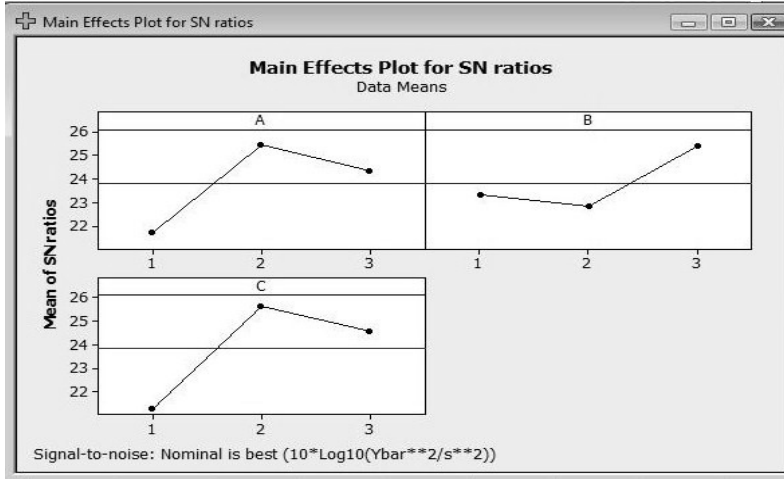
Şekil 6.10. Yüzey Pürüzlülük Verilerinin ANOVA Testi

6.5. Kaplama Sertliği

Üst kaplamalara 15 saniye süre ile, belli aralıklarla ve 300 g yük uygulanarak HV cinsinden yapılan ölçümler sonucunda elde edilen sertlik değerleri Şekil 6.11.'de verilmiştir. Aynı zamanda alt tabakanın da sertlik ölçümleri alınmış ve yaklaşık 280 HV olduğu belirlenmiştir.

<i>1</i>			<i>2</i>			<i>3</i>		
<i>352 HV</i>	<i>393 HV</i>	<i>545 HV</i>	<i>617 HV</i>	<i>635 HV</i>	<i>689 HV</i>	<i>615 HV</i>	<i>635 HV</i>	<i>666 HV</i>
								
<i>4</i>			<i>5</i>			<i>6</i>		
<i>647 HV</i>	<i>650 HV</i>	<i>682 HV</i>	<i>617 HV</i>	<i>659 HV</i>	<i>765 HV</i>	<i>734 HV</i>	<i>769 HV</i>	<i>805 HV</i>
								
<i>7</i>			<i>8</i>			<i>9</i>		
<i>679 HV</i>	<i>698 HV</i>	<i>742 HV</i>	<i>769 HV</i>	<i>814 HV</i>	<i>864 HV</i>	<i>769 HV</i>	<i>888 HV</i>	<i>897 HV</i>

Şekil 6.11. Üst Kaplamaların Vickers Sertlik Değerleri ve Optik Mikroskop Görüntüleri



Şekil 6.12. Kaplamaların Vickers sertlik değerlerinin analizi için S/N oranı sonuç grafikleri (Mean of SN ratios: S/N oranlarının değerleri, Signal to Noise: Sinyal-Gürültü oranı, Nominal is best: Ortalama en iyi, A: Akım, B: Gaz karışım oranı, C: Sprey mesafesi)

Response Table for Signal to Noise Ratios			
Nominal is best ($10 \cdot \log_{10}(\bar{Y}^2/s^2)$)			
Level	A	B	C
1	21,73	23,32	21,31
2	25,45	22,81	25,63
3	24,34	25,38	24,57
Delta	3,73	2,57	4,32
Rank	2	3	1

Şekil 6.13. Kaplamaların Vickers Sertlik Verilerinin Analizi Sonucunda S/N Oranına Göre Değerlendirme

