

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Al₂O₃ ve Al₂O₃-ZrO₂ KAPLI SERAMİK PLAKALARIN BALİSTİK
DAYANIMININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Zeynep DERELİOĞLU**

Anabilim Dalı : Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Programı : Üretim Metalurjisi ve Teknolojileri

EYLÜL 2010

**Al₂O₃ ve Al₂O₃-ZrO₂ KAPLI SERAMİK PLAKALARIN BALİSTİK
DAYANIMININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Zeynep DERELİOĞLU
(506071219)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 3 Eylül 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Eylül 2010**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Gültekin GÖLLER (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Yılmaz TAPTIK (İTÜ)
Prof. Dr. Müzeyyen MARŞOĞLU (YTÜ)**

EYLÜL 2010

ÖNSÖZ

Çalışmalarında değerli fikirlerini benimle paylaşarak deneysel çalışmalarımı yönlendiren ve bir konunun değerlendirilmesini sebep sonuç ilişkileri kapsamında gerçekleştirmemi sağlayan danışmanım Prof. Dr. Gültekin GÖLLER'e, destek ve ilgisini benden hiçbir zaman esirgemeyen Doç. Dr. Özgül KELEŞ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Varlıklarının bana güç verdiği, ihtiyacım olduğu her an kapılarının bana açık olduğunu bildiğim değerli bilim insanları Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN ve Prof. Dr. İsmail DUMAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında bana değerli zamanlarını ayırarak bu çalışmanın oluşmasına büyük katkı sağlayan Met. Yük. Müh. Sedat İHVAN ve Araş. Gör. Berk ALKAN'a teşekkür ederim.

Çalışmalarında desteklerini meslektaşlarım Met. Yük. Müh. Sezen Seda YAKAR ve Met. Yük. Müh. Çağlar Çelik'e, SEM görüntülerini almamda yardımcı olan Talat Tamer ALPAK ve Kim. Müh. Sevgin Türkeli'ye, Araş. Gör. İpek AKIN, Met. Yük. Müh. Engin ÇİFTYÜREK'e ve yanımda olan bütün arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimime devam etmemi destekleyen, balistik testleri gerçekleştirmeme yardımcı olan ve deneylerimde malzeme desteği sağlayan iş yerim OTOKAR OTOMOTİV ve SAVUNMA SANAYİ A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Yönetim tarzı ve kişiliğini örnek aldığım, derin bir saygı ve sevgiyle bağlı olduğum Tank Mekanik Sistemler Müdürü Akif AKFERT'e, ihtiyacım olduğu her an bana zaman ayırıp değerli tecrübe ve fikirlerini benimle paylaşan Silah ve Aktif Koruma Sistemleri Yöneticisi Mustafa Nevzat SARIŞIN'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Her zaman olduğu gibi bu süreçte de yanımda olan ve değerli desteğini bir an olsun esirgemeyen Barış BAKAR'a teşekkür ederim.

Bana sahip olduğum değerleri kazandıran, bugüne kadar benim için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayıp attığım her adımda yanımda olan annem Mesrur ve babam Mehmet DERELİOĞLU, ailem İfakat, Asuman ve Ali Osman ŞAHİN'e en içten dileklerle teşekkür ederim.

Eylül 2009'da aramızdan ayrılan değerli dostum Dr. Evrim KİMYONOK'u sevgiyle anıyor, yıllar süren içten dostluğu için kendisine teşekkür ediyorum.

Eylül 2010

Zeynep Derelioğlu

Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı	1
2. KOMPOZİT ZIRH TEKNOLOJİLERİ	3
2.1 Köpük Çekirdekler	9
2.1.1 Seramik Köpükler	10
2.1.2 PVC Köpükler	10
2.1.3 Polistren Köpükler	10
2.1.4 Poliüretan Köpükler	10
2.1.5 Alüminyum Köpükler	11
2.2 Balpetekleri	11
2.2.1 Alüminyum Balpeteği	11
2.2.2 Nomex Balpeteği.....	11
2.2.3 Termoplastik Balpeteği	12
2.3 Tahta.....	12
2.4 Balsa.....	12
3. TERMAL SPREY KAPLAMA	17
3.1 Plazma Sprey.....	19
3.1.1 Plazma Sprey Kaplamaların Temel Özellikleri ve Bu Özellikleri Etkileyen Parametreler	29
3.1.2 Proses Parametreleri.....	32
3.1.3 Plazma Spreyin Sınıflandırılması.....	37
3.2 Fonksiyonel Kademelendirilmiş Kaplamalar	38
3.3 APS Prosesinde Kullanılan Malzemeler	39
4. SERAMİK MALZEMELERİN KIRILMA TOKLUĞU.....	41
4.1 Seramik Malzemelerde Kırılma Tokluğu Ölçümü	43
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	47
5.1 Amaç ve Deneysel Yöntem.....	47
5.2 Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Cihazlar	48
5.2.1 Kullanılan malzemeler	48
5.2.2 Kaplama Malzemesinin Hazırlanması	48
5.2.3 Altlık Malzemesinin Hazırlanması	50
5.2.4 Plazma Sprey Cihazı ve Sprey Parametreleri	51
5.2.5 Kaplamaların Mikroyapı ve Faz Karakterizasyonları	51
5.2.6 Kaplamaların Mekanik Özelliklerinin Karakterizasyonu	52
5.2.7 Kaplama Prosesi.....	53

6. SONUÇLAR VE İRDELEMELER.....	55
6.1 Karakterizasyon Testleri Sonuçları	56
6.1.1 AFM Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü	56
6.1.2 XRD Analizleri	56
6.1.3 Mikroyapı Analizleri	59
6.1.3.1 Kaplama Malzemelerinin Mikroyapı Analizi	59
6.1.3.2 Kaplamaların Mikroyapı ve Elementel Analiz Sonuçları	61
6.1.4 Mekanik Özelliklerin Karakterizasyonu	67
6.1.5 Balistik Testlerin Sonuçları	71
7. GENEL SONUÇLAR	87
KAYNAKLAR.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	97

KISALTMALAR

APS	: Atmosferik Plazma Sprey
CE	: Kimyasal Enerji
CTE	: Termal Genleşme Katsayısı
D-gun	: D-Tabanca TM
FGC	: Fonksiyonel Kademelendirilmiş Kaplama
FGM	: Fonksiyonel Kademelendirilmiş Malzeme
HEAT	: Yüksek Enerjili Anti-tank Mühimmatı
HEL	: Hugoniot Elastisite Limiti
HVOF	: Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Spreyleme
IPS	: İnert Plazma Sprey
KE	: Kinetik Enerjili
PMK	: Polimer Matriksli Kompozit
PSZ	: Kısmi Stabilize Olmuş Zirkonya
PVC	: Poli Vinil Klorür
STANAG	: Standardizasyon Anlaşması
TBC	: Termal Bariyer Kaplama
TDK	: Türk Dil Kurumu
TTZ	: Dönüşüm Mekanizmasıyla Toklaştırmış Zirkonya
TZP	: Tetragonal Zirkonya Polikristalin
VPS	: Vakum Plazma Sprey
YSZ	: Yitria ile Stabilize Edilmiş Zirkonya
ZTA	: Zirkonya ile Toklaştırmış Alümina

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Zırh yapısında bulunan malzemelerin özelliklerinin balistik performansa etkisi.....	4
Çizelge 5.1 : Kaplamada kullanılan malzemelerinin ticari özellikleri	48
Çizelge 5.2 : Plazma sprej parametrelerinin kaplama yapısına etkisi.....	53
Çizelge 6.1 : Al_2O_3 plaka, %90 Al_2O_3 +%10 ZrO_2 kaplama, %85 Al_2O_3 +%15 ZrO_2 kaplama ve fonksiyonel kademeli kaplama için sertlik ölçümü sonuçları.....	69
Çizelge 6.2 : Al_2O_3 plaka, %90 Al_2O_3 +%10 ZrO_2 kaplama, %85 Al_2O_3 +%15 ZrO_2 kaplama ve fonksiyonel kademeli kaplama için kırılma tokluğu ölçümü sonuçları K_{Ic}	70
Çizelge 6.3 : Balistik test tasarımları	71

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Temel kompozit zırh yapısı.....	4
Şekil 2.2: Seramiklerde balistik darbe sonrası meydana gelen çatlak formu	5
Şekil 2.3: Alümina yapı üzerinde şok dalgalarının bıraktığı etkiler.....	7
Şekil 2.4: Balistik darbe sonrası seramikte meydana gelen Hertzian konik ve radyal çatlaklar	9
Şekil 2.5: Çekirdek malzemelerin basma ve kayma dayanımlarının karşılaştırılması.....	13
Şekil 2.6: Çekirdek malzeme kullanılmış zırh yapısı	13
Şekil 2.7: Alüminyum köpük kullanılmış zırh paketi.....	13
Şekil 3.1: Nötr bir atomun şematik gösterimi.....	20
Şekil 3.2: Plazma sprej sistemi	21
Şekil 3.3: Ark aktarımı olmayan torç	23
Şekil 3.4: Ark aktarımı olan torç	23
Şekil 3.5: Plazma torçu şeması	24
Şekil 3.6: Plazma sprej kaplamada kullanılan tozlar	24
Şekil 3.7: Ergimiş parçacık ışınının açılması.....	26
Şekil 3.8: Altlık üzerinde parçacık deformasyonu a) pürüzsüz yüzeyli altlık üzerine b) kaba yüzeyli altlık üzerine.....	27
Şekil 3.9: Tamamı ile ergimiş partikülün altlık malzeme ile etkileşimi.....	29
Şekil 3.10: Plazma sprej kaplamada proses parametreleri.....	32
Şekil 3.11: Altlık üzerinde oluşan kaplama tipleri	35
Şekil 3.12: Kaplama yapısı	36
Şekil 3.13: Plazma Sprejin tarihsel gelişimi	37
Şekil 3.14: Plazma sprejin sınıflandırılması	38
Şekil 4.1: Dönüşüm ile toklaştırılmış zirkonya mikroyapısı	42
Şekil 4.2: Vickers indenter ile bırakılmış radyal çatlak.....	43
Şekil 4.3: Kırılma tokluğu ölçüm parametreleri	44
Şekil 4.4: Fonksiyonel kademeli kaplamalar için kırılma tokluğu ölçüm numunesi	45
Şekil 5.1: Üretim Proses Akım Şeması	47
Şekil 5.2: Kaplama malzemelerinin karıştırılmasında kullanılan a) gezegen tipi değirmen b) bilyalar ve öğütme kabı	49
Şekil 5.3: a) Sinter fırını b) Ultrasonik banyo	49
Şekil 5.4: Kaplama malzemelerinin hazırlama adımlarının gösterimi	50
Şekil 5.5: Kumlama cihazı.....	50
Şekil 5.6: Termal Sprej Kaplama Cihazı	51
Şekil 5.7: JEOL JSM-7000F tarama elektron mikroskobu.....	52
Şekil 5.8: Kesme cihazı	52
Şekil 5.9: Parlatma cihazı	52
Şekil 5.10: Mikrosertlik ölçüm cihazı	53
Şekil 6.1: Kumlama öncesi alümina yüzeyinin a)2 boyutlu b)3 boyutlu görüntüsü..	57
Şekil 6.2: Kumlama sonrası alümina yüzeyinin a)2 boyutlu b)3 boyutlu görüntüsü..	58

Şekil 6.3: Kaplamada kullanılan a) YSZ, b) korundum toz malzemelerinin faz analizi sonuçları	59
Şekil 6.4: Kaplama malzemelerinin SEM görüntüleri a) YSZ b) Al_2O_3	60
Şekil 6.5: a) Fonksiyonel kademeli kaplamanın SEM görüntüsü, b) %85 Al_2O_3 + %15 ZrO_2 kaplamanın SEM görüntüsü c) %90 Al_2O_3 + %10 ZrO_2 kaplamanın SEM görüntüsü	62
Şekil 6.6: Kaplama yapısındaki porozitelerin SEM görüntüsü.....	63
Şekil 6.7: Kaplamada görülen splat yapısı.....	64
Şekil 6.8: Kaplamadaki YSZ ve Al_2O_3 yapısı	64
Şekil 6.9: İndentasyon sonrası oluşan mikroçatlak yapısı	65
Şekil 6.10: Kaplamadaki tam ve boşluklu saplanmaların tespiti	66
Şekil 6.11: Kaplama içerisindeki a) gri, b) beyaz kısmın elementel analizi.....	66
Şekil 6.12: a) Al_2O_3 plakada, b) %90 Al_2O_3 +%10 ZrO_2 kaplamada, c) Fonksiyonel kademeli kaplamada, d) %85 Al_2O_3 +%15 ZrO_2 kaplamada sertlik ölçümleri için oluşturulan indentasyon izlerinin SEM görüntüleri	68
Şekil 6.13: Kaplama yapısında YSZ boyunca çatlak ilerlemesi	71
Şekil 6.14: 1. Deney seti, 1. Balistik test numunesi gösterimi	72
Şekil 6.15: 1. Balistik test numunelerinin atış öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri .	73
Şekil 6.16: 1. Deney seti 2. Balistik test numunesi gösterimi	73
Şekil 6.17: 2. Balistik test numunelerinin atış öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri .	74
Şekil 6.18: 2. Deney seti 1. Balistik test numunesi gösterimi	75
Şekil 6.19: Balistik test numunelerinin atış öncesi (a) ve sonrası (b, c) görüntüleri .	76
Şekil 6.20: 3. Balistik test sonunda etrafa saçılan seramik parçalarının görüntüsü...	77
Şekil 6.21: 3. Deney seti 1. Balistik test numunesi gösterimi	77
Şekil 6.22: 3. Balistik test numunesinin atış öncesi (a) ve sonrası (b,c) görüntüleri .	78
Şekil 6.23: 4. Balistik test sonunda etrafa saçılan seramik parçalarının görüntüsü...	79
Şekil 6.24: Kaplama yapılmamış seramik numune ile hazırlanan paketin atış sonrası görünümü	80
Şekil 6.25: 2. Deney seti 3. Balistik test numunesi gösterimi	80
Şekil 6.26: 3. Balistik test numunelerinin atış öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri .	81
Şekil 6.27: 3. Balistik test numunelerinin atış sonrası (c) görüntüsü	81
Şekil 6.28: 5. Balistik test sonunda etrafa saçılan seramik parçalarının görüntüsü...	82
Şekil 6.29: Kaplama yapılmamış seramikte balistik test sonrası meydana gelen çatlak ilerlemesi görünümü	82
Şekil 6.30: 3. Deney seti 3. Balistik test numunesi.....	83
Şekil 6.31: 6. Balistik test numunelerinin atış öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri .	84
Şekil 6.32: 6. Balistik test sonunda etrafa saçılan seramik parçalarının görüntüsü...	84

Al₂O₃ ve Al₂O₃-ZrO₂ KAPLI SERAMİK PLAKALARIN BALİSTİK DAYANIMININ İNCELENMESİ

ÖZET

Zırh kavramı, mühimmat tiplerinin çeşitliliği ve koruma seviyesi gereksinimlerinin değişmesiyle birlikte günümüzde plaka halindeki çeliklerden daha fazlasını nitelemektedir. Kompozit zırhlar, muharebe sahalarında ilk kez 2. Dünya Savaşı'nda İngiliz savaş tanklarında “Chobham zırhı” olarak kendini göstermiştir. Araç mobilitesinin önem kazanması ve malzeme teknolojisinin gelişmesiyle birlikte daha hafif ve daha etkin kompozit zırhların üretimi gerçekleştirilmektedir. Zırh üretiminde en düşük ağırlıkla en az penetrasyon derinliği ve çoklu atışa en fazla dayanım amaçlanmaktadır. Bunu sağlamak için kompozit zırh bünyesindeki seramik plakaların kırılma mekanizmasını kontrol altına almak yapılması gereken işlerden biridir. Bunun için de kinetik enerjili mühimmatların oluşturduğu şok dalgalarının etkisini en aza indireyecek yüksek hugoniot elastisite limitli çekirdek malzemeler kullanılmaktadır.

Bu çalışmada zırh uygulamalarında kullanılan seramiklerin çoklu atışa dayanımının artırılması için çekirdek malzemelerden daha hafif yapılar kullanılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda seramik plakaların yapışma yüzeyleri termal sprey kaplama tekniklerinden atmosferik plazma sprey yöntemi kullanılarak yüksek kırılma tokluğuna sahip alümina-zirkonya kompozitleri ile kaplanmıştır. Kaplamalardan biri fonksiyonel kademeli olarak yapılmış olup etkinliği diğer kaplamalarla kıyaslanmıştır.

Büyütülen kaplamaların, ilave edilen ZrO₂ oranına göre sertlik ve kırılma tokluğu değişimleri yaklaşık olarak hesaplanmış, kaplama öncesi kaplama malzemelerinin faz analizleri yapıp bulunan fazlar kaplama sonrasındaki fazlarla karşılaştırılmıştır. Kaplama morfolojisinin incelenmesi alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu ile yapılmıştır. Son olarak kaplanmış malzemelerle zırh paketi oluşturulup balistik testler gerçekleştirilmiştir. Balistik testler sonucunda oluşturulan kaplamanın etkinliği kanıtlanmıştır.

INVESTIGATING THE BALLISTIC ENDURANCE OF Al_2O_3 AND Al_2O_3 - ZrO_2 COATED CERAMIC PLATES

SUMMARY

The word armor today, with the variety of ammunition types and protection level requirements means more than sheet RHA steel. Composite armors first revealed themselves in the battlefield World war II as “Chobham Armor” on English battle tanks. As the mobility of the vehicles have become more important and material technology have advanced, lighter and more efficient composite armors began to be produced. Lower penetration and higher multi hit resistance in a lighter armor is desired in armor production. One of the possible ways to ensure this is to control the fracture mechanism of the ceramic tiles in composite armor systems. In order to achieve this goal, core materials with high hugoniot elasticity limit are used to lower the effect of shock waves caused by kinetic energy ammunition.

The aim of this study is to use structures lighter than core materials in order to increase the multi hit resistance of ceramics used in armor applications. The adhesion surfaces of the ceramic tiles are coated with alumina-zirconia composites with high fracture toughness, using atmospheric plasma spray method, which is one of the thermal spray methods. One of the coatings was grown as functionally graded and compared to others in efficiency.

The effect of zirconia addition on the hardness and fracture toughness of the grown coatings were investigating and the phases of the coating materials were compared to those of the coated surfaces using phase analysis. Field emission scanning electron microscope was used to examine coating morphology. Finally, ballistic tests were performed on armor packages prepared with coated materials. The efficiency of the coatings was proved by these ballistic tests.

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Amacı

Zırh TDK sözlüğünde her ne kadar “savaşlarda ok, kılıç, süngü vb. silahlardan korunmak için giyilen, demir ve tel levhalardan yapılmış giysi” ve “savaş gemilerinin veya bazı araçların dışına kaplanılan çelik levha” olarak tanımlansa da teknolojinin gelişmesiyle birlikte bu tanıma gün geçtikçe daha fazla malzeme, daha farklı yöntemler dahil olmaktadır. İleri teknoloji kullanılarak yapılan çalışmaları mikronun binde biri ölçülerde karakterize eden cihazların icadı bütün teknolojilerin gelişimini hızlandırdığı gibi zırh teknolojisini de ileri bir boyuta taşımıştır. Basit anlamıyla zırh, hala bir kişiyi veya nesneyi dışarıdan gelecek darbeye karşı koruyan nesne olsa da zırhı oluşturan malzemelere ve onların üretim yöntemlerine her geçen gün bir yenisi daha eklenmektedir.

1. Dünya Savaşı’nda kullanılan ağır çelik zırhlar 2. Dünya Savaşı’nda yerini İngilizlerin “Chobham zırh” adını verdiği çeliğin yarısı kadar ağırlığa sahip seramik çarpma yüzeyli, polimer matrisli kompozit arka plakaya sahip yapılara bırakmıştır. Günümüzde bu yapı, malzeme modifikasyonlarıyla birlikte hala uygulanmaktadır. Yapılan modifikasyonlarda, zırh paketinin ağırlığını azaltma, penetrasyon ve çoklu atışa dayanımını artırma konu edilmektedir.

Seramik ön katman darbe aldıktan sonra parçalanır, kendisiyle birlikte komşu seramik karoların da etkinliğini yitirmesine neden olur. Bu durum ile birlikte bir sonraki atış tam penetrasyonla sonuçlanır. Seramik malzeme üzerindeki hasarın en aza indirgenerek seramiğin çoklu atışa dayanımını sağlamak için çekirdek malzeme adı verilen ve şok dalgalarına dayanımı tanımlayan hugoniot elastisite limiti yüksek yapılar kullanılır. Ancak bu yapılar ilave ağırlığa neden olmaktadır.

Bu çalışmada, alümina plakaların yapısal bütünlüğünün korunması ve çoklu atışa dayanımının artırılması için yüksek ağırlık artışı olmaksızın bir yapı oluşturulması amaçlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda kompozit zırh yapısında kullanılan %99 safiyetteki alümina karoların yapışma yüzeylerine kaplama yapılması konu edilmiştir.

Bu konuda yöntem olarak termal sprej kaplama yöntemlerinden plazma sprej yöntemi kullanılmıştır.

Bu yöntemle hizmet etmesi için alümina ve itriya ile dengelenmiş zirkonya malzemeleri (YSZ) kullanılmıştır.

Çalışmanın sonucunda amaçlandığı gibi balistik testler sonrasında alümina plakalarda meydana gelen kırılma bölgesel kalmış, plakaların yapısal bütünlükleri korunmuştur. Bu sayede zırh paketinin çoklu atışa dayanımı, seramik karo başına yaklaşık 2 gramlık ağırlık artışıyla %50 oranında arttırılmıştır.

Belirlenen APS kaplama parametreleri ile %11 proziteye sahip, aynı malzemelerin kullanıldığı diğer çalışmalara göre daha sert kaplamalar elde edilmiştir.

Mikroyapı incelemelerinde YSZ varlığının çatlak ilerlemelerini önemli ölçüde engellediği görülmüştür.

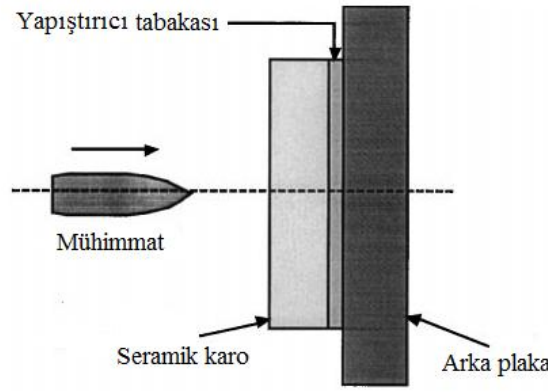
2. KOMPOZİT ZIRH TEKNOLOJİLERİ

Temel anlamı ile “bir nesneyi veya canlıyı herhangi bir tehdide karşı en az hasarla korumayı sağlayan malzeme veya malzemeler bütünü” olan zırh kavramı askeri kullanımın yanında günlük hayatımızda da yer bulmuş olup, karşısında durduğu tehdidin çeşidine göre yapısında bulunan malzemeler ve malzemelerin kullanım miktarları farklılık gösterir. Günümüz zırhı, zihinlere yer eden metal yığını görünümünden çok uzak, mühendislik alanındaki ilerlemelere paralel olarak gelişmektedir. Eski teknolojinin çelik zırhları, kimi uygulamalarda yerini yüksek sertlikte uranyum taneleri içeren çeliklere, kompozit veya reaktif malzemelere bırakmış, kimi zamansa bu üçlünün birlikte kullanılmasıyla korunma sağlanmıştır.

Farklılaşan tehdit çeşitleriyle birlikte farklı zırh yapıları da ortaya çıkmıştır. Örneğin 1940’ların ortalarında Almanya’nın HEAT mühimmatlarını kullanmasıyla beraber zırh kavramı farklı bir boyuta taşınmıştır.

Seramiklerin zırh yapısında kullanılması 1960lı yıllara dayanır. İngiltere’deki tank araştırma merkezi Chobham Common’daki çalışmalar sonucu ortaya çıktığı için önceleri “chobham zırhı” olarak anılsa da günümüzde daha yaygın olarak “seramik araç zırhı” olarak anılmaktadır [1]. Detayları paylaşılmamakla birlikte, seramiğin metal matriks kompozisyonu içinde bulunduğu, arka plakalar ve elastik katmanlar ile desteklendiği bilinmektedir. Standart bir seramik kompozit araç zırhı Şekil 2.1’de görülmektedir [2].

Basit olarak seramik karoların metalik veya kompozit arka plakalara yapıştırılmasıyla üretilen kompozit zırhlar hafif ve üstün balistik performansa sahip olup bu özellikler maliyetle sınırlandırılmıştır. Zırh malzemeleri yüksek sertlikleri, mukavemetleri, geliştirilmiş kırılma toklukları, darbe dayanımları sayesinde yüksek penetrasyon dayanımı gösterirler. Bu tip malzemelerin bunun yanında düşük ağırlığa, yoğunluğa sahip olması, kolay uygulanabilir ve tamir edilebilir olması, düşük maliyetli ve ortam koşullarından en az etkilenen yapıda olması gerekmektedir.



Şekil 2.1: Temel kompozit zırh yapısı [4].

Bir tek zırh paketinde bütün bu özellikleri yakalayabilmek için farklı malzemelerin kombinasyonlarını kullanmak gerekmektedir. Zırh kavramında penetrasyon mekanizmasını anlamak için tasarımda kullanılan her malzemenin etkisinin anlaşılması gerekir.

Kompozit zırh yapısında bulunan malzeme özelliklerinin balistik performansa etkisi Çizelge 2.1’de gösterilmiştir [3].

Çizelge 2.1 : Zırh yapısında bulunan malzemelerin özelliklerinin balistik performansa etkisi [2]

Malzeme Özelliği	Balistik Performansa Etkisi
Mikroyapı (Tane boyutu, Minör fazlar, Faz dönüşümleri, Porozite)	Sol kolondaki özellikleri etkiler
Yoğunluk	Zırh paketi ağırlığı
Sertlik	Çekirdekte oluşan hasar
Elastik Modül	Şok dalgası dağılımı
Mukavemet	Çoklu atış dayanımı
Kırılma Tokluğu	Çoklu atış dayanımı, yapısal bütünlük
Kırılma çeşidi (İntergranüler-Transgranüler)	Enerji absorpsiyonu

Pasif koruma göz önünde bulundurulduğunda tipi ne olursa olsun, “strike face” denilen çarpma yüzeyine temas eden mühimmatta tahribat meydana gelir. Kinetik enerjili mühimmatlarda bu, mermi çekirdek ucunun aşınmasıyla, kimyasal enerjili mühimmatlarda ise jet rotasının saptırılmasıyla gerçekleşir. Çarpma yüzeyi ne kadar sert olursa mühimmattaki tahribat o kadar fazla olur [4]. Bu yüzden çarpma yüzeyi olarak “Haddelenmiş Homojenize Zırh Çelikleri (RHA)” ve ağırlık avantajları göz önünde bulundurulduğunda seramikler yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek

sertlikli seramikler kinetik enerjili (KE) mühimmatlarda çekirdek ucunu aşındırırken kimyasal enerjili (CE) mühimmatlarda kırılma mekanizmasıyla jette süreksizlikler meydana getirerek jet etkinliğinin azalmasını sağlar [3].

Kompozit zırh teknolojilerinde bulunan arka tabakaların görevi, seramik çarpma yüzeyiyle enerjisinin bir kısmını deformasyona harcamış KE'li mühimmatın kalan enerjisini ya tamamen yok etmek ya da maksimum enerji absorpsiyonu ile merminin yoluna devam etmesini sağlamaktır. Kompozit zırhlarda en sık kullanılan arka plaka polimer matrisli kompozitlerdir [1].

Kompozit zırh uygulamalarında,

- Arka plakanın görevi darbe enerjisini absorblayarak zırh paketinin kırılma tokluğunu ve çoklu atışa dayanımı arttırmak
- Çarpma yüzeyinde bulunan ve zırh paketinin %25-45'ini oluşturan sert seramik yüzeyin görevi penetratörün ucunu aşındırmak, böylece etkinliğini azaltmaktır [2].

Ağırlık, zırh uygulamalarında penetrasyon dayanımından sonra ikinci önemli faktördür. Performanstan ödün verilmeden zırhın ağırlığının azaltılması ile aracın mobilitesine önemli bir katkı sağlanır. Ağırlık azaltımı ayrıca aracın hız ve manevra kabiliyetine olduğu kadar yakıt tüketimi ve görünüm bakımından da olumlu sonuçlar doğurur.



Şekil 2.2: Seramiklerde balistik darbe sonrası meydana gelen çatlak formu [5].

Seramik kullanımı, zırh yapısına ağırlık avantajının yanında çoklu atışa dayanım ile ilgili problemleri beraberinde getirir. Bunun nedeni seramiklerin yüksek sertliklerinin yanında kırılkanlıklarının da yüksek olmasıdır. Seramikler yapıları gereği gözenek, çatlak, çizik gibi küçük hatalar içerdiklerinden kırılırlar. Bu yüzden kırılma

toklukları düşüktür. Balistik test sonrası seramiklerde meydana gelen çatlak dağılımı Şekil 2.2’de görülmektedir [4]. Seramiklerin düşük kırılma tokluğu, malzemenin darbe anında parçalanmasına neden olur. Kristal yapılarının farklı olması neticesinde her seramiğin kırılma şekli farklıdır. Malzemelerin darbe altında farklı kırılma davranışları göstermeleri aynı zamanda malzemenin hugonoit elastisite limiti ile de ilgilidir [5].

Dalga, bir fizik terimi olarak, uzay veya uzayzamanda yayılan ve sıklıkla enerjinin taşınmasına yol açan titreşime verilen isimdir. Nesne titreştiği zaman ses dalgalarını oluşturur. Bu dalgalar havayı da titreştirir. Böylece ses dalgaları, hava aracılığı ile nesneden uzağa doğru yayılır. Duyu organımıza ulaşan ses dalgalarının, kulak zarımızda titreşimlere neden olduğu gibi nesnelere çarpan ses dalgaları da titreşimlere neden olur. Bu titreşimlerin bir kısmı malzeme içinde ilerlerken bir kısmı geri yansıtılır [5].

Ses kaynağın hızı, ses hızına ulaşırsa, ses dalgaları üst üste biner. Yani kaynak, çıkardığı ses dalgalarıyla beraber aynı hızda ilerlemeye başlar. Eğer hareketli ses kaynağının hızı, sesin yayılma hızını geçerse ses, patlama sesi olarak duyulur. Bu durumda dalga, ışın gibi konik bir alana yayılır ve şok dalgaları olarak isimlendirilir. Yani ilerleyen cisim o kadar hızlanır ki dalgalar cisimin üzerine doğru kapanarak cisimle aynı hızda gitmeye başlar [5].

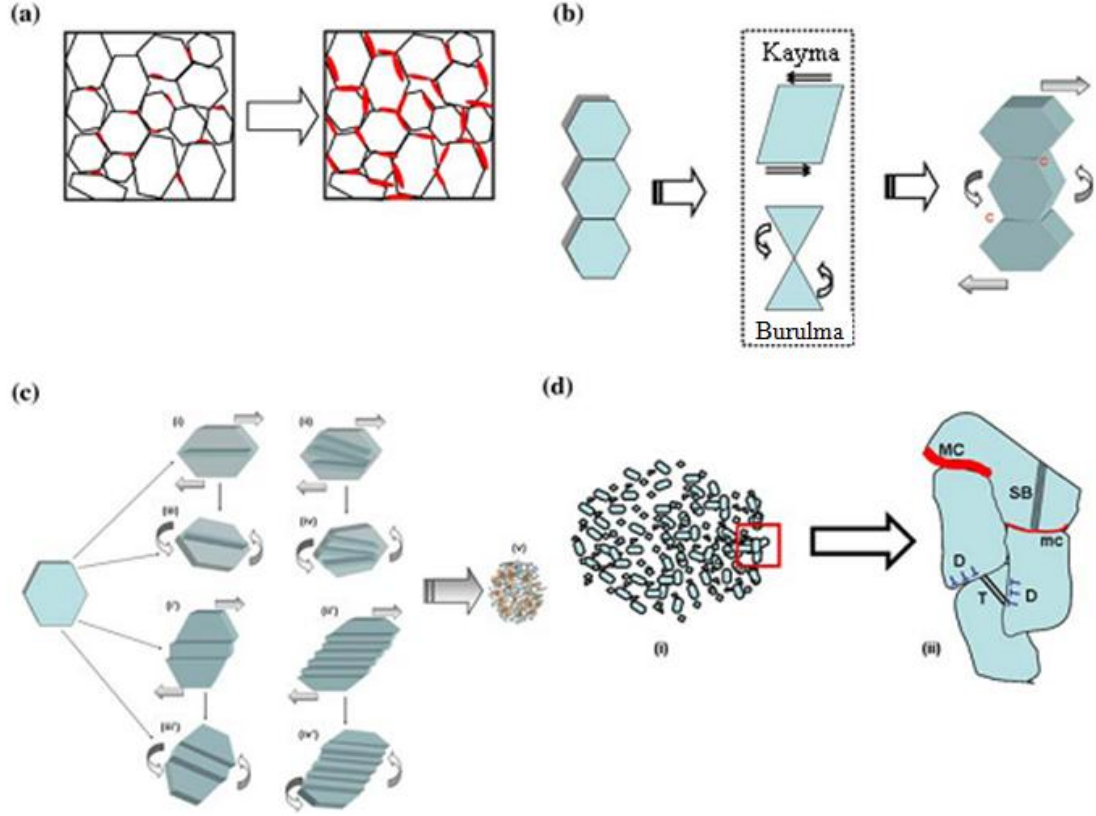
Dalgalar, moleküller üzerinde titreşim etkisi yarattığından, şok dalgasını oluşturan üst üste binmiş ses dalgalarının titreşim etkisi de katlanmış olur. Bu da bir basınç meydana getirir. Basınç artışı herhangi bir nedenden dolayı çok kısa bir sürede belirli basınç farkı yaratacak şekilde gelişirse bir limit değerden sonra şok dalgası oluşur ve bu dalga zamana bağımlı elastik olarak genişerek ilerler. Açılı ve dik olmak üzere iki tip şok dalgası vardır. Açılı dalga yüzeye belirli bir açıyla gelirken dik dalga yüzeye normal olarak gelir [5].

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{(\gamma + 1) - (\gamma - 1)\frac{\rho_2}{\rho_1}}{(\gamma + 1)\frac{\rho_2}{\rho_1} - (\gamma - 1)} \quad (2.1)$$

Rankine-Hugoniot denklemi (2.1), herhangi bir yapıya dik olarak gelen şok dalgalarının davranışlarını belirleyen ve yöneten denklemdir. Kütle, momentum ve enerjisini koruyan kararlı akış durumuna sahip akışkanların davranışında kullanılır. Dalga cinsi elastik dalgadır. Bir ortamda ilerleyen dalganın farklı bir ortamın sınırı

ile karşılaştığında dalganın ne kadarının geçeceği veya yansyacağı bu denklem ile belirlenir [2].

Şok dalgalarının sıcak preslenmiş bir alümina plakada meydana getirdiği hasar mekanizması Şekil 2.3'te gösterilmiştir [6]:



Şekil 2.3: Alümina yapı üzerinde şok dalgalarının bıraktığı etkiler

Şekilde şok hasarının alümina üzerinde bıraktığı etkiler özetlenmiştir. (a) doğal üretim yöntemi ile sinterlenmiş mikroyapı (sol) ve akış yoğunluğu ve boyutundaki artış (sağ), (b) inelastik hata oluşumu ve alüminada bir sonraki şok için kuluçka dönemi: sinterlenmiş mikroyapı (sol), mikro çatlaktan ayrı olarak, çekme ve basma gerilmeleri nedeniyle, taneler bölgesel olarak kayar ve hidrostatik gerilme bileşeni dolayısıyla burulma (orta) ve kayma- burulma durumlarını izleyen, bağımsız veya eş zamanlı gerçekleşen bölgesel deformasyona uğramış taneler (sağ). Bu aşama aynı zamanda tane sınırı mikroçatlaklarının artmasına da (C) neden olur. İn elastik hasar büyümesi (c), şoku takiben alüminada meydana gelen birleşme ve parçalanma aşaması (i) uygun yönlendirilmiş tane üzerinde tek düzlem kayma kırılması, (i') kayma kırılmasına uğramış tek tane, (ii) uygun yönlendirilmiş tanede çoklu düzlemlerde kayma kırılması başlangıcı, (ii') çoklu düzlemlerde kayma kırılmasının ardından tekli tane, (iii) uygun yönlendirilmiş tanedeki tekli düzlemde burulma

kırılması başlangıcı, (iii') burulma kırılmasının ardından tekli tane, (iv) uygun yönlendirilmiş tanede çoklu düzlemlerde burulma kırılması başlangıcı, (iv') çoklu düzlemde burulma kırılmasının ardından tekli tane, (v) proses kendini çoklu tanelerde tekrar eder. Bu taneler büyür, birleşir ve fragmentasyona neden olmak için çok hızlı ürer ve (d) 6.5 GPa'lık şok deneyiminin ardından alüminanın toplanan parçalarda (solda) ve mikroçatlakların varlığı (MC), kayma bandı (SB), dislokasyonlar (D), istif hataları (T) gibi (sağda) karakteristik hasar ve deformasyon görülür.

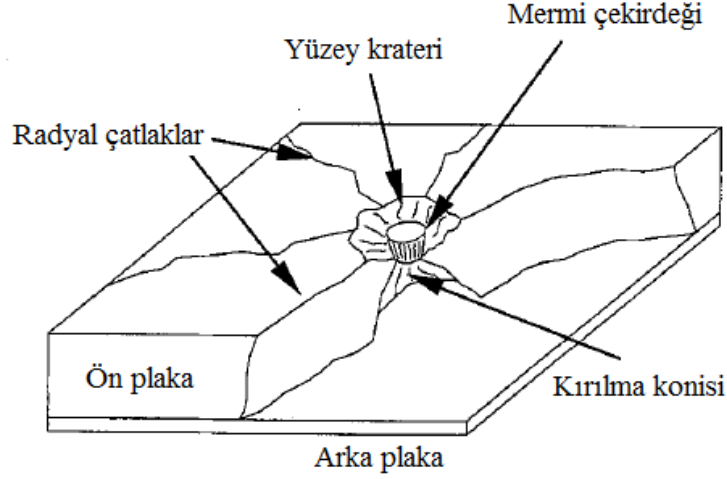
Her ortam geçişinde ortam yoğunluğu oranları hugoniot şok karakteri cinsinden ifade edilir. Her yapının bu yoğunluk, sıcaklık ve özellikle zırh malzemelerinde geometrik olarak bu dalgalara karşı koyan ve şok dalgasının etkisine cevabını belirleyen bir “Hugoniot Elastik Limiti” vardır [2]. Zırhlarda ise bu limit, gelen tehdit parçacığının veya patlamanın yarattığı şok dalgasına zırhın ne kadar bir mukavemetle direnebileceğini göstermektedir. Diğer bir deyişle, normal mukavemet ve Young modülü, somut yüklemelere karşı olan dayanımı nitelerken Hugoniot elastik limit ise kuvvet mertebesi yüksek şok dalgalarına karşı malzemenin vereceği elastik tepkinin, malzemede meydana gelecek hata başlangıcının limitidir [6]. Ancak çalışmalar, mikropplastik deformasyonlar gibi mikrohataların da Hugoniot elastik limitin altında gerçekleştiğini belirtmektedir. Bu durumda Hugoniot elastik limitin seramik malzemenin porozitesine, tane boyutuna ve saflığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır [5].

Hugoniot elastik limit formülünde (2.2) ρ_0 = malzemenin yoğunluğunu,

c_L = uzunlamasına dalga hızını, u_{HEL} = parçacık hızını temsil etmektedir [16].

$$\sigma_{HEL} = \frac{1}{2} \rho_0 c_L u_{HEL} \quad (2.2)$$

Hugoniot elastik limiti düşük olan seramiklerde şok dalgasının ardından gelen darbe, seramikte koni şeklinde bir kırılmaya neden olur. Şekil 2.4'te kırılma konisi olarak gösterilen ve Hertzian konisi denilen bu kırılma türü amorf veya kriptokristalin malzemelerde darbe sonrası tam veya parçalı koni şeklinde oluşur. Bu çatlaklar çarpma anından en geç 20 μs sonra ortaya çıkar. Seramik karonun kalınlığına göre konik kırılmanın tamamlanması 96 μs 'ye kadar sürer [6].



Şekil 2.4: Balistik darbe sonrası seramikte meydana gelen Hertzian koni ve radyal çatlaklar.

Seramikler yüksek HEL'e sahip olup (6-20 GPa) parçacıklanmaya karşı dayanımları çok düşüktür (0,3-0,6 GPa). Bu durum, HEL'lerinin yarısı kadar düşük gerilmelerde bile varolan hataların harekete geçerek yeni hatalar oluşturmamasından kaynaklanmaktadır.