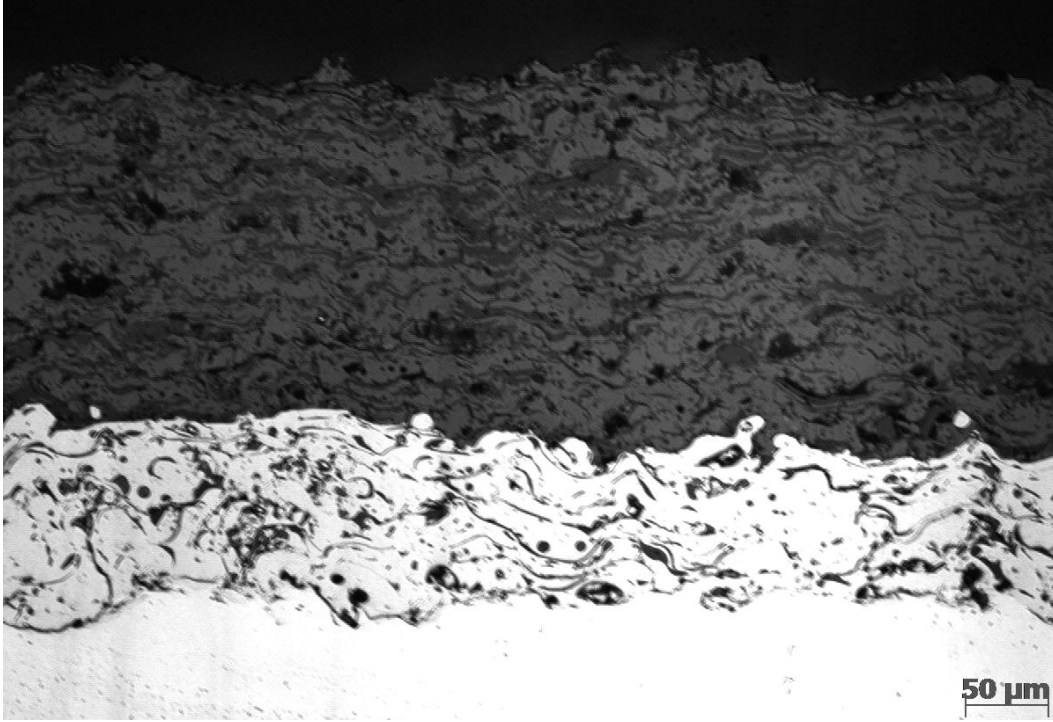
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
A	2	21,94	21,94	10,97	0,13
B	2	11,12	11,12	5,56	0,06
C	2	30,41	30,41	15,21	0,17
Error	2	174,49	174,49	87,24	
Total	8	237,96			

Şekil 6.14. Kaplamaların Vickers Sertlik Verilerinin ANOVA Testi

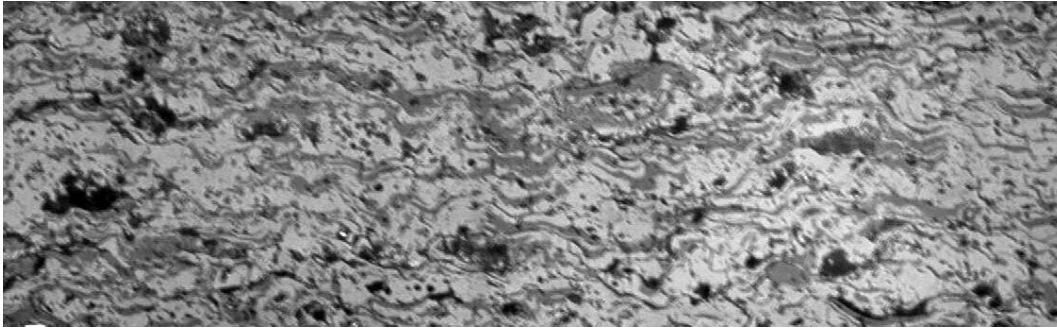
6.6. Kaplamanın Porozitesi

Porozite ölçümleri için optik mikroskop görüntülerinden yararlanılmış ve renk farkı yardımıyla hesaplama yapan Image-J programı kullanılmıştır. Bu program

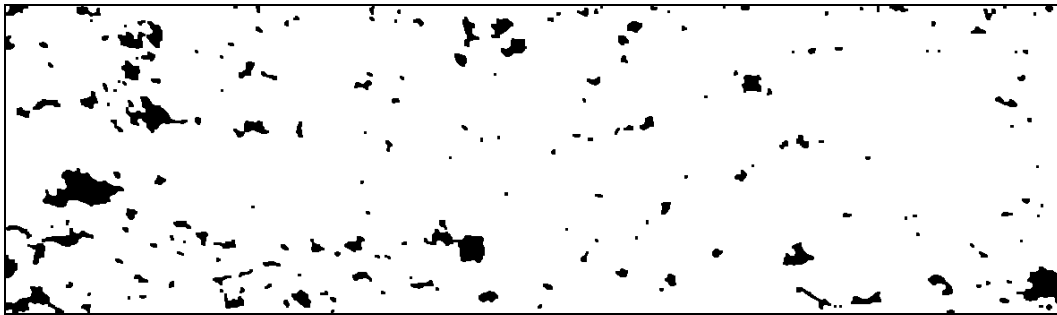
sayesinde porozite yüzdesi hesaplanmıştır. Programın daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 6.15.'de örnek bir uygulama verilmiştir. Kaplama numunelerinin optik mikroskop görüntüsünde belli bir bölge seçilmektedir. Bu bölgedeki koyu renkteki yerler bize porozite miktarlarını göstermektedir. Şekil 6.15.'de 258 tane porozite tespit edilmiştir. Ortalama her bir porozitenin büyüklüğü 26.743 μm ve porozite yüzdesi % 5,6'dır.



Kaplama Genel Görüntüsü X 200



Üst Kaplama Görüntüsü X 200



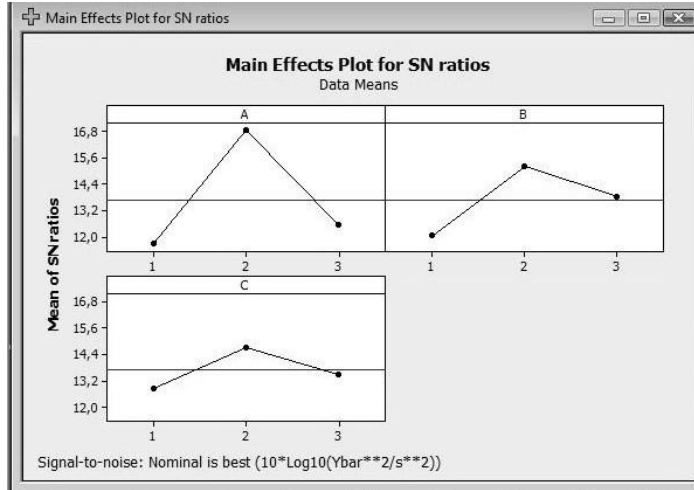
Üst Kaplama Görüntüsü– threshold X 200

Count	Total Area (μm^2)	Average Size (μm)	Area Fraction (%)	Perim.	Feret	FeretX	FeretY	FeretAngle	MinFeret
258	6899.580	26.743	5.6	18.283	7.104	349.793	88.507	110.973	3.943

Şekil 6.15. 4 No'lu Numunenin Porozite Yüzdesi Hesabı

Tablo 6.2. Kaplamaların Porozite Yüzdeleri

Sıra No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ortalama Porozite %	7,5	4,3	5,0	5,0	5,6	4,7	3,7	3,6	3,8



Şekil 6.16. Kaplamaların porozite değerlerinin analizi için S/N oranı sonuç grafikleri (Mean of SN ratios: S/N oranlarının değerleri, Signal to Noise: Sinyal-Gürültü oranı, Nominal is best: Ortalama en iyi, A: Akım, B: Gaz karışım oranı, C: Sprey mesafesi)

```

Response Table for Signal to Noise Ratios
Nominal is best (10*Log10(Ybar**2/s**2))

Level      A      B      C
1          11,67 12,03 12,86
2          16,84 15,21 14,73
3          12,54 13,81 13,46
Delta      5,17  3,18  1,87
Rank       1      2      3

```

Şekil 6.17. Kaplamaların Porozite Verilerinin Analizi Sonucunda S/N Oranına Göre Değerlendirme