Arka plakanın tek başına kullanımı, tehdidin kinetik enerjisinin artmasıyla birlikte şok dalgalarının absorblanması için tek başına yeterli gelmemektedir. Şok dalgalarının arka plakadan tekrar seramiğe yansımalarının, böylelikle seramikteki konik çatlak oluşumunun önlenmesi için ara katmanlara ihtiyaç duyulur. Bu katmanlar aynı zamanda PMK olan arka plakaların salınım yapmasını engelleyerek plakanın etkinliğini artırır [2].

Mühimmatın polimer matriksli kompozit tabakaya en az kinetik enerji ile transferini sağlamak için seramik ile kompozit katmanlar arasına veya kompozit kumaşlar arasına çekirdek malzemesi denilen yapılar ilave edilerek sandviç paketler oluşturulmaktadır. Bu ilavelerden bazıları aşağıda belirtilmiştir:

2.1. Köpük Çekirdekler:

Çekirdek malzemesi olarak en çok kullanılan malzemelerden biri köpüklerdir. PVC, PS, PU, akrilik, PEI, SAN gibi sentetik polimerlerden üretilebildiği gibi metal ve seramik köpükler de inşaat ve sanayiye yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanılan malzemelerin yoğunluk aralığı 40-200 kg/m³, kalınlık aralığı 5-50 mm'dir.

2.1.1. Seramik Köpükler:

Köpük seramikler birbiriyle temas halindeki açık gözeneklerin sürekli bir seramik bağ ile bağlanmasından oluşan üç boyutlu gözenekli malzemeler olup ileri tip süzgeç olarak metal dökümü esnasında eriyik metalin içindeki empüritelerin döküm içine karışmaması, böylelikle ürünün safiyetinin artması için kullanılır. Ağsı yapıdaki açık gözeneklerin boyutu çalışma koşullarına uygun olarak milimetre skalasında ayarlanabilir. Seramik köpük filtrelerden eriyik metalle kimyasal reaksiyon vermemesi, ön yüzde tutamadığı empüriteleri iç kısımda tutması ve metal akışının stabil olması beklenir.

Kapalı gözenekli seramik köpükler hafif sandviç panelleri, fırın yardımcı malzemeleri, termal yalıtım malzemeleri, ısıtıcı elemanlar ve darbe absorblayıcılar olarak kullanılır.

Seramik köpükler üretim aşamasında önce şekillendirme, ardından da sinterleme işlemine tabi tutulur.

2.1.2. PVC Köpükler:

Kimyasal olarak PU-PVC hibrid şeklinde kullanılsalar da ticari olarak PVC köpük adıyla anılırlar. PVC köpükler statik ve dinamik yükü sönümleme özelliğine sahiptirler ve su absorblama yetenekleri yüksektir. -240°C ile +80°C sıcaklık aralığında kullanılabilmekte olup birçok kimyasala karşı dayanıklılık gösterirler. FRP ile kullanıldığı birçok uygulama vardır.

2.1.3. Polistren Köpükler:

Hafiflikleri (40 kg/m³), düşük fiyatları ve kumlanma kolaylıkları gibi önemli özellikleri bir arada bulundurmalarının yanı sıra düşük mekanik özelliklerinden dolayı yüksek performans komponent yapılarında da kullanılmaktadır.

2.1.4. Poliüretan Köpükler:

Poliüretan köpükler orta dereceli mekanik özelliklere sahip olup köpük yüzeyinde yaşlanma ve yüzey delaminasyonuna sebebiyet verme eğilimindedir. Hafif yüklemeli sandviç panellerde termal yalıtkan olarakda kullanılmaktadır. 150°C sıcaklığa kadar dayanımı ve iyi akustik absorbsiyon özelliği vardır. İstenilen şekilde ve profilde kesilip işlenebilir.

2.1.5. Alüminyum Köpükler:

Metalik köpükler son yıllarda yüksek eğme mukavemetleri, titreşim, ses ve enerji sönümleme özelliklerinin yanında düşük yoğunluklarından dolayı otomotiv, savunma, gemi, uçak ve uzay sanayinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Metal köpüklerden en çok kullanılanı ise üstün mekanik özellikleri ile birlikte uygun fiyatı olan alüminyum köpüklerdir. Üretim yöntemine ve kullanım yerine göre farklı yoğunluklarda ve farklı por özelliklerinde olabilirler.

2.2. Balpetekleri:

Yüksek sertliğe ve mukavemete sahip olup hafifliklerinden ötürü hava araçları ve askeri uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Termoplastik balpetekleri ekstrüzyonla üretilip istenilen kalınlıklarda kesilmekteyken diğer bal petekleri (örneğin kağıt ve alüminyumdan yapılanlar) çok aşamalı bir prosesten geçerek üretilmektedir. Bu durumda büyük ince plakalar kesilip ince yapıştırıcı tabakası ile paralel olarak yapıştırılır. Daha sonra plakalar yapıştırıcının kurlenmesi için sıcak prese sokulur. Dış tabaka FRP iken yassı malzeme tahta, termoplastik veya çeşitli metal saclar olabilir.

2.2.1. Alüminyum Balpeteği:

Yapısal malzemeler içinde en yüksek mukavemet/ağırlık oranını veren malzemelerden biridir. Alüminyum folyoyu yapıştırmak için birçok geometrik konfigürasyon mevcutken hegzagonal en çok tercih edilendir. Folyo kalınlığı ve hücre boyutu ile oynanarak malzeme özellikleri kontrol edilir. İyi mekanik özellikler ve düşük fiyata sahip olmasına rağmen örneğin korozyon gibi problemlerden ötürü uygulamalar dikkatli yapılmalıdır. Alüminyum balpeteğinin diğer bir dezavantajı ise mekanik hafızası olmayışıdır. Çekirdek kullanılan bir FRP plakasına darbe uygulandığı zaman balpeteği dönüşü olmayan bir şekilde deforme olur, FRP orjinal pozisyonuna geri gelir. Ancak yapışmanın bozulduğu bu alanda mekanik özellikler çok miktarda azalmaktadır.

2.2.2. Nomex Balpeteği:

Selüloz fiberlerden ziyade Kevlar temelli bir kağıt olan Nomex'den yapılan balpeteğidir. Fenolik reçineye daldırılarak sertlik, mukavemet ve yanmazlık

kazandırılır. Ayrıca balpeteklerinin içi fenolik reçine ile doldurularak da kullanılmaktadır. Yüksek mekanik özellikleri, düşük yoğunluğu, uzun kullanım ömrü gibi nedenlerle tercih edilebilse de fiyatının çok yüksek olması malzemenin önemli bir dezavantajıdır.

2.2.3. Termoplastik Balpeteği:

Hafif ve geri dönüştürülebilir olması bu malzemeler için bir avantajken kabuk malzeme ile yapışma mukavemetinin ve dayanıklılığının düşük olması önemli bir dezavantajdır. En çok kullanılan polimerler:

ABS: Rijitlik, darbe dayanımı, tokluk, yüzey sertliği ve boyutsal stabilite

Polikarbonat: UV stabilizasyonu, ışık transmisyonu, ısı rezistansı

Polipropilen: Kimyasallara dayanım

Polietilen: Genel kullanım amaçlı düşük fiyatlı çekirdek malzemesi

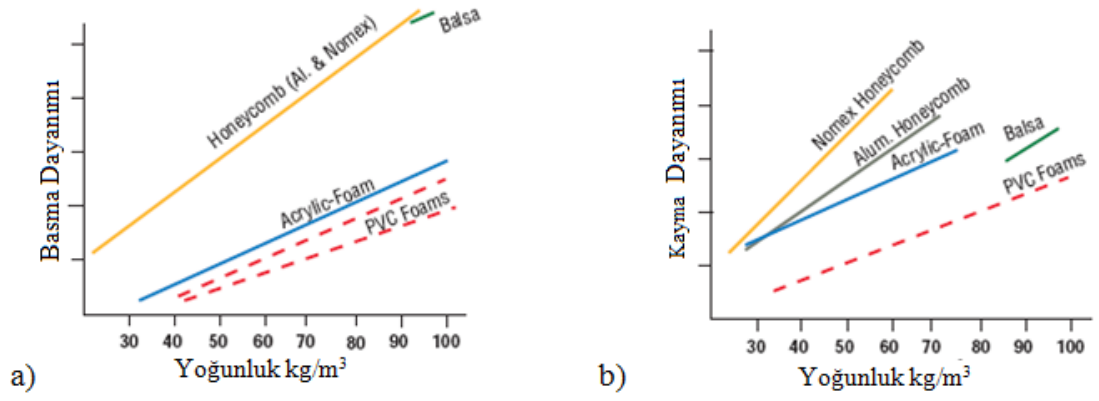
2.3. Tahta:

Doğanın balpeteği olarak tanımlanabilen tahta neme karşı dayanıklı olmadığından ve laminat veya reçine ile yeterince sarılmadığında çürüdüğünden fazla tercih edilmemektedir.

2.4. Balsa:

Basma özelliklerinin yanında iyi akustik absorpsiyon özelliği ve termal yalıtkanlığı vardır.

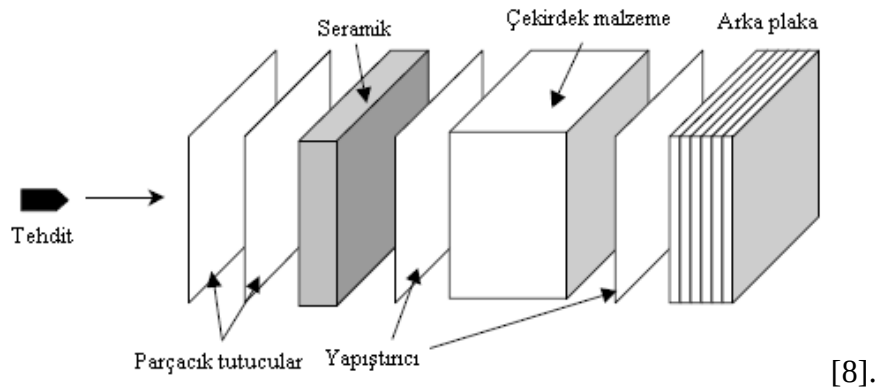
Çekirdek malzemelerin bazı mekanik özellikleri Şekil 2.5'te karşılaştırılmıştır. Buradan basma ve kayma dayanımının farklı malzemelerde paralel değerler izlediği görülmektedir. Bal peteği malzemelerin mekanik özelliklerinin köpük malzemelerden iyi olduğu açıkça görülmektedir. Bu durumun nedeni bal peteği malzemelerin homojen boşluk dağılımı ve yüksek HEL'leri olabilir. Basma dayanımında bal peteklei benzer davranışlar gösterirken kayma dayanımında Nomex, alüminyum bal peteğinden daha üstün mekanik özellik göstermektedir.



Şekil 2.1 : Çekirdek malzemelerin a) basma ve b) kayma dayanımlarının karşılaştırılması

Beklendiği gibi çekirdekler yoğunluklarının artmasıyla daha iyi mekanik özellikler gösterir.

Çekirdek malzemelerin zırh bünyesinde kullanımı Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Çekirdek malzeme kullanılmış zırh yapısı

Şekil 2.7’de ise kinetik enerjili bir mühimmatla atış yapılmış, çekirdek malzeme olarak alüminyum köpük içeren bir zırh paketi görülmektedir.



Şekil 2.7: Alüminyum köpük kullanılmış zırh paketi

Çekirdek malzemelerinin zırh kompozisyonlarında şok absorblayıcısı olarak görev yaptığı Şekil 2.7 ile desteklenmektedir. Önceki seramik fotoğraflarının aksine buradaki seramiklerde çatlak ilerlemesinin yoğun olmadığı açıkça görülmektedir.

Bu çalışmada üzerinde durulan nokta ise seramiklerin yapışma yüzeyine yapılacak ve çatlak ilerlemesini en aza indirgeyerek kırılma tokluğu yüksek bir seramik kaplama ile aynı etki yaratılabilirliğidir.

Bunun için öncelikle seramik altlık üzerine uygulanabilecek kaplamalar, ardından yapışma mukavemeti yüksek olmakla birlikte gözenekli yapıya sahip olan kaplamalar araştırılmıştır. Seramik altlık üzerine, kullanım amacı göz önünde bulundurularak uygulanabilecek ve gözenekli yapıya sahip iki çeşit kaplama yöntemi değerlendirilmiş olup bunlar sol-jel yöntemi ile termal spreycaplama yöntemidir.

Sol-jel yönteminde de termal spreycaplama yöntemindeki gibi seramik film elde edilebilmektedir. Diğer avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Farklı geometrilere sahip numune üzerine kaplama yapılabilir.
- Kontrollü ve düzgün bir kalınlık elde edilebilir.
- Nihai ürünün yapısı çözücü veya çözeltinin özelliklerine çok duyarlı değildir.
- Aynı anda fazla miktarda numune ekonomik olarak kaplanabilir.
- Kolay ve maliyeti ucuz bir yöntemdir.

Bunun yanında sol gel yönteminin dezavantajları aşağıda belirtilmiştir.

- Proses esnasında hacimsel büzüşme görülür.
- Büzüşme etkisiyle kontrolsüz gözenek oluşumuna rastlanır.
- Numunenin sadece bir yüzüne kaplama yapmak istendiğinde diğer yüze veya yüzlere maskeleme yapmak gerekir.
- Dakikalar süren termal bariyer yönteminin yanında sol jel yönteminin işlem süresi günler almaktadır.
- Jel oluşumu sırasında çözeltiyi sabit viskozitede tutmak güçtür.
- Sol jel yönteminde kullanılan organik çözücüler sağlığa zararlıdır.

Bu bilgiler ışığında kullanım amacına en uygun uygun özelliklerin termal spreylere kaplama çeşitlerinden atmosferik plazma spreylere kaplama işleminde sahip olduğu görülmüştür.

3. TERMAL SPREY KAPLAMA

Günümüzde yüzey kaplama teknolojileri, yüzeylerin modifikasyonu ve kaplanması olmak üzere iki mekanizmaya dayanmaktadır. Yüzeyin modifikasyonu, modifikasyonun sözlük anlamı ile ısıtma işlemi, ametal emprenyesi gibi yöntemlerle yüzeyde kalıtsal olmayan değişimler meydana getirmek iken kaplama, altlık üzerinden dışarıya doğru büyüyen kalın veya ince katman oluşturmak anlamına gelmektedir. Kalın kaplama yöntemlerinden en önemlisi termal spreyleme kaplamadır. Termal spreyleme kaplamalar otomotiv, enerji, biyomalzemeler, sensör ve elektronik malzemelerde, korozyondan korunma gerektiren alanlarda kullanılmaktadır. Termal spreyleme kaplama eriyik, yarı eriyik veya katı partiküllerin bir akış mekanizması ile altlık üzerinde biriktirilmesi yöntemidir. Termal spreyleme teknikleri de akademik olarak bu akış mekanizmalarına göre sınıflandırılır.

Termal spreyleme prosesleri iki ana grup altında incelenmektedir. Birinci grup yanma işlemi olarak adlandırılır ve bir hidrokarbon yakıtın (asetilen, propan, hidrojen, vb.) oksijen ile (veya havanın) kaplama malzemesinin ısıtılması ile eritilip altlık malzeme üzerine spreylemesi için gerekli entalpi ve kinetik enerji sağlaması için yanması esasına dayanmaktadır. İkinci grupta ise elektrik gücü toz partiküllerini spreylemek için kullanılan enerjinin kaynağı olmaktadır. Alev spreyleme, elektrik ark spreyleme, çeşitli yüksek hızlı oksidasyon teknikleri ve detonasyon tekniği gibi çeşitli yöntemler örnek olarak verilebilir [9].

Termal spreyleme prosesleri ile oluşturulan kaplamaların yoğunluğu prosesler tarafından oluşturulan partiküllerin sıcaklığına ve çarpan partiküllerin hızlarına bağlıdır. Termal spreyleme proseslerinde sıcaklıklar 2500-15000°C arasında, partikül hızları ise 30-40 m/sn'den 800 m/sn'ye kadar değişen aralıklarda olmaktadır. Partiküllerin sahip olduğu sıcaklık ve hızlar ne kadar yüksek olursa oluşturulan kaplamaların yoğunluğu da o kadar yüksek olmaktadır. Bir çelik üzerine plazma spreylemiş nikel-aluminyum bağ tabakası, alev spreylemiş nikel-aluminyum bağ tabakasından yaklaşık olarak üç kat fazla bağ mukavemeti verebilmektedir. Çünkü

plazma tabancasının ürettiği partikül hız ve sıcaklık değerleri alev spreylemede oluşturulan hız ve sıcaklık değerlerinden çok daha yüksektir [10].

Termal sprej prosesi ile düşük ergime noktalı metaller, seramikler, refrakter karakterli metaller, camlı metaller, polimerler ve bu malzemelerin kombinasyonları gibi geniş bir aralıktaki sıvı hallerinde kararlı olan tüm malzemeler termal sprej proseslerinden en az birini kullanarak altlık malzemeleri kaplamada kullanılabilir. Termal sprej kaplama çeşitlerinin alev ve jet elde etme yolları Çizelge 3.1’de gösterilmiştir [10].

Çizelge 3.1 : Termal sprej kaplamada alev ve jet elde etme metodları.

Enerji girişi	Varyasyon	Sprej tekniği
Elektrik boşalımı	DC arkı	AS, APS, VPS
	Titreşim arkı	
	HF (RF) akkor boşalma	
Yanma	Sürekli Patlayıcı	HVOF, FS
		D-Tabanca

Bazı püskürtme tekniklerinde spreylene parçacıklar düşük sıcaklıklı olsa da yüksek hızlı alev veya jet ile temas halinde olmalarından ötürü yüksek kinetik enerjiye sahiplerdir. Bu yüzden uçuş süreleri kısadır ve ergimeden altlık yüzeyine çarparlar. Yüksek hızlı oksijen-yakıt spreyleme (HVOF) ve D-tabanca™ (D-Gun) bu yöntemlere örnek olarak gösterilebilir. Bu teknikler düşük ergime sıcaklığına sahip malzemelerde etkin olup malzemenin kimyasal kompozisyonunu değiştirir [11]. Uygunsuz ergiyerek ileriki uygulamalar için gerekli olmayan çoklu oksitler gibi faz formlarının oluşturur.

Bazı tekniklerde de alev veya jet, kontrollü bir atmosfer tarafından sarılır. Bu atmosfer jetin kimyasal kompozisyonu, turbulans seviyesi gibi fiziksel özelliklerini değiştirir. Bu duruma örnek olarak VPS ve IPS gösterilebilir. Bu tekniklerde kullanılacak tozlar Ti, Ta gibi oksijene afinitesi yüksek olan elementler ile NiAl veya NiCrAl gibi oksitsiz formları hava atmosferinde spreylendiklerinde oksitlenen alaşımlardır [12].

Bazı tekniklerde ise yüksek miktarda toz sarfıyatı vardır. Bu yüzden oluşan jet veya alev çok daha büyük hacimlere sahiptir. Bu şekilde, genellikle geniş yüzeylere kullanılan mekanizmaya göre düşük veya yüksek kaliteli kaplama gerçekleştirilebilir.

Bazı püskürtme tekniklerinde spreylenen parçacıklar düşük sıcaklıklı olsa da yüksek hızlı alev veya jet ile temas halinde olmalarından ötürü yüksek kinetik enerjiye sahiplerdir. Bu yüzden uçuş süreleri kısadır ve ergimeden altlık yüzeyine çarparlar. HVOF ve D-Gun bu yöntemlere örnek olarak gösterilebilir. Bu teknikler düşük ergime sıcaklığına sahip malzemelerde etkin olup malzemenin kimyasal kompozisyonunu değiştirir. Uygunsuz ergiyerek ileriki uygulamalar için gerekli olmayan çoklu oksitler gibi faz formlarının oluşturur [12].

Bazı tekniklerde de alev veya jet, kontrollü bir atmosfer tarafından sarılır. Bu atmosfer jetin kimyasal kompozisyonu, turbulans seviyesi gibi fiziksel özelliklerini değiştirir. Bu duruma örnek olarak VPS ve IPS. Bu tekniklerde kullanılacak tozlar Ti, Ta gibi oksijene afinitesi yüksek olan elementler ile NiAl veya NiCrAl gibi oksitsiz formları hava atmosferinde spreylendiklerinde oksitlenen alaşımlardır [11].