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	2	46,01	46,01	23,01	0,79	0,560
B	2	15,25	15,25	7,62	0,26	0,793
C	2	5,47	5,47	2,73	0,09	0,915
Error	2	58,56	58,56	29,28		
Total	8	125,28				

Şekil 6.18. Kaplamaların Porozite Verilerinin ANOVA Testi

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçların Değerlendirilmesi

1. Yüzey pürüzlülük verilerinin analizinde, Şekil 6.8.'de belirtilen S/N oranına göre sprej mesafesi en etkin faktör iken, gaz karışım oranı en az etkili faktördür. Şekil 6.9.'da akım için en etkili seviye 2, gaz karışım oranı için seviye 1 ve sprej mesafesi için ise seviye 1'dir. Bu sonuçlar doğrultusunda L₉ ortogonal dizisine göre seçmemiz gereken düzenek 6'dır. Gaz karışım oranının S/N oranına göre en az etkili faktör olmasından dolayı ortogonal dizide düzenek 6'nın seviye 3'ü göstermesi göz ardı edilmektedir.

4.5.4.1.4. 'de tanımlanan F testine göre F tablosuna bakılarak % 95 ve % 90 güven aralığındaki F değerleri aşağıdaki gibidir:

$$F_{(0.05;2;2)} = 19.00 \quad (7.1)$$

$$F_{(0.10;2;2)} = 9.00 \quad (7.2)$$

Yukarıdaki F değerlerine göre ANOVA test sonuçları değerlendirilmiştir. Şekil 6.10.'a göre sprej mesafesi için F değeri 3,06, akım için 0,99 ve gaz karışım oranı için 0,34'tür. % 95 ve % 90 güven aralığındaki F değerlerini hiçbir faktör geçememiştir. Referans olarak kullanılan F değerini faktörlerin geçememesi, faktörlerin çalışmamızda hiçbir etkisi yoktur anlamına gelmez. Sadece belirlenen güven aralığını geçememişlerdir.

Yapılan analizler ve değerlendirmeler sonucu yüzey pürüzlülüğü için optimum şartlarda en etkin faktör sprej mesafesi olup 100 mm mesafeden çalışılmalıdır. Akımın 600 A olması gerekirken gaz karışım oranı 40/12 olmalıdır.

2. Vickers sertlik verilerinin analizinde, Şekil 6.12.'de belirtilen S/N oranına göre sprej mesafesi en etkin faktör iken, gaz karışım oranı en az etkili faktördür. Şekil 6.13.'de akım için en etkili seviye 2, gaz karışım oranı için seviye 3 ve sprej mesafesi için ise seviye 2'dir. Bu sonuçlar doğrultusunda L_9 ortogonal dizisine göre seçmemiz gereken düzenek 4'tür. Gaz karışım oranının S/N oranına göre en az etkili faktör olmasından dolayı ortogonal dizide düzenek 4'ün seviye 1'i göstermesi göz ardı edilmektedir.

Şekil 6.14.'e göre sprej mesafesi için F değeri 0,17, akım için 0,13 ve gaz karışım oranı için 0,06'dır. % 95 ve % 90 güven aralığındaki F değerlerini hiçbir faktör geçememiştir.

Yapılan analizler ve değerlendirmeler sonucu vickers sertlik ölçümü için optimum şartlarda en etkin faktör sprej mesafesi olup 120 mm mesafeden çalışılmalıdır. Akımın 600 A olması gerekirken gaz karışım oranı 40/8 olmalıdır.

3. Porozite verilerinin analizinde, Şekil 6.16.'da belirtilen S/N oranına göre akım en etkin faktör iken, sprej mesafesi en az etkili faktördür. Şekil 6.17.'de akım için en etkili seviye 2, gaz karışım oranı için seviye 2 ve sprej mesafesi için ise seviye 2'dir.. Bu sonuçlar doğrultusunda L_9 ortogonal dizisine göre seçmemiz gereken düzenek 5'tir. Sprej mesafesinin S/N oranına göre en az etkili faktör olmasından dolayı ortogonal dizide düzenek 5'in seviye 3'ü göstermesi göz ardı edilmektedir.