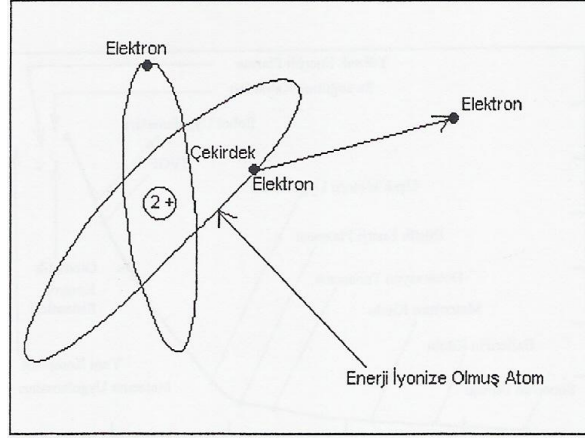
Termal sprej kaplama yöntemlerinden bu çalışmada uygulanan plazma sprej yöntemine 3.1’de değinilmiştir.

3.1. Plazma Sprej

Plazma eş sayıda pozitif ve negatif yüklü iyonların oluşturduğu bir parçacık yığını olup genellikle maddenin 4. Hali olarak nitelenen yoğunlaştırılmış bir gazdır [11]. Normal gazlar (CO , CO_2 , SO_2) ısıtıldıklarında klasik fizik ve termodinamik kanunlara uygun davranış gösterirler. Plazma ise bu kanunların dışında bir davranış göstermektedir. Bu nedenle, bilinen gaz halinden daha yüksek enerji seviyesine ulaşmış gaz halini tanımlamak için plazma terimi kullanılmaktadır [12].

Plazma durumunu incelemek için gazları oluşturan atom ve moleküllerin durumu değerlendirilmelidir. Şekil 3.1’de nötr bir atom şematik olarak görülmektedir. İki veya daha fazla nötr atomun birleşmesi molekül olarak adlandırılır ve tek bir parça olarak kabul edilir. Bu durum diatomik gazlar dediğimiz azot veya hidrojen gibi gazlardaki durumu da ifade etmektedir. Azot gibi diatomik gazlarda moleküllerin ayrıştığı 4 molekül gözlemlenir [9]. Gaz molekülleri birbirinden bağımsız sürekli hareket halindedir. Bu hareket esnasında birbirlerine çarparak yük ve enerji değişiminde bulunurlar. Sıcaklık artışı durumunda gaz moleküllerinin hızları ve buna bağlı olarak çarpışma sıklığı da artar. Yeterli enerji uygulandığında moleküldeki bağ parçalanır ve ayrılan atomlar birbirinden uzaklaşır. Bu duruma disosiyasyon adı

verilir. Örneğin hidrojen moleküllerinin disosiyasyon olması için partikül sıcaklığının 2500-6000°K aralığında olması gerekmektedir [11].



Şekil 3.1 : Nötr bir atomun şematik gösterimi.

Atomun Şekil 3.1'deki şematik gösteriminde iki pozitif elektrik yükü vardır ve çekirdek etrafında dönen iki elektronla nötr haldedir. Yük taşıyıcıları olarak bu serbest elektronlar ve pozitif iyonlar görev alır. Bu durumdaki atoma eğer yeterince enerji uygulanırsa en azından bir elektron yörüngesinin dışına atılır. Bu işlem için gerekli enerji ise, o atom için “iyonizasyon enerjisi” olarak nitelendirilir [12].

Bazen negatif iyonlar tek cins pozitif iyonlardan fazla olabilir. İyonlar tek başına veya çoklu olarak yüklenmiş, atomik veya moleküler yapıda olabilir. Plazma içerisinde nötral parçacıklar varsa iyonizasyon derecesi 1'den küçük olur. Plazma tamamen iyonize olduğu zaman bu değer sonsuza, zayıf iyonizasyon durumunda da 0'a yakınsar. Plazma sözcüğü ilk kez Langmuir tarafından tamamen iyonize olmuş gazlara adanmadan önce telaffuz edilmiş olup tamamen iyonize olan gazlarla sınırlandırılmaz [11].

Sonuç olarak disosiyasyon ve iyonizasyon prosesleri sırasında ortaya çıkan plazma, elektrik yüklü parçacıklar içerir. Ancak barındırdığı eşit sayıda elektron ve proton nedeniyle plazmanın doğal bir hal olduğu unutulmamalıdır. Tamamen iyonize olan plazma bazen maddenin özel bir hali olarak tanımlanır. Bununla birlikte madde 4 farklı halde bulunur: katı, sıvı, gaz, plazma [11]. Katı haldeki bir maddeye yeteri kadar enerji verildiğinde madde hal değişimine uğrayarak sıvı duruma geçer. Yine yeterli enerji ilavesiyle sıvı durumdaki madde gaz haline geçirilebilir. Bu durumdaki moleküllerin farklı derecelerde serbestliğe sahip olduğu varsayılır. Enerji ilavesine

devam edilirse parçacıkların kinetik enerjisi artacak ve moleküler çarpışmalar yoğunlaşacaktır. Bu durumda bazı elektronlar ile diğer moleküller arasında disosiyasyon meydana gelecek ve böylece gaz plazma haline geçecektir. İlave edilen enerjinin bir kısmı kinetik enerjiye, bir kısmı da disosiyasyon enerjisine dönüşür [9].

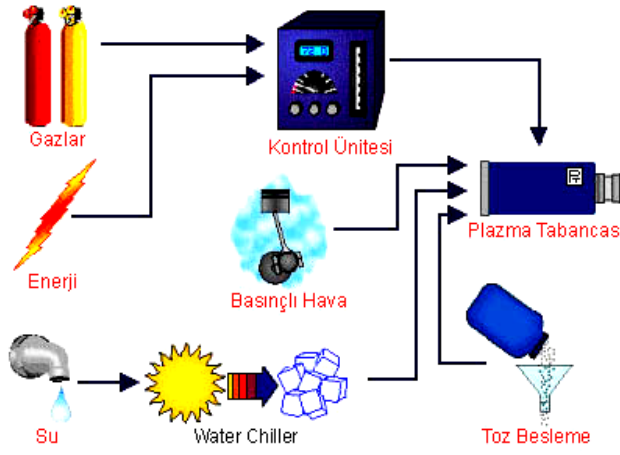
Disosiyasyon ve iyonizasyon mekanizmaları arasında sıcaklığa bağlı bir denge durumu vardır [12].

İyonizasyonun başlayarak plazmanın oluşturulması için dışarıdan uygulanan bir kuvvetle partiküller arasında yoğun çarpışmaların başlatılması gerekmektedir ve bunun için genellikle elektrik boşalması kullanılır. Bu durum kararlı gaz yapıların bozularak denge dışı yoğun enerji bulutunun ortaya çıkmasına neden olur. Ergime noktasının çok çok üzerinde sıcaklıklarda bulunan malzemenin plazma halinde ısı transferi çok iyi gerçekleşir. Uzayda nötron yıldızları haricindeki yıldızların oluşumunda yoğun olarak rol oynayan plazma hali atmosfer içerisinde de yıldırım şeklinde kendini göstermektedir [9,11].

Plazma sprej yöntemi ile kaplama işlemini gerçekleştiren plazma sprej sistemi Şekil 3.2’de görüldüğü gibi başlıca; güç ünitesi, gaz besleme ünitesi, toz besleme ünitesi, soğutma sistemi, sprej tabancası ve kontrol ünitesinden meydana gelmektedir. Bu sistemlerin fonksiyonu aşağıda kısaca verilmiştir [13].

Gerçekleştirilen kaplamaların kalitesi sistemde kullanılan güç ile doğrudan ilişkilidir. Katottan yayılan serbest elektronların hızı anot ile katot arasındaki potansiyel farka bağlıdır. Bu durumda plazma gazı, elektronların hızlı çarpma etkisi ile daha fazla iyonize olur. Bu şekilde kaplama tozları daha hızlı altlığa çarpar ve daha yoğun kaplamalar elde edilebilir. Sistemin gücü önceleri 40 kW’larda tutulurken teknolojinin gelişimi ile 80, 120 ve 220 kW’lık ünitelerle çalışılmaya başlanmıştır [13].

Bu tip kaplamalarda plazma gazının görevi püskürtülen parçacıkları hızlandırmak ve kaplama yüzeyine taşımak, parçacıkların etrafını sararak sıcak yüzeyi atmosfer koşullarından korumaktır. Bu amaçlar doğrultusunda, ısı kapasiteleri, iyonlaşma ve disosiyasyon özellikleri farklı olan Ar, N₂, H₂ ve He gazları kullanılmaktadır. Plazma oluşturan gazlar tek atomlu ve iki atomlu olarak iki temel gruba ayrılır. Argon ve helyum ilk gruba, azot ve hidrojen ise ikinci gruba dahildir.



Şekil 3.2 : Plazma sprej sistemi [15].

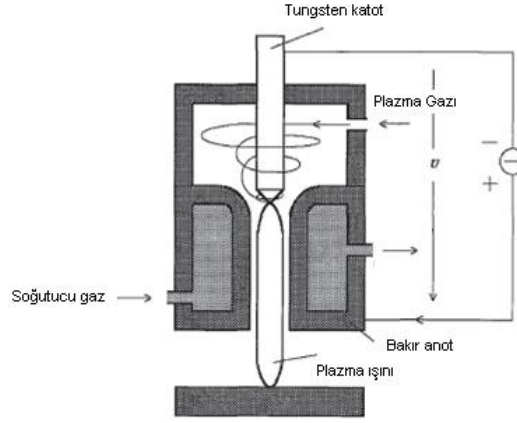
Plazmayı oluşturacak gaz, plazma ışınının sahip olması arzu edilen sıcaklık, hız ve spreylene malzeme ile altlık malzemenin inertlik derecesi göz önünde bulundurularak seçilir [12].

Bu tip kaplamalarda toz besleme ünitesinin görevi çeşitli şekillerde, boyutlarda ve özelliklerdeki tozları plazma bulutu içerisine taşımaktır. Kaplamanın kalitesinin istenen düzeyde olması adına, tozların düzenli ve belirli miktarlar çerçevesinde ergitme ortamına taşınması önemlidir. Bunun için genellikle azot (N_2) veya argon (Ar) gazları kullanılır. Proseste kullanılan tozların çalışma parametreleri, toz üreticisi firmaların tavsiyelerine göre belirlenmektedir.

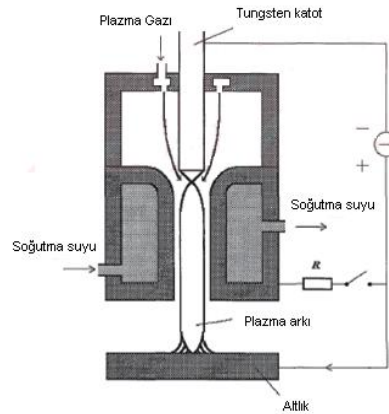
Plazma sprej tabancası, prosesteki en önemli öğedir. Plazma enerjisinin üretilmesindeki tüm süreçler (disosiyasyon, iyonizasyon ve plazma hali) püskürtme tabancası içerisinde meydana gelir. Tabancanın tip, dizayn ve güç özelliklerinin kaplama kalitesi üzerine doğrudan etkisi söz konusudur. Toz beslemenin ve ergitme sürecinin kontrolü ve kaplamanın depozisyon verimliliği kaplama tabancasının gücüne ve dizaynına bağlıdır [12].

Elektrik plazma arkının oluşturulduğu elektrotların düzenlenmesine bağlı olarak iki tip plazma torçundan söz edilebilir. Ark, pozitif anot ve negatif katot arasında oluştuğunda torçun içinde bir nozül olarak görünürse Şekil 3.3'te resmedildiği gibi ark aktarımı olmayan torç olarak sınıflandırılır [9]. Nozülün pozitif kutbu, nozül önündeki harici bir iletken transfer olursa ark, içerideki katot ve dışarıdaki iletken arasında oluşur. Şekil 3.4'te resmedilen bu torç tipi ark aktarımı olan torç olarak isimlendirilir.

Ark aktarımı olmayan torçta elektrik ark, tungsten katot ve bakır anot arasında oluşur. Plazma gazı nozülü girişi elektrik ark enerjisi ile iki atomlu gazların disosiyasyonunu, tek atomlu gazların disosiyasyon ve kısmi iyonizasyonunu sağlayan yüksek sıcaklıklara ısıtılır.



Şekil 3.3 : Ark aktarımı olmayan torç [11].

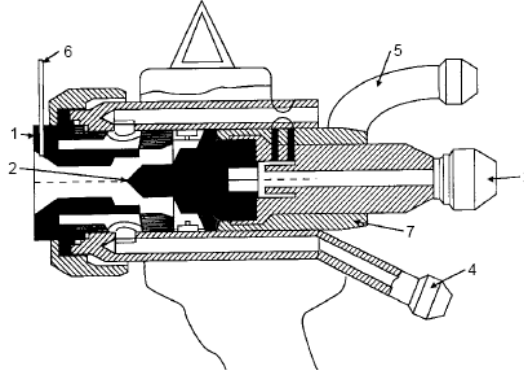


Şekil 3.4 : Ark aktarımı olan torç [11].

Disosiyasyon ve iyonizasyon sırasında plazma gazı plazma durumuna geçer, yüksek hacimlerde termal ve kinetik enerji açığa çıkarak plazma ışını formunda nozülü terk eder. Plazma arkının merkezinde sıcaklık 30,000K'e ulaşmakta olup plazma ışınının nozülden çıkış hızı süpersoniktir [11].

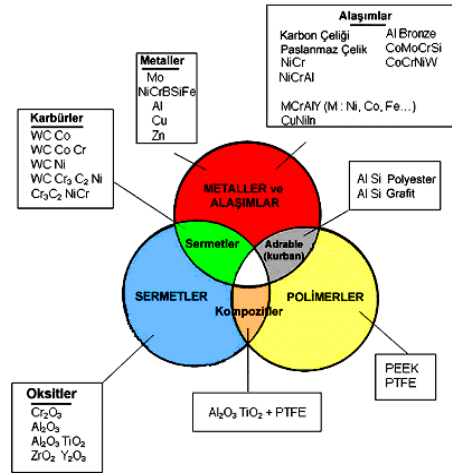
Şekil 3.5'te gösterilen plazma jeneratöründe genellikle bakır olan dairesel anot (1), toryumlanmış tungsten katod (2) bulunur. Su ile dengelenmiş torçta bulunan katod grafitten yapılmıştır. Jeneratör tarafından desteklenen elektrik ark boşalımı konektörlerden yapılır (3,4) ve bu, atmosferde genişerek jet oluşturan çalışma gazlarını (5) ısıtır. Taşıyıcı gazda asılı kalan toz (6) jet içine enjekte edilir. Toz

parçacıkları ergidikten ve jet içine aktarıldıktan sonra kaplamayı oluşturmak üzere jet içerisinde altlık malzemesine çarparlar.



Şekil 3.5 : Plazma torçu şeması [11].

Plazma sprej teknolojisi yardımıyla çok sayıda malzeme grubuyla çalışmak mümkündür. Şekil 3.6'da da gösterildiği gibi toz formunda üretilebilen ve süblime olmayan tüm malzemeler plastikler, karbürler ve metaller kaplama malzemesi olarak kullanılabilir.



Şekil 3.6 : Plazma sprej kaplamada kullanılan tozlar [13].

Kaplama prosesinde kullanılan tozlar farklı morfoloji, tane boyut ve dağılım aralığında olabilir. Tozlardan beklenen en önemli özellik ergitme ortamınıaiyi beslenebilme (akışkanlık) özelliği ve homojen ergime davranışdır. Uygulamalarda tozun tane boyutu ve boyut dağılım aralığı en önemli parametredir. Kaplama yöntemine bağlı olarak toz boyutu +5-120 μ m arasında değişmektedir [13].

Seramikler, yüksek mekanik özellikleri, oksidasyon direnci, refraktif etkileri, geniş hammadde ağı ve ucuz tedarik imkanı ile önemli bir kaplama malzemesidir. Ancak seramikleri kaplama dünyasına kazandırabilmek için çok yüksek sıcaklıklara çıkmak

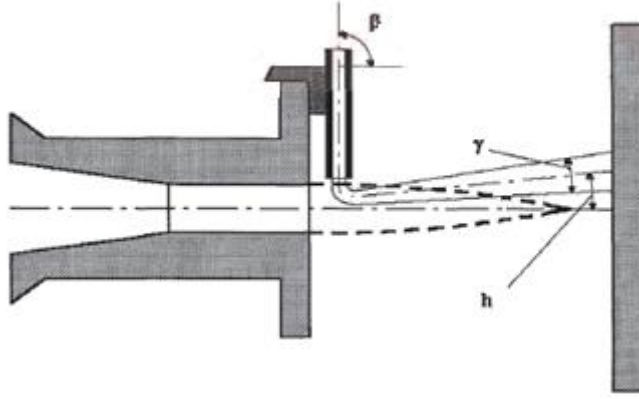
gerekmektedir. Plazma hali ile malzemenin buharlaşma sıcaklığının çok daha üzerinde sıcaklıklara çıkabilmesinin sözkonusu olmasıyla kaplama uygulamalarında seramikler daha çok kullanılmaya başlanmıştır.

Plazma sprey kaplama uygulamalarında kullanılan tozların morfolojisi, yoğunluğu ve akış özellikleri, tozun ergime zonuna beslenmesinde önemlidir. Kaplama prosesinde tozun enerji kaynağına beslenmesinde ve sprey hüzmesi içinde ergime davranışına tozun dış şekli etki eder. Küresel toz şekli bir taraftan tozun minimum yüzey/hacim oranı nedeniyle ısı transferini ve buna bağlı olarak tozların ergime davranışını olumsuz yönde etkiler. Buna karşılık tozun düzensiz şekilli olması tozun çok hızlı ergimesini sağlar. Genellikle metal karakterli tozlar, küresel, yuvarlatılmış ve aglomere edilmiş şekilde kullanılmaktadır. Seramik karakterli tozlar ise genellikle köşeli formda üretilmektedir. Toz üretim yöntemleri; sinterleme, aglomerasyon, kırma-öğütme, atomizasyon (su veya gaz), sol-jel olarak sıralanabilir.

Plazma kaplamalarının oluşum prosesi spreylene tabakaların özelliklerini etkileyen birçok aşamadan oluşur. Temel olarak plazmanın yüksek termal ve kinetik enerjisi, beslenen toz partiküllerinin ergimesini ve yükseltgenmesini sağlar. Plazma torçuna toz taşınımında, belirli bir hızda partikül yollarının oluşmasında tozun şekli ve tanecikliği önemlidir. Ergimiş malzeme ile plazma ışınının etkileşimi ve taşınımı fiziksel ve kimyasal bir olaydır. Ergimiş partiküllerin altlık üzerine çarptığı andaki mekanik, kimyasal ve termal şartlar spreyle oluşturulmuş tabakanın karakteri ve özelliklerini tamamlar [14].

Taşınım özellikleri spreylene toz parçacıklarının şekil ve boyutu ile tanımlanır. Plazma sprey için uygun olan bir toz makul döküm özelliklerine sahip olmalı, tozların tane boyutları ve şekilleri birbirine yakın olmalıdır. Farklı partikül boyutlarına sahip tozlar kullanıldığında daha ince partiküller çok yüksek sıcaklıklarda kontrolsüz buharlaşarak aşırı ısınmaya neden olabildiği gibi kaba parçacıklar yüzünden de yetersiz ısınma sözkonusu olabilir. Plazma oluşturma gazları ısınan tozlara termal bir etki sağlamadığı ve toz plazma içerisinde çok kısa bir süre (10^{-4} - 10^{-2}) kalabildiği için tozun plazma ışınına giriş noktası kritiktir [15]. En etkin ısıtma tozun torçun içindeki anotla katotun arasında meydana gelen arkın ortasına beslenmesi ile gerçekleşir. Ancak günümüzde kullanılan ekipmanlarda dizayn uygunluğu da gözönünde bulundurulduğunda taşıyıcı gaz ile taşınan toz, Şekil 3.7'de görüldüğü gibi anot nozulünün dışında plazma ışınına radyal olarak taşınır.

Plazma jet eksenine dik olarak fırlatılan toz parçacıkları birçok faktörden etkilenen bir yol izler. Altılığa doğru hareket eden parçacık ışını γ açılı konik bir şekle sahip olup plazma eksenini ile arasında 'h' değerinde bir eğim bulunur. Bu açı, parçacıkların plazma ışınına giriş hızına, partiküllerin hızını direkt olarak etkileyen plazma ışını hızına ve parçacık boyutuna bağlıdır. 'h' açısının düşük olması makul sprej koşulları ile plazma ışınının soğuk kısmını azaltır.



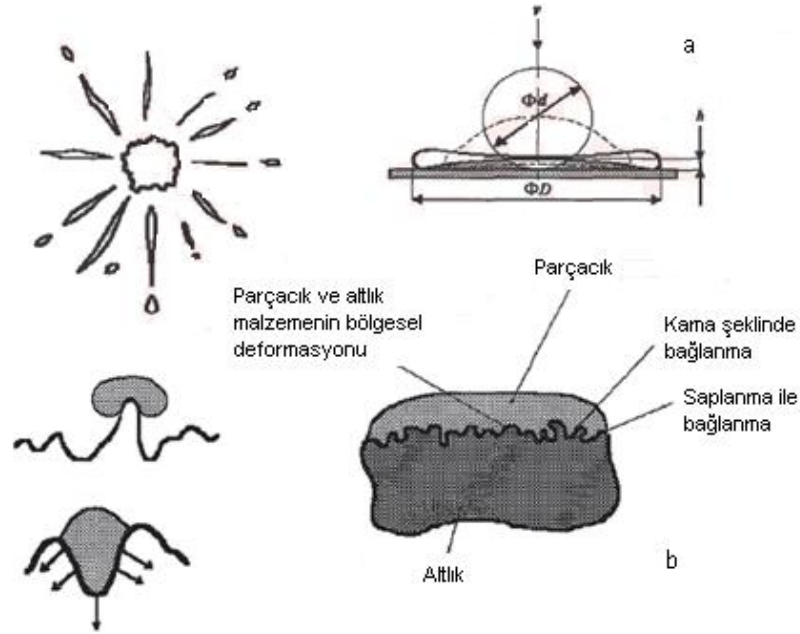
Şekil 3.7 : Ergimiş parçacık ışınının açılanması [15].

Parçacık yolunun şekli sprejin etkinliği adına belirleyici rol oynar. Parçacık uçuş yolu birçok faktöre bağlıdır: plazma torçunun geometrisi ve toz enjeksiyonu, plazma taşıyıcı gazlarının tipi ve uçuş oranları, ark ürünü, plazma ışını stabilitesi bu etkenlerin en önemlileridir [16].

Plazma içerisinde parçacık uçuşu sırasında ergimeye yakın ve ergiyen parçacıklar atmosfer gazları ve plazma ile etkileşerek yüksek bir kimyasal aktivite sergilerler. Spreylenen parçacıkların gazlarla olan etkileşimin mekanizmaları gaz adsorbsiyonu, oksit katmanlarının ve parçacık yüzeyindeki diğer bağların yapısı ve kimyasal etkileşimleri, parçacıkların ergimiş metal kısmında meydana gelen gaz çözünmeleri, difüzyon prosesi ve partikül hacmi içerisinde mekanik karışım ile meydana gelen etkileşim ürünleri ile tanımlanabilir [17].

Uçan ergimiş parçacıkların altık üzerine çarptığı noktada parçacıkların kinetik enerjisi ısı ve deformasyon enerjisine dönüşür. Altık ile temas eden parçacıklar ısılarını çarptıkları yüzeye aktararak hızlıca soğur ve katılaşır. Bu andaki davranışları sıcaklıklarına, hızlarına ve soğuma özelliklerine bağlıdır. Şekil 3.8'de de görüldüğü gibi parçacığın yüksek kinetik enerjisi çarpma sonrasında parçacığın deformasyonuna neden olur. İlk şekli ne olursa olsun, uçuş esnasında yüzey

geriliminden ötürü küresel formda olan parçacıklar çarpma esnasında kinetik ve ısı enerjilerini kaybederek lameller veya topaklar halinde soğurlar [17].



Şekil 3.8 : Altlık üzerinde parçacık deformasyonu a) pürüzsüz, b) kaba yüzey [9].

Lameller birer birer altlık üzerine birikirken karakteristik lamel yapısı oluşturulur. Deformasyon derecesi ve lamellerin şekilleri eriyik parçacığın vizkozitesi ve ıslatabilirliği, soğuma koşulları, toz granüleritesi ve altlık yüzeyinin karakteri gibi birçok faktöre bağlıdır. Eriyik dropletler pürüzsüz yüzeye çarptıklarında Şekil 3.8 a'daki gibi aniden patlayıp bütün altlık yüzeyine damlacıklar şeklinde yayılabilirler. Diğer yandan pürüzlendirmiş yüzey üzerinde katılaştıran damlacıklar Şekil 3.8 b'de görüldüğü gibi engebeli yüzeyler arasında tutularak fazla saçılmaksızın düz yüzeylerin oluşmasını sağlar. Soğuyan ve katılaştıran bu parçacıklar heterojen bir yapı oluşturur. Deforme olan parçacıklar ve katmanlar arasındaki diğer sınırlar birlikte kompakt malzemeyi oluştururlar [9]. Tane sınırları yapısı, tanenin atmosferde kalış süresine göre farklılık gösterir. Katmanlar birer birer bir önceki tabakanın üzerine depozite olurken, tozların ince olanları yüksek sıcaklık etkisiyle buharlaşır ve açığa çıkan gaz, üzerine başka bir tabaka bindirilmek suretiyle katmanlar arasında kalır. Altlığa çarpan her damlacık altlık veya kendisinden önce çarpan damlacığın oluşturduğu katman üzerine yapışmaz, bazıları ergimeden yapışma yüzeyden sekebilir. Bu durumda kaplamada hatalar, boşluklar, malzeme kayıpları görülür. Bu yüzden kaplama malzemesinin mekanik özellikleri, malzemenin orjinal halinden daha düşük olur.

Spreyleme sırasında altlığa transfer olan ısı, ısısını plazma ışınından (Q_p) alan parçacıklar (Q_m) tarafından taşınır. Toplam taşınan ısı birim zamanda torça beslenen malzeme ile lineer olarak artış gösterirken torç-çalışma mesafesi artışı ile azalış gösterir.

Plazma spreylemede spreylene parçacıklar ortam gazı ile reaksiyona girer. Bu, spreylene malzemede bir miktar fiziksel ve kimyasal dönüşüme neden olabilir. Çözünen gazların giderimi ancak kaplamanın inert bir atmosferde gerçekleşmesi ve kaplama sonrası ısıtıl işlem uygulanması ile gerçekleştirilmektedir.

Plazma gazı ile partiküller arasında plazma spreylemede kullanılan gazların inert yapısı nedeni ile kimyasal reaksiyonun meydana gelmediği düşünülmektedir. Bununla birlikte yüksek hızdaki sıcak metalik partiküller hava içerisinde bir altlık malzeme üzerine gönderilir ise ortamdaki hava plazma gazı içerisine çekilmekte, havadaki $2 O$ ve N_2 plazma jeti ile reaksiyona girebilmektedir ve oluşan oksit veya nitrürler daha sonra kaplamaya dahil olmaktadır. Metalik kaplamaların spreylene esnasında toz partiküllerinin korunması ve kaplamaların kalitelerinin geliştirilmesi amacı ile spreyleme işleminin inert gaz veya vakum ortamı içerisinde gerçekleştirilmesi ile yüksek kalitede kaplamalar elde edilmektedir [16].

Şekil 3.9'da görüldüğü gibi toz partikülleri altlık malzemeye çarpma anında tamamen ergimiş, kısmen ergimiş veya hiç ergimemiş halde olabilmektedir. Kısmen ergimiş veya hiç ergimemiş partiküller düşük çökelti yoğunlukları ve çökeltme verimlilikleri meydana getirmektedir. Yoğun ve yüksek mukavemetli çökeltilerin elde edilmesi için ise;

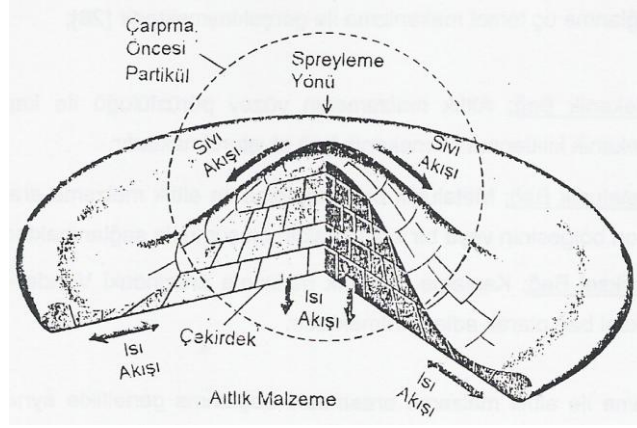
a-) Altlık malzeme üzerine gönderilen partiküllerin büyük bir kısmının altlık malzeme veya önceden çökelmiş partiküller üzerine çarpmadan önce ergimiş oldukları hale ısıtılmaları gerekir.

b-) Partiküllerin, önceden çökelmiş partiküllerin düzensizlikleri içerisine akabilmesi için yeterli hıza sahip olması gerekir.

c-) Partiküller arasında veya partikül altlık malzeme arasında kuvvetli bağlanmanın oluşturulması gereklidir [17].

Spreylene partikül tam olarak ergimiş olmadığı zaman ince kısmi ergimiş dış tabaka üzerine yayılır. Oysa ki ergimemiş partikül ergimemiş çekirdeği yarı küresel şekle deforme olmakta ve kaplama tabakasında bir boşluk oluşturarak sekmektedir.

Tamamı ile ergimiş partikül altlık malzemeye çarptığında ise diske radyal olarak yayılır. Örneğin 37 μm 'lik bir toz partikülü tamamı ile ergimiş halde çarpma sonrası yaklaşık olarak 150 μm çapında bir disk meydana getirmektedir [18].



Şekil 3.9 : Tamamı ile ergimiş partikülün altlık malzeme ile etkileşimi [18].

Altlık malzemeye çarpan damlacığın geçirdiği soğuma hızı oldukça yüksektir. 105-106 Ks civarında gerçekleştiği tahmin edilmektedir. Bu yüksek soğuma hızla mikron altı tane boyutlu (0.25-0.50 μm) kaplama mikroyapısı meydana getirmektedir [18].

3.1.1. Plazma Sprey Kaplamaların Temel Özellikleri ve Bu Özellikleri Etkileyen Parametreler

Yüzeylerin kusursuz ve olarak hazırlanması ve nihayetinde hemen kaplamanın uygulanması, kaplamanın yapışma mukavemetini artırır. Kaplama yüzeyi yağ, pas, kav ve kirlere çok iyi bir şekilde temizlenmiş olmalıdır. Yüzey temizlendikten sonra kaplamanın daha fazla yüzeye nüfuz edebilmesi için altlık yüzey alanı aşındırma yardımıyla artırılır. Aşındırma için kumlama işlemi yoğun olarak kullanılır. Kaplama yüzeyine püskürtülen SiC ve Al₂O₃ taneleriyle bu işlem gerçekleştirilir. Yüzey hazırlamanın tipi ve yüzeyin pürüzlülük derecesi kaplamanın cinsine ve kalınlığına bağlıdır [19,20].

Plazma bulutu içerisinde plazma fazında bulunan partiküller, altlığa ulaşmaya kadar yüzey gerilimlerinin sonucu olarak yağmur damlası veya küresele yakın formda bulunur. Ergiyen partiküller çok yüksek kinetik enerjiyle, tam sıvı veya yarı ergimiş hamurumsu şekilde ana malzeme yüzeyine çarptığında ince taneli tabaka halinde katılaşır. Bu şekilde milyonlarca ergimiş tozların üst üste birikmesiyle lamelli yapıda bir kaplama tabakası meydana gelir. Yüzeye çarparak deforme olan her yapıya

“splat” denir. Tabaka özellikleri, partiküllerin sıcaklığı, hızı ve viskozitesine bağlı olarak elde edilen splatların şekli partikül soğuma hızı tarafından belirlenir. Splatların katılma hızı 10^{-6} °C/sn kadar olabilir. Splatların üst üste birikmesiyle elde edilen kaplama yapısı, yarı kararlı veya amorf faz halinde olabilir [20,21]. Küresel formdaki parçacıkların kinetik enerjisi splat olarak yüzeye çarptığı anda deformasyon ve ısı enerjisine dönüşür.

Plazma sprey tabakaları orjinal malzemeye göre fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri bakımından farklılıklar gösterir. Örneğin ısı sırasında farklı gazlar açığa çıkabilir, malzemelerde yüksek sıcaklıktan kaynaklanan faz dönüşümleri görülebilir. Kaplama tabakasının özellikleri kullanılan ekipmanlardan, ortam koşullarından ve kullanılan gazlardan da etkilenmektedir.

Kaplamanın iç yapısı homojen olmayıp farklı boyutlarda taneler içerir. Bu yüzden kaplama, kademeli bir yapı olarak karakterize edilir. Kaplama bu haliyle yarı kararlı bir yapıdadır. Uygun koşullarda uygulanan ısıl işlemle kaplama kararlı bir forma dönüştürülebilir [18].

Porozite, püskürtme yoluyla üretilen kaplamaların karakteristik özelliğidir ve tabaka içerisindeki boşlukları ifade etmektedir. Plazma sprey kaplamalarda, gözeneklerin geometrisi ve dağılımı üniform değildir. Porozite, kaplama malzemelerinin yüzeye düzensiz bir şekilde birikmesi sonucu oluşur. Kaplamalarda porozite artan tabanca (ergitme) gücü, azalan toz tane boyutu, sprey mesafesi, torç çapı ile düşer, söz konusu sıcaklıklarda çözünürlükleri azaldığı için oksijen, azot ve hidrojen varlığı ile artar. Çözünen gazlar serbest atmosfere kaçabildikleri gibi (açık por) mikroboşluklar şeklinde yapıda da kalabilirler (kapalı por). Bu mikroboşluklar tane sınırları arasında olabilir veya parçacığın kendisinde bulunabilirler. Porozitenin giderilmesi ancak kaplamaya ısıl işlem uygulanması ile gerçekleştirilir. Sadece açık porozite spreylemenin enerji koşullarının değişiminden etkilenir. Kapalı porlar gaz çözünmesi ile meydana gelir [21]. Porozite kaplamaların sertlik, aşınma direnci ve yapışma mukavemetini azaltır ve kullanım ortamına bağlı olarak iş parçasının servis ömrünü kısaltabilir.

Spreylenen tabaka altlık yüzeyine mekanik bağlanma, valens kuvvetleri ve Van der Waals kuvvetleri sayesinde tutunur. Metal altlığa püskürtülen metal kaplaması ve

seramik altlığa püskürtülen seramik kaplaması arasında difüzyon prosesi de söz konusudur [18].

Sprey kaplama oluşumunda basma ve çekme gerilmeleri ile karşılaşılır. Bu gerilmeler kaplamanın çatlamasına, altlık üzerinden kalkmasına veya bozulmasına neden olur [21]. Bu iç gerilmelerin nedeni kaplama malzemesinin homojen olmayan dağılımı ve plazma torçu içerisinde meydana gelen bölgesel değişikliklerden kaynaklanan homojen olmayan ısı dağılımıdır. Spreylenen kısmın şekil ve boyut karakteristikleri de bu gerilmelerin nedeni olabilir. Kaplamada iç gerilmeler, parça ortam sıcaklığına soğuduğunda ortaya çıkar. Sprey malzemesinin termal genleşme katsayısı altlık malzemesininkinden büyük ve ona eşitse kaplamada basma gerilmesi meydana gelir [20].

Spreyleme esnasında, altlık ön ısıtma işlemine tabi tutulabilir veya iç gerilmeleri düşürmek için soğutulabilir. İç gerilme oluşumu, metal altlığın üzerine NiCrAl gibi ara katmanlar uygulanarak giderilebilir [20]. Bu çalışmada kullanılan altlık malzemesinin seramik olmasından dolayı herhangi bir iç gerilme farklılığı olmayacağı için ara katman uygulaması yapılmamıştır.

Kaplamanın mukavemeti birçok faktöre bağlıdır. Bunlardan en önemlilerinden biri kaplama kalınlığıdır. Splatların birbiri üzerine binmesi çok kısa bir sürede gerçekleşir. Kaplama bağ mukavemetinin yüksek olması sağlayan unsur splatların birbirine kuvvetli yapışmasıdır. Plazma halinde substrat üzerine transfer olup üst üste binen splatların katılma esnasında birbirine boşluksuz yapışmaları gerekmektedir. Plazma spray kaplama, uygulama yöntemi gereği boşluklu bir yapıya sahiptir. Kaplama kalınlığı arttıkça söz konusu boşlukların miktarı artar, katılma düzensizleşir. Guo ve arkadaşları [19] kalın plazma spray kaplama ile yaptıkları karakterizasyon testleri gösteriyor ki kaplama kalınlığı artışı ile kaplamada dökülmeler ve bunun sonucu olarak da mukavemette düşüş meydana gelmektedir.

Sertlik spray kaplamalar için önemli bir karakteristiktir ve kaplama kalınlığı artışı ile artar [19]. Kaplamaların sertliği; püskürtülen malzemeye, spray ekipmanına ve proses parametrelerine bağlıdır. Artan püskürtme hızı ile sertlik ve yoğunluk artar. Kaplama malzemesinin karbür, metal veya oksit karakterli seramik olması durumuna göre tabakanın sertliği değişir. Örnek olarak kalite bir çeliğin ısıtma işlem sonrası sertlik değeri yaklaşık 700 Vickers (55 HRC), bir elektrolitik sert krom kaplamanın 800-900

Vickers iken oksit esaslı seramiklerin sertlik değeri 1200 HV'den (Al_2O_3) başlayıp 1600 HV'e (Cr_2O_3) kadar çıkabilmektedir [22].

Plazma sprej kaplamalar yaygın olarak metallerin aşınma (abrazif, adhezif, erozif vb.) davranışlarını iyileştirmek amacıyla uygulanır. Özellikle uçak motorlarında erozif aşınma yaygın iken genel makine endüstrisinde abrasif ve adhezif aşınma görülmektedir. Kaplamaların aşınma performansı, kaplanan malzeme ve çalışma ortamına bağlı olarak değişmektedir. Plazma spreyle kaplanan en başarılı kaplamalar; seramikler olarak Cr_2O_3 , Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{YSZ}$, NiCrAlY , Ni-Co , Ni-Cr gibi metaller ve karbür (WC-Co , $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-NiCr}$) malzemelerdir [22].

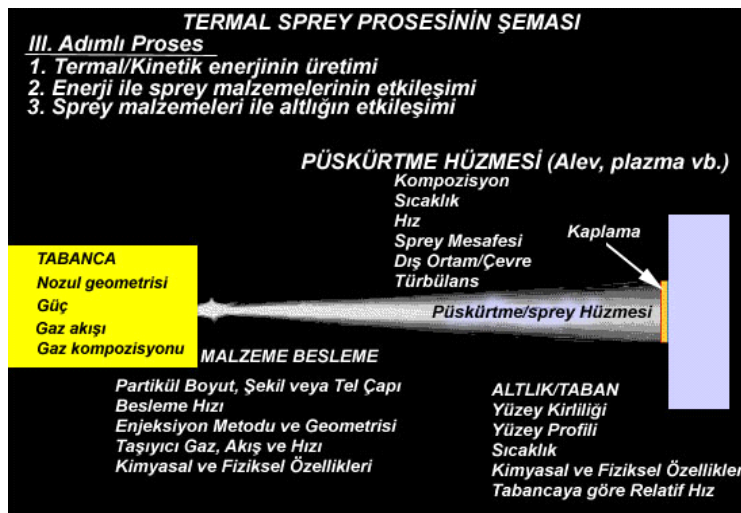
3.1.2. Proses Parametreleri

Plazma sprej kaplamaların özellikleri birçok parametre tarafından kontrol edilir. Bu parametreler Şekil 3.10'da özetlenmiştir [13].

Kaplama prosesini kontrol eden parametreleri üç temel gruba ayırmak mümkündür. Bunlar, kaplama tabancasına, kaplama malzemesine, püskürtme süreci ve altlık malzemesine bağlı kompleks bir süreçtir.

Genel olarak yüzden fazla parametrenin kaplama sürecinde etkin olduğu literatürde belirtilmektedir. Başarılı bir kaplama üretmek için tüm parametrelerin optimize ve birbiriyle senkronize edilmesi önemlidir.

Ayrıca kaplama kalitesi, kaplanacak yüzeye çarpan partiküllerin hızına, sıcaklığına ve sprej parametrelerine de bağlılık gösterir. Genel olarak taban malzemeleri ve sprej parametreleri kullanım amacına göre seçilmektedir.



Şekil 3.10 : Plazma sprej kaplamada proses parametreleri [13].