Şekil 6.18.'de göre sprej mesafesi için F değeri 0,09, akım için 0,79 ve gaz karışım oranı için 0,26'dır. % 95 ve % 90 güven aralığındaki F değerlerini hiçbir faktör geçememiştir.

Yapılan analizler ve değerlendirmeler sonucu porozite için optimum şartlarda en etkin faktör akım olup 600 A ile çalışılmalıdır. Gaz karışım oranının 40/10 olması gerekirken sprej mesafesi 150 mm olmalıdır.

7.2. Öneriler

Yapılan bu çalışmayla belirlenen kaplama parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne, sertliğe ve poroziteye olan etkileri Taguchi metodunun L9 ortogonal dizisi kullanılarak incelenmiştir. Bu deneyin daha hassas sonuçlar vermesi için Taguchi ortogonal dizinlerinden daha fazla deney şartının oluşmasına imkân veren ortogonal dizilerden L27 kullanılabilir.

Ayrıca bu tez çalışmasında kullanılmayan kaplama parametreleri çoğaltılarak oluşturulacak daha geniş Taguchi ortogonal dizileriyle incelenebilir.

Çalışmamızda incelenen yüzey pürüzlülüğü, sertlik ve porozite için her birine özel akım, sprey mesafesi ve gaz karışım oranının belirlenmesi kaplamaların kalite geliştirme çalışmaları için kesinlikle tavsiye edilebilir bir çalışma olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Thermal spraying: Practise, theory and application, American Welding Society, 1985.
- [2] DUSA, K.M., Spraytime Magazine: ITSA historical collection growing, ASM thermal spray societies, Vol.8(2), 2001.
- [3] PARACIK, D., Zirkonya esaslı ısı engelleyici kaplamalarda taguchi deney tasarımı ile işlem değişkenlerinin belirlenmesi, Yüksek lisans tezi.1996.
- [4] ÜSTEL, F., Plazma sprej kaplama teknolojisi, Yüksek lisans tezi.İTÜ Fen Bil. İstanbul 1995.
- [5] LUGSCHEIDER, E., JOKIEL, P., Plasmaspritzen-verfahren, anwendungen, entwicklungen, Metall, 3/1993.
- [6] ÜSTEL, F., SOYKAN, Ş., ÇELİK, E., AVCI, E., Plazma sprej kaplama teknolojisi, Metalurji Dergisi, 1997.
- [7] SMOLKA, K., Thermisches spritzen, DVS-Verlag, 50- 57, 1985.
- [8] LUGSCHEIDER, E., Handbuch der thermisches spritztechnik, Technologien-werkstoffe-fertigung, DVS-Verlag, Düsseldorf, 2002.
- [9] SARIKAYA, Ö., Aşınmaya karşı yüzey mühendisliği yöntemleri, Sakarya, S.123, 2007.
- [10] PAWLOWSKI, L., The science and engineering of thermal spray coating, Wiley&Sons, New York, 1995.
- [11] HEINMANN R.B., Plasma spray coating, VCH Verlag, ISBN 3-527-29430-9, 1996.
- [12] CHANG, R., Fen ve mühendislik bölümleri için kimya, Beta, 6.Baskı, S.301, Kasım 2000.
- [13] TUCKER, R.C., Thermal spray coatings, ASM Handbook, Vol.5, 1994.
- [14] YILMAZ, F., Yüzey işlemleri dergisi, Temmuz - Ağustos, S.30 – 33, 2002.