Plazma sprej parametreleri; tabanca ile yüzey arasındaki mesafe, kaplama tozunun tane boyutu ve boyut dağılımı, tabancanın gücü, plazma gazları ve karışım oranları, toz besleme hızı ve kaplanacak yüzeyin sıcaklığı olarak sayılabilir. Kaplama parametreleri; kaplamadaki kalıntı gerilmelere, porozite miktarına ve dağılımına, kaplamanın kalınlığına, sertliğine, oksit içeriğine ve kaplamanın yapışma mukavemetine etki eder. Ayrıca sprej partiküllerinin kaplanacak malzemeye yüksek hızla ve aynı zamanda soğumadan yüksek sıcaklıkla ulaşması, kaplama özelliklerini, kaplama yoğunluğunu ve yapışma mukavemetini artırır. Seramik kaplamalarda sprej malzemesi olarak toz formunda malzeme kullanılması ve sprej tekniği ile yüzeye yapışmaları sebebiyle yüksek porozite mevcuttur. Isı izolasyonu amacıyla üretilen termal bariyer kaplamalarında porozite arzu edilen bir özelliktir. Ancak kaplamanın mukavemeti ve kaplamanın yapışma mukavemeti porozite nedeniyle azalmaktadır [19].

Tabanca ile kaplama yüzeyi arasındaki mesafenin fazla olması kaplama tabakası içerisindeki porozite miktarına etki eder. Yine bu mesafenin fazla olmasıyla, ergimiş tozlar kaplama yüzeyine ulaşmadan, soğuyup katılaşabilir. Bunun sonucu olarak, kaplamanın yapışma mukavemeti olumsuz yönde etkilenir. Kaplama esnasında alınan yolun fazla olması neticesinde yoğun kaplama eldesi zorlaşır. Kaplama tabancası ile yüzey arasındaki açı sprej hızına bağlı olarak değişir. En yoğun ve yapışma mukavemeti fazla olan kaplamalar 90°'lik açı altında yapılanlardır. Ayrıca kaplamaların manuel olarak yapılması homojen bir kaplama tabakası eldesini zorlaştırır ve sprej mesafesi arttıkça kaplamadaki porozite miktarı artar.

Kaplama özelliklerine etki eden diğer faktör, kaplama için kullanılan toz malzemelerin tane büyüklüğü ve boyut dağılımıdır. Kullanılan toz malzemelerin sprej parametrelerine uygun seçilmesi önemlidir. Toz malzemeler, sisteme düzenli bir şekilde ve sabit bir miktarda verilmelidir. Bu işlem genellikle pnömatik olarak sağlanır. Ancak belirli bir tane boyutu aralığında kullanılan toz malzemeler çok küçük boyutlarda olursa tozlar buharlaşabilir veya bunun tersi durumunda, fazla büyük olan tozlar yeterince ergimez ve kaplama tabakası içerisinde aynen kalabilir. [20].

Sprej prosesinde kullanılan tabancanın güçlü olması durumunda ergimiş kaplama malzemesi daha yüksek bir hızla ve daha yüksek bir sıcaklıkla kaplama yüzeyine ulaşarak oldukça yoğun ve porozitesi daha düşük kaplamalar elde edilmektedir.

Kaplama özellikleri, ön hazırlık olan kumlama, yağ giderme işlemlerine ve kaplamanın kalınlığına, sistemin gücüne, kullanılan gaz debisine de bağlıdır. Kaplama tabakalarında aranan en önemli özelliklerden biri de kaplamaların sertliğidir. Kaplamaların sertliği üzerinde etkili olan parametreler; porozite içeriği, kaplamadaki oksitler, toz özellikleri, prosesin türü ve sprey tabancasının gücüdür.

Kaplamalarda taban malzemesinin titreşiminin termal sprey tabakasına olan etkisi büyüktür. Makroskobik ve mikroskobik türü zorlanmalar altında, saf oksit esaslı tabakaların davranışı, metal oksit esaslı tabakalara nazaran daha iyidir. Bu davranış oksit tabakaları içerisindeki porların daha fazla olmasına bağlanmaktadır. Ayrıca tabakalarda oksit yüzdesinin artmasıyla yoğunluk azalmasına karşın sertlik artışı görülmektedir [19].

Kaplamaların bağ/yapışma mukavemeti, kaplama parametrelerine, kaplanması istenen malzeme özelliğine, altlığın cinsine (demir veya demir dışı) ve altlık yüzeyinin durumuna (temizliğine, pürüzlülük derecesine ve geometrisine) bağlı olarak değişir [12].

Termal sprey kaplamalarının ana malzeme üzerine yapışması, kumlanmış yüzeylerde mekanik (genellikle seramik esaslı kaplamalar), Van der-Waals kuvvetleri (metal esaslı kaplamalar) ve noktasal bölgelerde görülen sınırlı bir difüzyon ile gerçekleşir. Plazma spreyle üretilen seramik kaplamalar, gevrek ve kırılgan yapıları nedeniyle, metal esaslı kaplamalara nazaran daha düşük yapışma mukavemetine sahiptir. Kaplamaların yapışma mukavemeti artan tabaka kalınlığı nedeniyle azalır. Altlık ile seramik tabaka arasındaki termal genleşme uyumsuzluğunun giderilmesine yönelik uygulanan ara metalik kaplamalar (Ni-Al, Ni-Cr, NiAlCrY), yapışma mukavemetini olumlu yönde geliştirir [13].

“Yapışma” terimi farklı kütlelere sahip parçacıkların yüzey kuvvetlerinin toplamı anlamına gelmektedir. Plazma sprey teknolojisi açısından bakacak olursak bu terimi altlık üzerinden kaplamanın belirli bir kısmını çıkarmak için gerekli olan kuvvet olarak da açıklayabiliriz.

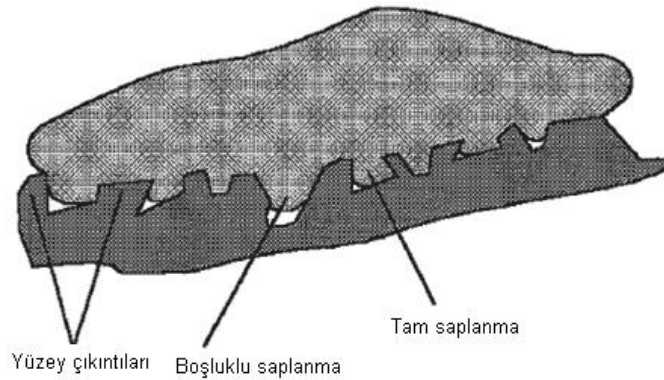
Kaplama ile altlık malzeme arasındaki bağlanma genellikle aynı anda işleyen birden fazla bağlanma mekanizmalarının bir sonucu olmaktadır. Altlık malzemenin yüzey topografyası, oluşan mekanik bağlanmanın derecesini etkileyen temel bir değişkendir. Abrasif partiküllerin püskürtülmesi gibi işlemler kaplamanın altlık

malzeme ile olan mekaniksel kilitlenmeyi kolaylaştırmaktadır. İnterdifüzyon bölgesi veya bir ara fazın oluşumu ile oluşan metalurjik bağ, ya altlık malzeme ile çarpan damlacıklar arasındaki lokal difüzyon ya da altlık malzemenin lokal füzyonu ve ergimiş malzeme ile ergimiş çökeltinin etkileşmesinin sonucu oluşmaktadır [15].

Kaplama ve altlık arasındaki bağlanma formu için aykırı fikirler de yok değildir. Bazı çalışmalarda biliminsanları yüksek sıcaklıklarda etkileşim zamanının çok kısa olduğunu, bu yüzden bağ oluşumu için temel rolün kaplama kütlelerinin altlık üzerindeki mikroçıkıntılara mekanik bağlanması tarafından oynandığını iddia etmektedir. Bu tip bağlanma için Şekil 3.11’de de gösterildiği gibi iki çeşit değişken öne çıkmıştır:

- Boşluklu saplanma, altlık üzerindeki mikroçıkıntılar yükselme pikinden küçükse bağ yalnızca sürtünme kuvveti ile gerçekleşmektedir;
- Tam saplanma, temelinde mikroçıkıntılarının farklılık göstermesi vardır. yakalamanın çapa tipi, kaplama ve altlık arasında en güçlü bağ varsa kaplama esnasında vizkozite ve spreylene parçacıkların hızı maksimumdur.

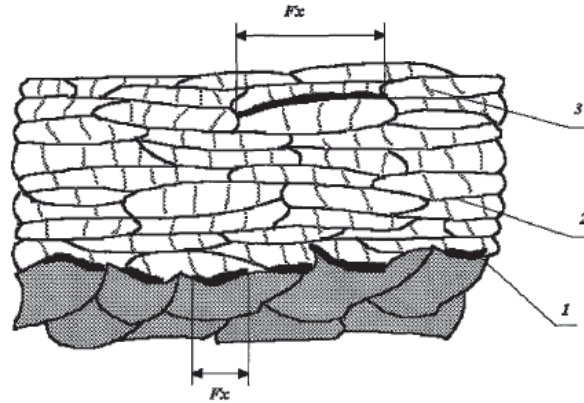
Birçok biliminsanı altlık ve kaplama arasındaki bağın mekanik yakalama, fiziksel ve kimyasal bağlarla oluştuğuna inanmaktadır. Bağlanma tipleri de kullanılan toz, altlık, teknoloji, parametreler gibi değişkenlere göre farklılık göstermektedir. Metal altlık üzerine seramik biriktirildiğinde mekanik bağlar oluşmaktadır ancak metalik bağların iki metal malzeme arasında daha baskın oluştuğu unutulmamalıdır [12].



Şekil 3.11 : Altlık üzerinde oluşan kaplama tipleri.

Altlık ve kaplama arasındaki yapışmanın kalitesi elektron mikroskopunda bir metalografik numune olarak incelenebilir. Plazma spreyl kaplamanın yapısında

Çarpma, deformasyon, soğuma ve katılaşma, plazma ışıını ile atmosferin fizikokimyasal etkileşimi kaplamanın karakteristiğini belli eden parametrelerdir. Şekil 3.12’de gösterilen yapısal bileşenlerden kaplama ve altlık arayüzü (1) yapışma mukavemetini belirler. Ayrık tabaka arayüzleri (2) spre y torçunun her bir geçişinde biriktirdiğı malzemelerle elde edilir. Burada F_x parçacıkları kaynaklanmalarının meydana geldiğı yüzey alanı çapıdır [22].



Ayrık tabakaların birikimi sırasında yüzeylerde bozunum görülür ve parçacık bağlantı yüzyelerinin kalitesini olumsuz etkiler. Bir tabakanın içinde parçacıkların oluşturdukları arayüzeylerde mekanik bağlanmalar gözlenir. Bunun nedeni ayrık parçacıkların birbiri ile kaynaklanmasıdır.

Kaplama tabakası arayüzeyleri elektron mikroskobu ile net olarak görülebilir. Eğer arayüzey belirli değilse, topaklanmış porlar içeriyorsa veya arayüzey sürekli kalınsa bunun nedeni hatalı ön hazırlık, yüzey kirliliği, oksidasyon veya uygun olmayan sprey koşulları nedeniyle kaplamanın delaminasyonu olabilir. Kesintisiz, belirgin ve ince arayüz, her parçacığın mükemmel yapışma özelliği gösterdiği anlamına gelmektedir [19].

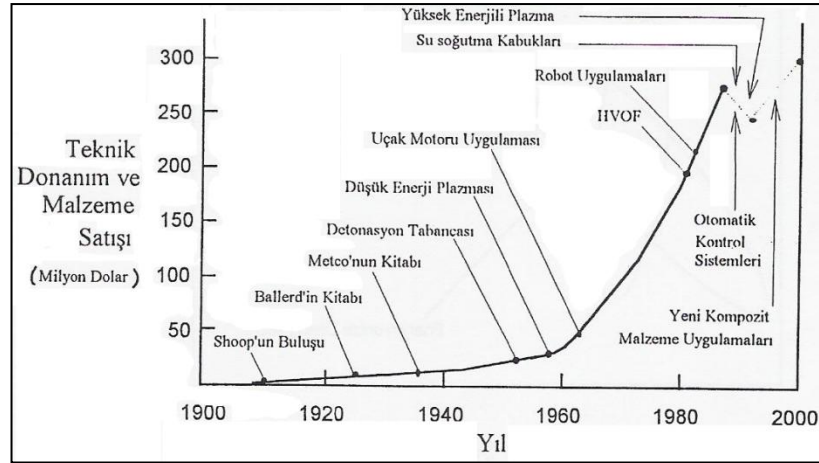
Plazma spreyci prosesi, kaplama kalitesi ve kaplama parametreleri değiştirilerek farklı kaplamalar elde edilebilmesi sayesinde yaygınlaşmıştır. Öyle ki prosesin çok

yönlülüğü, bu türün termal spreynin bir alt üyesi iken prosesi olmasına karşın başlı başına bir kaplama prosesi olarak kullanılmasına imkan vermiştir. Plazma spreynin uygulamalarının tarihsel gelişimi Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Bu grafiğe göre plazma spreynin trendi 1960'larda uçak motor uygulamaları iken günümüzde çalışmalar kompozit malzeme uygulamaları üzerinde yoğunlaştırılmıştır.

Plazma spreynin avantajları ise aşağıdaki gibi sıralanabilir;

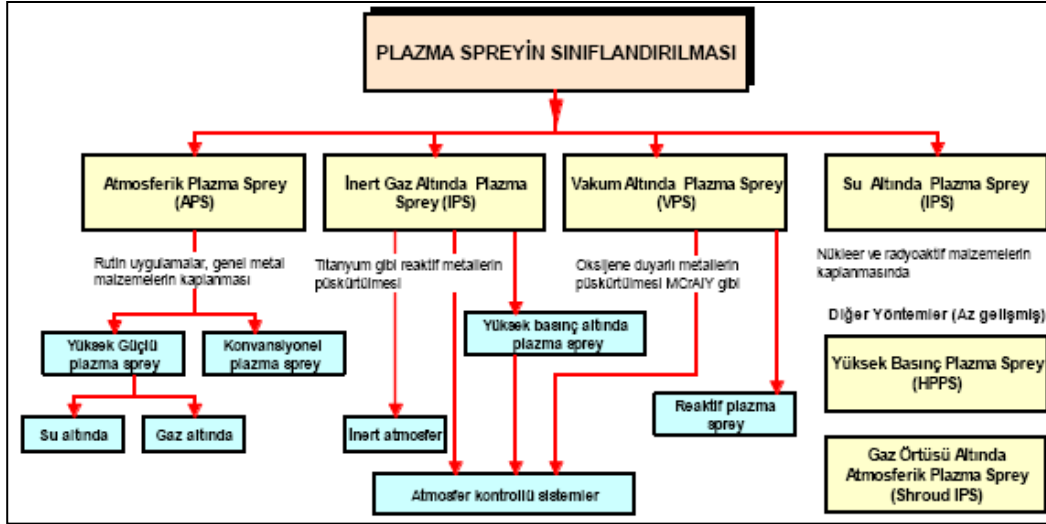
- Uygulama sabit bir ergime noktasına sahip tüm malzemeler ile yapılabilir.
- Boyut ve geometri farkı olmaksızın her türlü iş parçası kaplanabilir.
- Kaplama prosesi otomasyon ile kusursuz biçimde kontrol edilebilmekte olup aynı parametrelerle aynı kalitede kaplama tekrarlanabilmektedir.
- Diğer ince film yöntemlerine göre uygun yatırım ve işletme maliyetleri söz konusudur [17].

Plazma spreynin çeşitleri genellikle benzer olup sınıflandırma, kaplama tabancasının bulunduğu ortama göre yapılmaktadır. Kaplama tabancası, açık atmosfer ortamı ve basıncında bulunuyorsa atmosferik plazma spreynin, eğer inert gaz veya vakum altında bulunuyor ise, inert plazma spreynin ve vakum plazma spreynin olarak tanımlanır.



Şekil 3.13 : Plazma spreynin tarihsel gelişimi [13].

En gelişmiş ve yaygın yöntemler; APS, VPS ve IPS yöntemleridir. Plazma spreynin çeşitleri Şekil 3.14'de gösterilmiştir [13].



Şekil 3.14 : Plazma spreyn sınıflandırılması [13].

3.2. Fonksiyonel Kademelendirilmiş Kaplamalar

Fonksiyonel kademelendirilmiş kaplamalar kompozit malzemelerin yenilikçi sınıfı olup kademeli varyasyon kompozisyonu olarak karakterize edilirler. Aslında geleneksel kompozit malzemelerin aksine “Fonksiyonel Kademelendirilmiş Malzemeleri (FGM)” oluşturan bileşenler altlık üzerine gelişigüzel dağıtılmamış olup kompozisyonda kademeli bir değişim yaratarak malzemenin özelliklerinde farklılıklar oluşturmak için kullanılmışlardır. Bu yolla termomekanik yükleme koşullarında malzeme mikroyapısını ölçmek mümkündür. FGM konsepti birçok sisteme entegre edilmiştir. Ancak FGM’nin avantajlarından faydalanabilmek için yöntemin gerektirdiği koşullarda, kontrollü derecelendirme ile tekrar üretilebilir uygulamalar yapılmalıdır. Termal spreyleme, FGM’leri üretmenin esnek ve güvenilir bir yöntemi olup bu şekilde yapılan kaplamalar “Fonksiyonel Kademelendirilmiş Kaplamalar (FGC)” olarak adlandırılır. Termal spray kaplama (TBC) yöntemi ile hazırlanmış FGC’ler sensör ve enerji uygulamalarında, yüksek aşınma ve erozyon dayanımlarından ötürü bütün TBC’ler gibi endüstriyel cihazlarda ve makinelerde kullanılmaktadır [23]. Fonksiyonel kademeli kaplamanın etkisi kalıntı gerilmelerin giderilmesi bakımından çok fazla değildir. Ancak fonksiyonel kademelendirme ile ısı iletkenliği bakımından büyük avantaj elde edildiği bilinen bir gerçektir.

TBC’nin ömrünü sürdürebilmesi kaplamanın mikroyapısına, porozite şekli ve miktarına, kaplamadaki ve altlık üzerindeki kalıntı gerilmelere bağlıdır [12]. Plazma spray kaplamadan kaynaklanan kalıntı gerilme üç olayla gerçekleşir: faz dönüşümü,

splatların ani büzülmesi ve altlık ile kaplama malzemesinin termal genleşme katsayılarının arasındaki farklar. Zirkonya üst kaplamada gerçekleşen sıvı-katı ve katı-katı faz dönüşümlerinden kaynaklanan gerilmeler dikkate alınmayabilir. TBC sistemlerde YSZ, zirkonyanın tetragonalden monolitik faza dönüşümünü engellemek için çoğunlukla üst katman olarak kullanılır. Faz dönüşümleri ihmal edildiğinde kalıntı gerilme (3.1)'deki gibi ifade edilir [24].

$$\sigma_{artık} = \sigma_q + \sigma_t \quad (3.1)$$

Bu denklemdeki ifadeler (3.2) ve (3.3)'te açıklanır;

$$\sigma_{tc} \approx E_c \Delta \alpha \Delta T \frac{1+\nu}{1-\nu^2} \quad (3.2)$$

$$\sigma_q = \alpha_c (T_m - T_s) E_c \text{ 'dir.} \quad (3.3)$$

E_c , $\Delta \alpha$, ΔT , ν sırayla kaplamanın elastik modülü, altlık ve kaplama arasındaki termal genleşme katsayısı (CTE) farkı, soğuma esnasındaki sıcaklık farkı ve kaplamanın Poisson oranıdır.

α_c , E_c , T_m , T_s sırayla CTE, kaplamanın elastik modülü, spray malzemesinin ergime noktası ve altlık malzemesinin sıcaklığıdır. Zirkonya ve alüminanın termal genleşme katsayıları arasında küçük bir fark vardır [25]. Bu yüzden CTE'nin ve fonksiyonel kademelendirmenin bu tip kaplamalarda kalıntı gerilmeye çok da fazla etkisi yoktur.

Porozite varlığı hata olarak değerlendirilse, sertlik ve aşınma dayanımına olumsuz etkileri olsa da termal direnci ve mekanik uyumluluğu sağlamak adına kaplama bünyesinde bir miktar porozitenin bulunması gerekmektedir [16].

Çalışmalar gösteriyor ki kaba zirkonya tanelerinin hacimsel artışı toklaşma mekanizması üzerindeki mikroyapısal parametrelerin kırılma tokluğu üzerindeki etkisi yani gerilme ile uyarılmış faz dönüşümü ile kırılma tokluğu artmaktadır [25].