- [15] NUTSCH, G., Grundlagen der oberflächen technik, physikalische verfahren, TU. Imenou, German, 2000.
- [16] ESCHAUER, H., LUGSCHEIDER, E., Fortschritt beim thermischem spritzen, Metall, März, 1985.
- [17] POHL, A., and et.al., Gefügeanalyse an VPS-schichten. Prakt, Metallog 7., 1994.
- [18] EN 657:2005 (E), Thermal spraying – terminology, classification.
- [19] http://www.imgghost.indiamart.com/.../process_250x250.jpg
- [20] YENİHAYAT, F., Seramik kaplamalarda kırılma tokluğunun sonlu elemanlar yöntemi ile analizi, Yüksek lisans tezi, 1996.
- [21] VURAL, M., Plazma sprey ile çelikler üzerine kaplanmış oksit seramiklerin termal ve mekanik davranışı, Yüksek lisans tezi, İTÜ, Temmuz, 1991.
- [22] MATEJKA, D., BENKO B., Plasma spraying of metallic and ceramic materials, John Wiley & Sons, London, 1989.
- [23] PFENDER, E., Fundamental studies associated with the plasma spray in coatings technology conference proceedings, pp.1 – 10, 14 – 17 September, Orlando, Florida, 1987.
- [24] BALTING, U., Untersuchung des eigendehnungsverhaltens plasma gespritzter Al_2O_3 – schicht – substrat – verbundsysteme mit hilfe der simulation, Metall, 5/1985.
- [25] STEFFENS, H.D., WIELAGE, B., DROZAK, J., Interface phenomena and bonding mechanism of thermally-sprayed metal and ceramic composites, Surface & Coatings Tech., 45, 299 – 308, 1991.
- [26] INGARD, K. and et.al., Protection materials: coatings for thermal barrier and wear resistance, Proceedings of European symposium on engineering ceramics, London, 1987.
- [27] GALVANETTO, P.S., TOMASI, A., BERTAMINI, L., Thermal stability of stabilized zirconia thermal barrier coatings prepared by atmosphere and temperature controlled spraying, Surface and coatings technology, Vol. 68 – 69, pp. 106 – 112, 1994.
- [28] BRANDON, J.R., TAYLOR R., Phase stability of zirconia – based thermal barrier coatings part II : Zirconia – ceria alloys, Surface and coatings technology, Vol. 46, pp. 91 – 101 , 1991.

- [29] HOLMES, J.W., PILSNER, B.H., Cerium oxide stabilized thermal barrier coatings, Thermal spray advanced in coatings, pp. 291 – 296, 14 – 17 September, Orlando, Florida, 1987.
- [30] BRANDON, J.R., TAYLOR, R., Phase stability of zirconia – based thermal barrier coatings part I : Zirconia – yttria alloys, Surface and coatings technology, Vol. 46, pp. 75 – 90 , 1991.
- [31] BENNETT, A., Properties of thermal barrier coatings, Materials science and technology, Vol.2, pp. 257 – 261, March 1986.
- [32] SARAL, U., Alümina ilavesinin YSZ termal bariyer kaplamaların mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi, Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, 2007.
- [33] GEÇGİNLİ, E.A., İleri teknoloji malzemeleri, İ.T.Ü. matbaası, Gümüşsuyu, S. 2-250-254, 1991.
- [34] SARITAŞ, S., Toz metalurjisi, Makine El Kitabı, 2.Baskı, 1.Cilt, S.2/64-2/82, 1994.
- [35] ERGUN, C., ELMAS, N., OLCAY, E., Biyoseramik malzemelerin özellikleri ve uygulamaları, 10. Denizli malzeme sempozyumu ve sergisi, S.543, Nisan 2004.
- [36] ETI HOLDING A.Ş. GENEL MÜDÜRLÜĞÜ, Bornitrür ön fizibilite etüdü, S.4, Ankara, Mayıs 2003.
- [37] CAN, E., Alümina özellikleri ve üretim yöntemleri, Mühendislik tasarımı 1 dergisi, SAÜ, Metalurji ve malzeme müh.böl., 2007.
- [38] UNGER, R.H., Comparison of thermal spray bond coats, Thermal spray advances in coatings technology conference proceedings, pp. 365 – 370, 14 – 17 September, Orlando, Florida, 1987.
- [39] CANIYILMAZ, E., Kalite geliştirmede taguchi metodu ve bir örnek uygulama, Yüksek lisans tezi, Ankara, 2001.
- [40] ŞİRVANCI, M., Kalite için deney tasarımı, taguchi yaklaşımı, Literatür yayıncılık, İstanbul, 1997.
- [41] KAYI, Y., Plastik enjeksiyon prosesindeki parametrelerin çekme problemine etkilerinin taguchi metodu ile incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, 2006.
- [42] ISHIKAWA K., Guide to quality control, ISBN 12-833-1036-7, 1982.
- [43] AYDIN, M.E., Taguchi metodu ve bir uygulama, Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, 1994.

- [44] COACHRAN, W.G., COX, G.M., Experimental Designs, John Wiley & Sons, New York, 1957.
- [45] FISCHER, R.A., The design of experiments, New York Reprint, 1971.
- [46] STEINBORN S., HARTELT M., Taguchi methoden – Das japanische geheimnis?, QZ 39, S.29-33, 1994.
- [47] KAMINSKI, M., FEIN, P., Fallbeispiel einer qualitaetsverbesserung mittels taguchi – methoden, QZ 33, Heft 11, S.599 – 663, 1988.
- [48] TAGUCHI, G., Clausing D., 65 – 76, 1990.
- [49] QUENTIN, H., Versuchsmethoden im qualitaets-engineering, Vieweg Verlag, 1994.
- [50] PHADKE, M.S., Robuste prozesse durch quality engineering, GFMT-München, 1989.
- [51] KLEPPMAN, W., Taschenbuch versuchsplanung, ISBN 3-446-19271-9, Hanser Verlag.
- [52] ROSS, P.J., Taguchi techniques for quality engineering, McGraw-Hill, p.1-278, New York, 1988.
- [53] KATZ, L.E., PHADKE, M.N., Macro quality with micro money, quality control, robust design and the taguchi method, Edited by K. Denhad, Wadsworth & Brooks/Cole, p.23 – 29, California, 1989.
- [54] UNAL, R., DEAN, E.B., Taguchi approach to design optimization for quality and cost: an overview, Annual Conference of the International Society of Parametric Analysis, p.1 – 9, 1991.
- [55] PHADKE, M.S., Quality engineering using design of experiments, quality control, robust design and the taguchi method, Edited by K. Denhad, Wadsworth & Brooks/Cole, p.31 – 32, California, 1989.
- [56] İZGİZ, S., Deney tasarımı ve taguchi metodu-ürün ve proseslerin optimizasyonu, 1999.
- [57] FERAH, M., Çok yanıtli taguchi tasarım metodu ve alüminyum sanayinde bir uygulama, Yüksek lisans tezi.
- [58] LOCHNER and MATAR, S.37-38, 1990.
- [59] SCHICK, P., Systemoptimierung, BMW AG Qualitaetsicherung.

- [60] KAÇAR, Y.E., KARAOĞLANLI, A.C., Kaplama teknolojileri ve karakterizasyonu, Metalurji ve malzeme mühendisliği, Sakarya üniversitesi, S.18-25, 2005.
- [61] SHARAFAT, S., KOBAYASHI, A., CHEN, Y., GHONIEMN, M., Plasma spraying of micro- composite thermal barrier coatings, Vacuum vol:65, pp: 415-425, 2002.

EKLER

Sıra No	Çekme Test Sonuçları (MPa)	Açıklamalar
1	45	Kopma, kuponun kaplama yüzeyi tarafında ve yapıştırıcı ara yüzeyinde meydana geldi.
2	44	
3	54	
4	51	
5	47	
6	43	
7	40	
8	2	Kopma, kuponun kaplama yüzeyi tarafında ve yapıştırıcı ara yüzeyinde meydana geldi, yapıştırıcının nüfuz etmemesinden kaynaklandı.
9	-	Kopma, makineyi set ederken meydana geldi; ölçüm yapılmadı.

Ek A. Çekme test sonuçları.

ÖZGEÇMİŞ

Demet TOZKOPARAN, 02.07.1984' de Ankara' da doğdu. İlköğretim ve lise eğitimini İzmir Bornova Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2006 yılında Selçuk Üniversitesi, Kimya Mühendisliğinden ve Makine Mühendisliği Yan Dal Programından mezun oldu. 2006 - 2007 yılları arasında German Road Consulting firmasında çalıştı. 2007 yılında 1'inci Ana Bakım Merkezi Komutanlığında göreve başladı ve Arge ve Teknoloji Bölümü Şartname Kısmı'nda çalışmaya devam etmektedir.