3.3 APS Prosesinde Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada alümina altlık ile yüzey gerilmesi farkı teşkil etmemesi ve mekanik özelliklerinin zırh amaçlı kullanıma uygunluğu nedeniyle kaplama yapısı alümina ağırlıklıdır. Alüminanın kırılma tokluğu 3-5 K_{IC} değerleri arasındadır. Alüminanın kırılma tokluğu zirkonya ilavesiyle iyileştirilebilmektedir. Bu durum zirkonyanın dönüşüm toklaşması mekanizması sayesinde meydana gelmektedir. Zirkonya polimorfları arasında dönüşüm sıcaklıkları aşağıdaki gibidir:

Monoklinik(m-ZrO₂) $^{950^{\circ}\text{C}} \leftrightarrow$ $^{1170^{\circ}\text{C}}$ tetragonal(t-ZrO₂) $^{2370^{\circ}\text{C}} \leftrightarrow$ kübik(c-ZrO₂) $^{2680^{\circ}\text{C}} \leftrightarrow$
SIVI

t→m dönüşümü soğutma sırasında ~ 950°C de, ısıtırken ~1170°C de gerçekleşir. t→m dönüşümü, geniş sıcaklık histeresizi (200°C civarında), hacim değişim miktarı (%4-5) ve soğutma sırasında saf zirkonyadan yapılan sinterlenmiş bölümün dağılmasına sebep olan çekme gerilmeleri (%14-15) ile bağdaştırılanın tersine martensitik dönüşümdür. Aynı zamanda kayma gerilmesinde %7'lik bir artış da meydana gelir.

Zirkonyanın özelliklerini sağlayan başlıca mekanizmalardan biri yarı kararlı tetragonal çökeltilerin belirli kritik değer üzerinde gerilmelere maruz kalınca büyüdüğü ve monoklinik faza martensitik dönüşümün meydana geldiği dönüşüm toklaşmasıdır. c-ZrO₂ sadece ~2370°C den erime noktası olan ~2680°C ye kadar kararlıdır ve düşük sıcaklıklarda kararlı değildir [10]. Bu yüzden kaplama uygulamalarında genellikle itriya ile dengelenmiş zirkonya tercih edilir. Alümina içerisine az miktarda (%10-15) zirkonya ilavesinin iki temel avantajı vardır: Zirkonya ile toklaştırılmış alümina kompozitlerinde çatlak ilerlemesi alümina matriks boyunca gerçekleşir. zirkonyanın tetragonalden monolitik faza dönerkenki (martensitik dönüşüm) hacim artışı ile zirkonya taneleri alümina taneleri içine yayılarak çatlakların ilerlemesini önler. Böylelikle kırılma tokluğu artışı üzerinde olumlu etkileri vardır.

4. SERAMİK MALZEMELERİN KIRILMA TOKLUĞU

Malzemeye herhangi bir σ gerilmesi uygulandığında çatlak ucundaki gerilmeler “gerilme yoğunluk faktörü” K_I ile tanımlanır (4.1),

$$K_I = Y\sigma \sqrt{\alpha} \quad (4.1)$$

Burada α çatlak uzunluğu, Y çatlakla ilgili geometrik faktördür. Çatlak ucunda oluşan gerilmeler ile oluşan hızlı kırılmaların kırılğan malzemelerde meydana geldiği varsayılmaktadır. Bu sırada yukarıdaki K_I faktörün değeri kırılma tokluğundan K_{IC} daha yüksek olur. K_{IC} hızlı kırılmaya dayanım gösterir.

Kırılma tokluğu, σ_R belirli bir seramik numunesi için (4.2)’de

$$\sigma_R = \frac{K_{IC}}{Y\sqrt{a}} \quad (4.2)$$

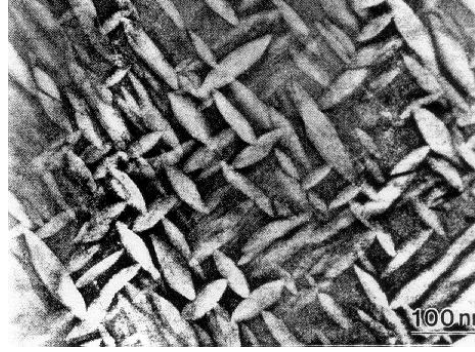
olarak verilmiştir.

Kırılma hatası probleminin önlenmesi, kompozit malzemeler kullanılarak malzemenin kırılma tokluğunun artırılması ile mümkündür. Belirli bir malzemenin sertliğini ve güvenilirliğini arttırmak için hata boyutu α ’yı mümkün olan en düşük seviyeye getirmek gerekmektedir [29].

Seramiklerin yapısal uygulamaları yukarıda bahsedilen kırılğanlıklarından ötürü sınırlanmıştır. Seramiklerin bu özelliklerini bertaraf etmek için birçok çalışma yapılmıştır. Üzerinde en çok çalışılan mekanizma da ikincil faz inklüzyonları ilavesiyle çatlak ilerlemesini durdurmaktır. Bunu sağlamak için de zirkonya parçacıkları ve silisyum karbür viskerlerinden yararlanılmaktadır. Bu malzemeler tokluğun yanında ilave edildikleri malzemenin sertliğine de olumlu etki yapmaktadır [26].

Transformasyonla toklaştırılmış zirkonyum oksit (TTZ) yaklaşık 30 senedir yüksek sertlikli ve yüksek tokluğa sahip seramiklerden biridir. Zirkonyaya yüksek tokluğunu sağlayan transformasyon mekanizmasının temelinde zirkonyanın polimorfik dönüşümü yatmaktadır. Zirkonya, oda sıcaklığı ile 950°C arasında monolitik kristal yapıya sahiptir. 950°C üstünde ise tetragonal kristal yapıya geçer. Bu dönüşüm,

ısınma sırasında %4 oranında bir uzama, soğuma sırasında ise eşdeğer bir büzülme yaratır. Daha yüksek sıcaklıklarda zirkonya tetragonalden kübik yapıya geçer. Gerekli kimyasalların ilavesi ve ısı işlemler ile soğutulma esnasında lens şekilli tetragonal zirkonya, kübik zirkonya tanelerinin içinde çökelir [30]. Bu yapı, Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Dönüşüm ile toklaştırılmış zirkonya mikroyapısı [30].

Normalde soğuma sırasında tetragonal malzemenin monolitik forma dönüşmesi beklenir ancak bu esnada malzemenin genişmesi gerekir. Yüksek sertlikli kübik zirkonya tarafından bu durum önlendiğinden ötürü sıcaklık oda sıcaklığına düşene kadar tetragonal form korunur. Sonuç olarak her tetragonal zirkonya çökeltisi stres altında, enerji yüklüdür ve küçük bir kutuya yerleştirilmiş bir balon gibi gevsemeyi bekler. Kutu açıldığında balon denge durumuna geçer ve bu esnada genişlediği için kutudan çıkar. Aynı şey bir kuvvetin seramiği kırması ile çatlak oluşmaya başlaması anında her bir tetragonal çökeltiye olur. Çatlak yanındaki tetragonal çökeltiiler genişleyebilir ve monolitik stabil fazlarına dönüşebilirler. Bu sırada meydana gelen genişleme çatlak önünü tıkar ve çatlak durdurur ki bu da transformasyon toklaşması mekanizmasıdır. Bazı çelik formlarındaki toklaşma mekanizması da bu şekildedir [31].

TTZ’nin birkaç farklı formu vardır: yukarıda bahsedilen kısmi stabilize zirkonya (PSZ) ve neredeyse her kristalitte ya da her bir tanede bulunan tetragonal zirkonya polikristalin (TZP). İki mekanizmanın da birbirinden farklı özellikleri olup spesifik uygulamalar için biri tercih edilebilir [32].

Zirkonya ile toklaştırılmış alümina (ZTA) kompozitleri alümina matris içerisine gömülmüş stabilize veya stabilize olmayan zirkonya partikülleri ile elde edilmektedir. Çalışmalar gösteriyor ki zirkonya içeriği arttıkça ZTA’nın kırılma tokluğu da artmaktadır. Ancak sertliği alüminadan düşük olan zirkonyanın ilavesi

seramiğin kırılma tokluğunu arttırmasıyla beraber sertlik özelliklerinde azalma meydana getirmektedir [33]. Bu yüzden bu iki özelliği de yüksek değerlerde tutacak optimum bir zirkonya ilavesinden söz edilmelidir.

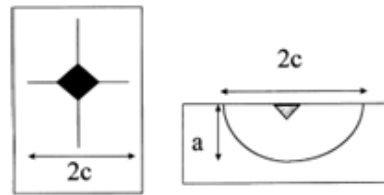
4.1. Seramik Malzemelerde Kırılma Tokluğu Ölçümü

Kırılma tokluğu ölçümündeki esas zorluk çentik önünde keskin bir çatlak hazırlamaktır. Bunun temel nedeni çentik etrafında metallerde olan belirgin plastisitenin oluşmamasıdır. Önçatlak oluşturmak için iki yöntem vardır [34].

Tek köşeli çentik yayınması (SENB): Çevrimsel basınçlı yükler SENB numunesine çentik kesme ile yüklenmiştir. Bunun neticesinde tane sınırı hatası meydana gelmiş, çatlak ilerlemesi çentik bölgesinden itibaren yürümüştür. Tane büyümesi stabildir ve küçük ilaveler ile sınırlandırılmıştır. Yükleme oranına göre hassas olup çevresel koşullara ve yükleme frekansına bağlıdır.

Tek köşeli V-çentikli yayınma (SEVNB): Burada çentik, elmas pasta ile parlatılan bir falçata ile elde edilir. Çentiğin kırılma tokluğunun ölçümü için yeterince keskin olup olmadığına bakılır. Sonuçlar alternatif yöntemlerle karşılaştırılır.

Küçük yüzeysel çatlakların boyutları ve şekilleri birçok seramikte keskin sertlik uçlarıyla kontrol edilir. Burada Vickers ve Knoop olarak iki farklı uç geometrisi bulunmaktadır. Vickers uçlarında çatlak ilerlemesi çatlak uçlarından doğar. İndentasyon çatlaklarının morfolojisi indentasyon yoluna ve malzemenin kırılma tokluğuna bağlıdır. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi yarım daire radyal çatlakları kırılğan malzemelerde en sık karşılaşılan çatlak şeklidir [35].



Şekil 4.2: Vickers indenteri ile bırakılmış radyal çatlak.

İndentasyon mikroçatlak yöntemi (IM): Vickers ucunun köşelerinden yayılan kenarortay çatlaklar, kalıntı gerilme itici güç olduğunda kırılma tokluğu ile eşdeğer hale gelir.

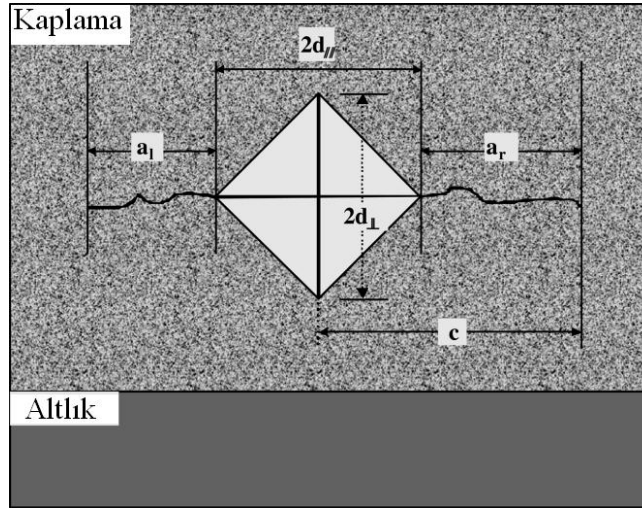
Eğilme ile meydana gelen yüzeysel çatlak yöntemi (SCF): Kontrollü yüzey akışı Vickers indenteri uygulanarak yapılır. Numune, iz etrafındaki plastik deformasyonu

gidermek için parlatılır. Takip edilmesi meşakkatli bir yöntem olan SCF’de oluşan ilk çatlak SEM görüntülerinde karakterize etmek dahi zordur [36].

Kırılma tokluğu ölçüm yöntemlerinden IM ve ISB diğerlerinden daha düşük K_{IC} değerleri verir. Kalıntı gerilme serbest çatlaklarıyla ölçüm yapılan SCF yönteminde elde edilen K_{IC} değeri büyük çatlaklarla (SENB ve SEVNB yöntemleri) yapılan ölçümlerle benzerlik göstermektedir [34].

Kaplama yapısı sürekli olmayıp indentasyon esnasında çoklu çatlaklar meydana geldiği, kaplama sırasında inklüzyonlar oluştuğu için Vickers indentasyon yöntemi kaplamaların kırılma toklukları ile ilgili kesin sayılar vermektense bu değerlerle ilgili yalnızca yaklaşım yapılması konusunda yardımcı olur [37].

Kaplamanın kırılma tokluğu ölçümü için bu araştırmada Lima ve arkadaşlarının [38] çalışmasından yararlanılmıştır. Bu çalışmadaki formüller Şekil 4.3’te gösterilen ifadelerin $c/d \geq 2.5$ durumunda geçerlidir.



Şekil 4.3: Kırılma tokluğu ölçüm parametreleri [38].

Yukarıdaki c çatlak boyu (4.3)’teki formülle hesaplanmıştır.

$$c = \frac{(2d_{II} + 2d_{I})}{4} + \frac{(a_1 + a_2)}{2} \quad (4.3)$$

$2d_{II}$ ve $2d_{I}$ kaplama üzerindeki paralel ve dik Vickers izleri

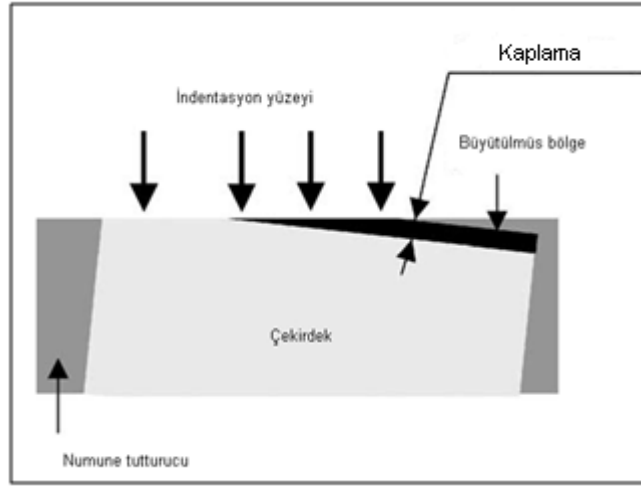
a_1 ve a_r sağ ve sol çatlak uzunluklarını nitelemektedir.

İndentasyon yükü P ve toplam çatlak uzunluğu c de hesaplamaya katıldığında K_c kırılma tokluğu (4.4)’te görülmektedir.

$$K_c = 0.0711 \left(H_v d_z^1 \right) \left[\frac{E}{H_v} \right]^{\frac{2}{5}} \left[\frac{c}{d} \right]^{-\frac{3}{2}} \quad (4.4)$$

Burada H_v Vickers sertliğini, E elastik modülü temsil etmektedir.

Fonksiyonel kademeli kaplamalar için ise durum farklıdır. Kaplama tek bir katmandan oluşmadığı için kaplama doğrultusuna paralel alınan tek bir kesitten alınan ölçümler doğru bir sonuç vermeyecektir. Çünkü her katmanın mekanik özelliği farklıdır. Bunun ayırımına varılabilmesi ve sertlik geçişlerinin daha net görülebilmesi için fonksiyonel kademeli kaplama için kesit Şekil 4.4'teki görüntüye uygun olarak alınmıştır. İndentasyon yüzeye yakın yerden başlayıp kaplamanın bitimine kadar sürmüştür.

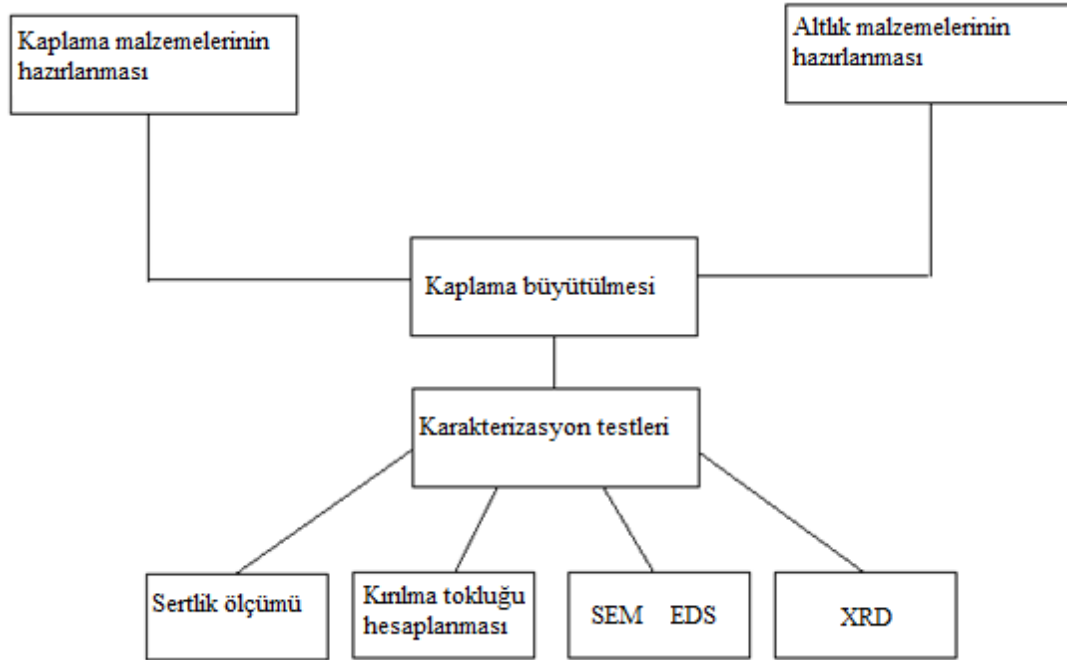


Şekil 4.4: Fonksiyonel kademeli kaplamalar için kırılma tokluğu ölçüm numunesi [38].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Amaç ve Deneyisel Yöntem

Bu çalışmada zırh uygulamalarında kullanılan alümina plakaların çoklu atışa dayanımlarını arttırmak ve yapışma yüzeylerini iyileştirmek amacıyla yüksek sertlikli Al_2O_3 ve yüksek tokluğa sahip ZrO_2 'nin %90 Al_2O_3 - %10 ZrO_2 ve %85 Al_2O_3 - %15 ZrO_2 oranlarında karışımları ile elde edilen toz, alümina altlıklar üzerine Atmosferik Plazma Sprey (APS) yöntemi kullanılarak kaplanmıştır. Toplam 3 set kaplama yapılmıştır. Tozların faz analizleri X ışınları difraksiyonu (XRD) ile gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların sertlik ve kırılma tokluğu değerleri ölçülmüş, mikroyapı analizleri için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların amaca uygun etkinliğinin gözlenmesi için balistik testler uygulanmıştır. Üretim ve karakterizasyon adımları Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1: Üretim Akım Şeması

5.2. Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Cihazlar

5.2.1. Kullanılan malzemeler

Termal sprey kaplamalarda, literatür çalışmasında da anlatıldığı gibi kaplamanın yapışma mukavemetinin yüksek olması için altlık ve toz malzemelerin fiziksel özelliklerinin uyumluluğu büyük önem teşkil eder. Bu açıdan alümina tozlarının kullanımı uygun görülmüştür. Yine literatür araştırmaları göz önünde bulundurularak alümina katmana tokluk kazandırarak çatlak ilerlemesini azaltmak için zirkonya katkısı yapılmıştır [39]. Zirkonya katkısı oranı De Aza [34], Casellas ve arkadaşlarının [30] çalışmaları dikkate alınarak %10 ve %15 olarak belirlenmiştir. Deneyde kullanılan METCO 204NS zirkonya ve METCO 105SFP alümina tozları literatür araştırmaları sonucunda bu çalışma için en uygun tozlar olarak görülmüştür [40,41]. Tozların özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1: Kaplamada kullanılan malzemelerinin ticari özellikleri

Malzeme	Ticari adı	Tane boyutu	Morfoloji	Kimyasal analiz
Alumina	METCO 105SFP	-31 +3,9 μm	Açısal	99,5+
Zirkonya	METCO 204NS	-125 +45 μm	Küresel	ZrO ₂ 8Y ₂ O ₃

5.2.2. Kaplama Malzemesinin Hazırlanması

Kaplamanın yapılması için uygun toz miktarı belirlendikten sonra tozlar dijital terazi ile tartılmış, kaplama parametreleri sabitlenirken sarfedilecek toz miktarı da göz önünde bulundurularak her bir kaplama seti için 300g %85Al₂O₃+%15ZrO₂, 300g %90Al₂O₃+%10ZrO₂ hazırlanmıştır.

Hazırlanan toz karışımları Şekil 5.2 a’da görülen Fritsch Pullverisette 5 marka gezegen tipi değirmende karıştırılmıştır. Karışımın yapıldığı kap ve bilyalar alüminadır. Bunun nedeni, karışma esnasında gerçekleşen herhangi bir malzeme aşınması durumundan toz bileşiminin en az etkilenmesini sağlamaktır. İşlemin amacı sadece tozların karışmasını sağlamak olduğundan işlem 1 saat sürmüştür. Karışım için hazırlanan toz malzemenin ağırlığı kadar 15 mm çapa sahip bilyalar kullanılmıştır.



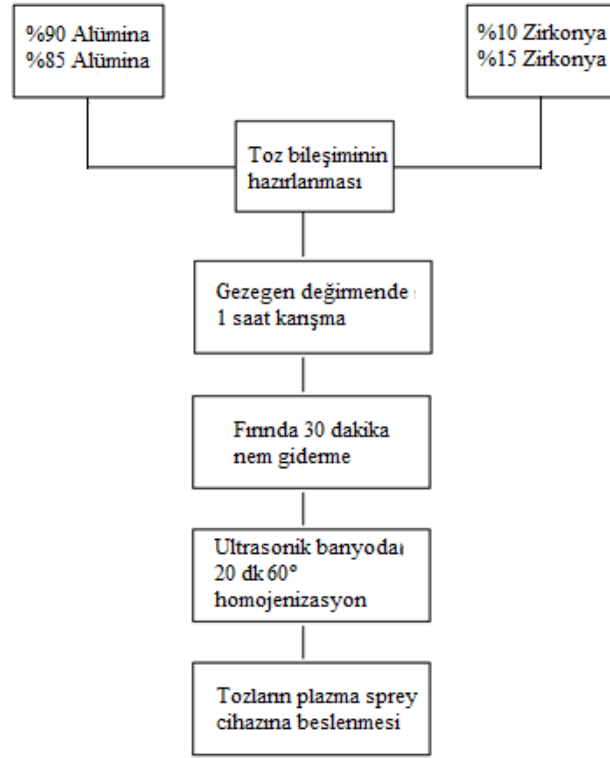
Şekil 5.2: Kaplama malzemelerinin karıştırılmasında kullanılan a) gezegen tipi değirmen b) bilyalar ve öğütme kabı

Karıştırılan kaplama malzemeleri, proses esnasında nemlenmemeleri için beherlere konup Şekil 5.3'te görülen sinter fırınında 100°C 'de 30 dakika, ardından ağızları kapatılarak Şekil 5.4'teki Bandelin RK-100 marka ultrasonik banyoda 60°C sıcaklıkta 20 dakika bekletilmiştir.



Şekil 5.3: a) Sinter fırını b) Ultrasonik banyo

Şekil 5.4'te kaplama malzemelerinin hazırlanma adımları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.4: Kaplama malzemelerinin hazırlama adımlarının gösterimi.

5.2.3. Altlık Malzemesinin Hazırlanması

Altlık malzemesinin yüzey hazırlığı, kaplama yapışma mukavemeti ile doğrudan ilgilidir. İyi bir yüzey hazırlığı ile yüksek yapışma mukavemetli kaplamalar elde edilmesi mümkündür. Spreylenen parçaların daha geniş bir yüzeye saçılması için yüzey alanının artırılması gerekir. Bu nedenle 50x50x6 mm boyutlarındaki alümina seramik ve zırh çeliği malzemeleri, Şekil 5.5'te gösterilen kumlama cihazında alümina tozları ile 1'er dakika kumlama işlemine tabi tutulmuştur. Kumlamanın ardından plazma sprej numune tablasına 5 seramik ve 1 çelik malzeme yerleştirilmiştir. Numuneler alkol ve asetonla el sürülmeden temizlenmiştir.



Şekil 5.5: Kumlama cihazı.

5.2.4. Plazma Sprey Cihazı ve Sprey Parametreleri

Çalışmada Sulzer Metco 9MC yarı otomatik plazma sprej sistemi kullanılmıştır. Bu sistemin bileşenleri:

- 9MC Sprej kontrolü
- 5MP Toz besleyici
- 10MR Güç sağlayıcı
- Isı değiştirici
- 9MCD Dağıtma ünitesi
- 3MBM Plazma tabancası'dır.

Kaplamanın yapıldığı termal bariyer kaplama cihazı Şekil 5.6'da görülmektedir



Şekil 5.6: Termal sprej kaplama cihazı.

Kaplama parametreleri belirlenirken, kaplamanın çekirdek malzeme davranışı göstermesi göz önünde bulundurularak yoğun bir tabakadansa gözenekli bir yapı oluşturulmak istenmiş, bunun için de Atmosferik Plazma Sprej (APS) yöntemi uygun görülmüştür.

5.2.5. Kaplamaların Mikroyapı ve Faz Karakterizasyonları

Büyütülen kaplamaların morfolojisini incelemek amacıyla Şekil 5.10'da görülen JEOL marka JSM-7000F model alan emisyonlu, yüksek çözünürlüklü tarama elektron mikroskobu kullanılmıştır.



Şekil 5.7: JEOL JSM-7000F tarama elektron mikroskobu.

5.2.6. Kaplamaların Mekanik Özelliklerinin Karakterizasyonu

Kaplamaların sertlikleri, kaplama doğrultusuna paralel alınan kesitler üzerinden ölçülmüştür. Bunun için öncelikle kaplanmış plakalardan Şekil 5.8’de görülen Buehler Isomet 2000 marka kesme cihazında küçük numuneler kesilmiştir.



Şekil 5.8: Kesme cihazı.

Numuneler sertlik ölçümü sırasında bırakılan piramit izin görülmesi için öncelikle Şekil 5.9’de görülen Lam Plan MM 8027 cihazında parlatma işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 5.9: Parlatma cihazı.

Parlatılan numunelerin sertlikleri Şekil 5.10'daki Leica VM HTMOT markalı yük aralığı 2 g ile 2 kg arasında değişmekte olan mikrosertlik cihazı ile ölçülmüştür. Ölçümler Al_2O_3 plakada 1000 g, kaplamalarda ise 300 g yüküyle yapılmıştır.



Şekil 5.10: Mikrosertlik ölçüm cihazı.

5.2.7. Kaplama Prosesi

APS kaplama parametreleri ve kaplama yapısına etkileri göz önünde bulundurularak yüksek poroziteli kaplama elde etmek için uygulama parametreleri Çizelge 5.2'deki gibi seçilmiştir.

Parametrelerin belirlenmesinin ardından, hazırlanan kaplama malzemeleri plazma sprej cihazı toz haznesine aktarılmış, parametrelerin sabitlenmesi için cihaz çalıştırılmıştır. 14 paso olarak planlanan kaplamanın 3. pasosunda tabancaya toz besleme yolu tıkanmış, işlem yarım kalmıştır. Tozlar tekrar fırına koyulup 100 °C'de bu kez 2 saat bekletilip plazma sprej haznesine aktarılmış ancak 8. Pasoda yine aynı durumla karşılaşmıştır.

Çizelge 5.2: Plazma sprej kaplama parametreleri.

APS Parametreleri	Değerler
Argon basıncı (psi)	75
Argon akışı (SCFH)	167
Hidrojen basıncı (psi)	50
Hidrojen akışı (SCFH)	10
Akım (Amper)	500
Voltaj (Volt)	75-80
Toz besleme hızı (g/dk)	30

Kaplama tozları tekrar beherlere alınıp önce 100°C'deki fırında 30 dakika, ardından ağzları kapatılarak ultrasonik banyoda 20 dakika bekletilmiştir.

Ultrasonik banyo sonrası plazma sprej cihazına beslenen kaplama tozları herhangi bir tıkanıklığa neden olmamıştır.

Toz akışının sabitlenmesinin ardından her bir kaplamanın 500 µm kalınlığında olması için altlık malzemenin kaplama işlemine 14 paso tabi tutulması planlanmıştır.

Kaplama esnasında toz besleme hortumunun tıkanması karşılaşılan en büyük problem olmuştur. Köşeli ve ince taneli alümina tozlarının bünyesindeki suyu uzaklaştırmak bu problemi çözmek için yeterli olmamış, aglomerasyonun önlenmesi için numuneler ultrasonik banyoya konmuştur. Olumsuz hava şartlarının da bu probleme zemin hazırladığı düşünülebilir.

6. SONUÇLAR VE İRDELEMELER

Zırh uygulamalarında arka plaka ne olursa olsun, atış yönünde yüksek sertlik ve düşük ağırlığa sahip olması nedeniyle seramik vazgeçilmez bir malzemedir. Araç zırhlamasında kullanılan seramiklerin %90'ını SiC ve B₄C gibi düşük yoğunluklu ($d_{\text{SiC}}=3,21\text{g/cm}^3$, $d_{\text{B}_4\text{C}}=2,52\text{g/cm}^3$) seramiklerden 4-5 kat ucuz olan Al₂O₃ ($d_{\text{Al}_2\text{O}_3}=3,95\text{g/cm}^3$) oluşturmaktadır. SiC ve B₄C balistik performans bakımından Al₂O₃'ten daha iyidir. Diğer düşük yoğunluklu seramikler ancak ağırlığın penetrasyon dayanımının ardından en önemli faktör olduğu hava araçları ve insan zırhlamasında kullanılmaktadır. Deneyde kullanılan alümina St. Goabin'den tedarik edilmiş olup %99.9 safiyette zırh kullanımına uygun bir seramiktir. Yüksek safiyet ve mukavemetleri nedeniyle seramiklerin darbe altında bütünlüklerini korumaları zordur. Balistik darbe sırasında oluşan ve darbe öncesi malzeme deformasyonunu başlatan şok dalgalarının etkisiyle seramik malzeme zayıflamaya başlar, darbe sonrasında ise Hertizian konik çatlaklarının oluşmasıyla yapısal bütünlüğünü kaybeder. Bu hasarın en aza indirgenmesi için seramik atış yüzeyi kimi zaman kauçuk gibi elastik yüzeylere yapıştırılmıştır. Ancak darbe altında davranışları kontrol edilemeyen kauçuğun performansı beklendiği gibi olmamıştır. Daha sonra kırılğan seramik malzemeler Hugoniot Elastik Limiti yüksek köpük, bal peteği gibi çekirdek malzemeler ile desteklenmeye başlamıştır.

Bu çalışmada seramik malzemenin yapısal bütünlüğünün en üst düzeyde korunarak çoklu atışa dayanımın düşük bir ağırlık artışı ile sağlanması amaçlanmıştır. Bunun için de çekirdek malzeme görevi görececek ince seramik katmanlar Termal Sprey Kaplama tekniklerinden Atmosferik Plazma Sprey (APS) yöntemi ile büyütülmüştür. Bu yöntem için alümina ve YSZ malzemeleri uygun görülmüştür. Kaplamada kullanılacak alümina altlık malzemesi ile uyumlu olduğu için tercih edilmiş, YSZ ise dönüşüm toklaşması mekanizması ile kaplamanın kırılma tokluğunu arttırmak için uygun bulunmuş, kaplamanın kırılma tokluğunda %11'lik bir artış sağlanmıştır.

6.1. Karakterizasyon Testleri Sonuçları

Alümina altlık kumlama işleminin ardından yeterli yüzey pürüzlülüğüne sahip olup olmadığının tespiti için Atomik Kuvvet Mikroskobunda (AFM) yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. APS uygulaması için kullanılacak malzemelerin, APS uygulamasının ardından ve balistik testler sonrası ortaya çıkan fazların tespiti için faz analizleri, APS uygulaması için kullanılacak malzemeler yüzey karakteristiklerinin, APS uygulamasının ardından kaplama karakteristiğinin ve seramikte meydana gelen kırılmanın ne şekilde oluştuğunun tespiti için mikroyapı ve elementel analizler yapılmıştır.

6.1.1. AFM Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

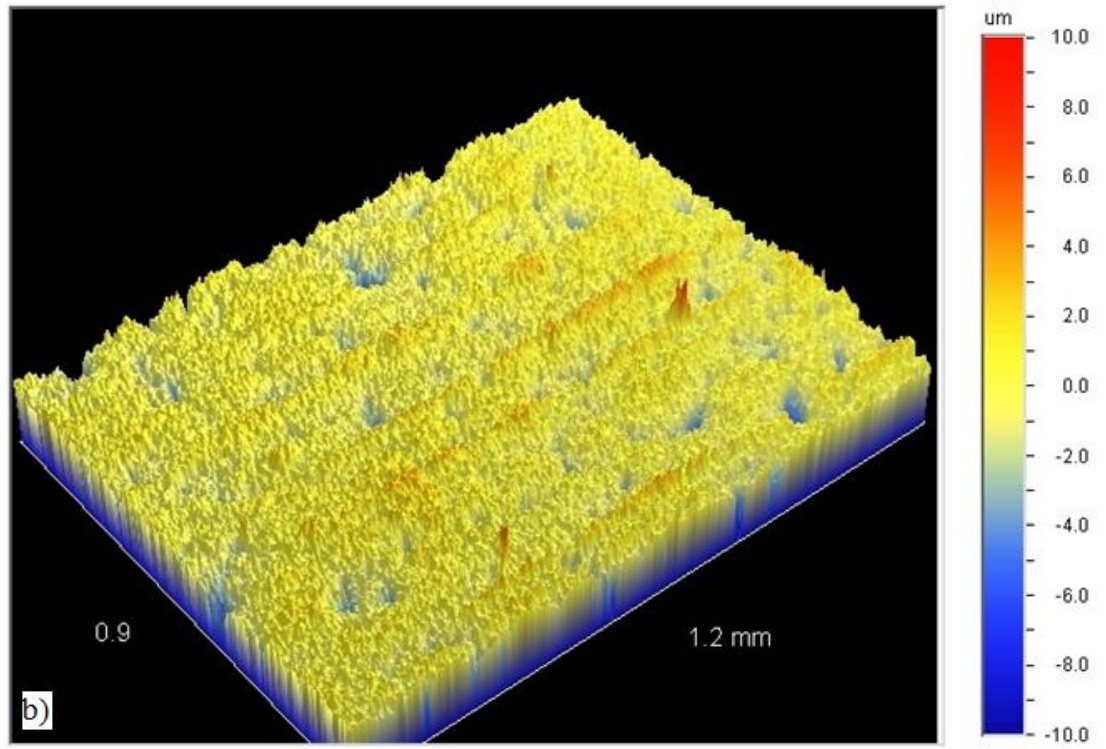
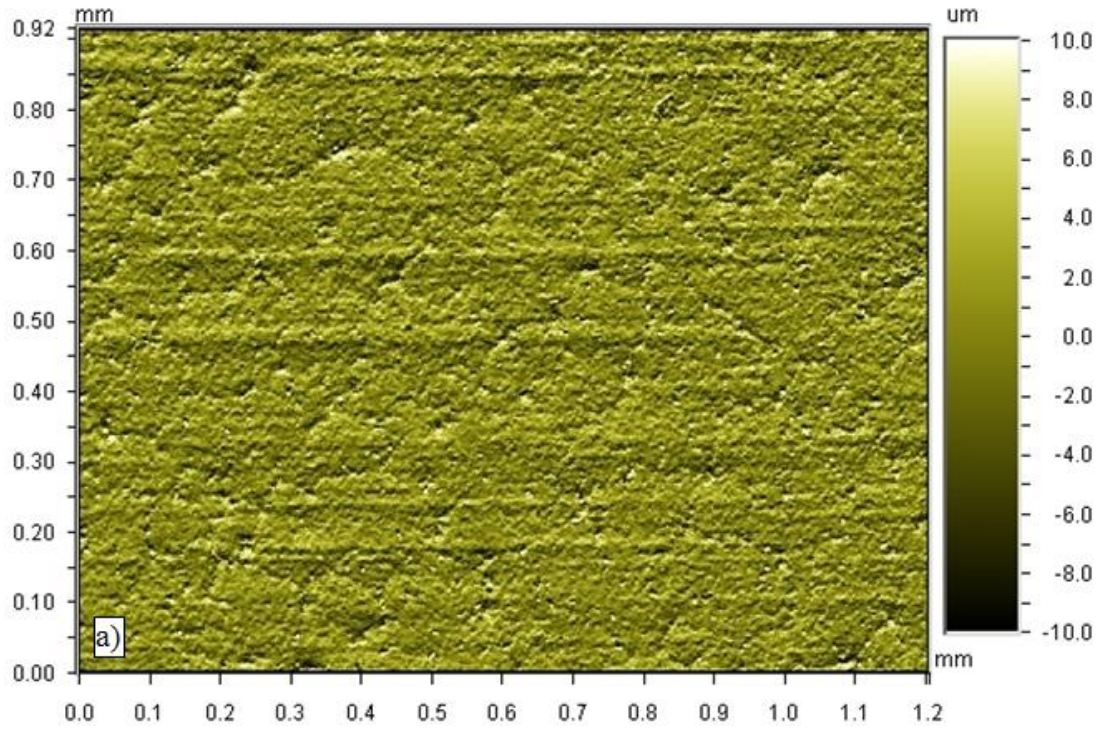
Seramik malzemelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin kaplama için uygunluğunun tespiti amacıyla Veeco Atomik Kuvvet Mikroskobu kullanılmıştır. Kumlama öncesi seramik yüzey pürüzlülüğü (Ra) 950nm olarak ölçülüp yüzeyin Şekil 6.1 (a)'da iki boyutlu, Şekil 6.1 (b)'de ise 3 boyutlu görüntüleri verilmiştir. Bu pürüzlülük değeri yüksek mukavemetli bir kaplama oluşturmak için yeterli görülmeyp yüzey, alümina taneleri ile kumlama işlemine tabi tutulmuştur.

Kumlama sonrası seramik yüzeyindeki pürüzlülük ortalama 2,57 μm olarak ölçülmüş olup Şekil 6.2'de 2 boyutlu (Şekil 6.2 a) ve 3 boyutlu (Şekil 6.2 b) olarak görülmektedir. Bu değer termal bariyer kaplama uygulanan diğer Ra değerleriyle benzer olduğu için numune kaplama yapılması için uygun bulunmuştur.

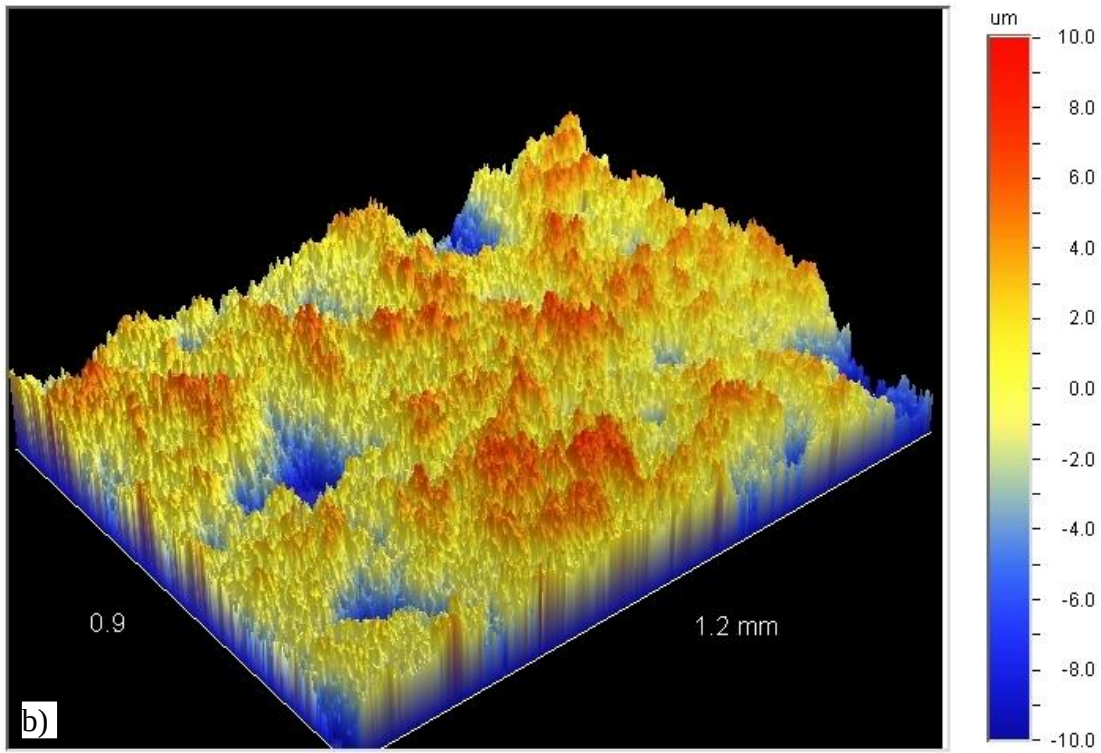
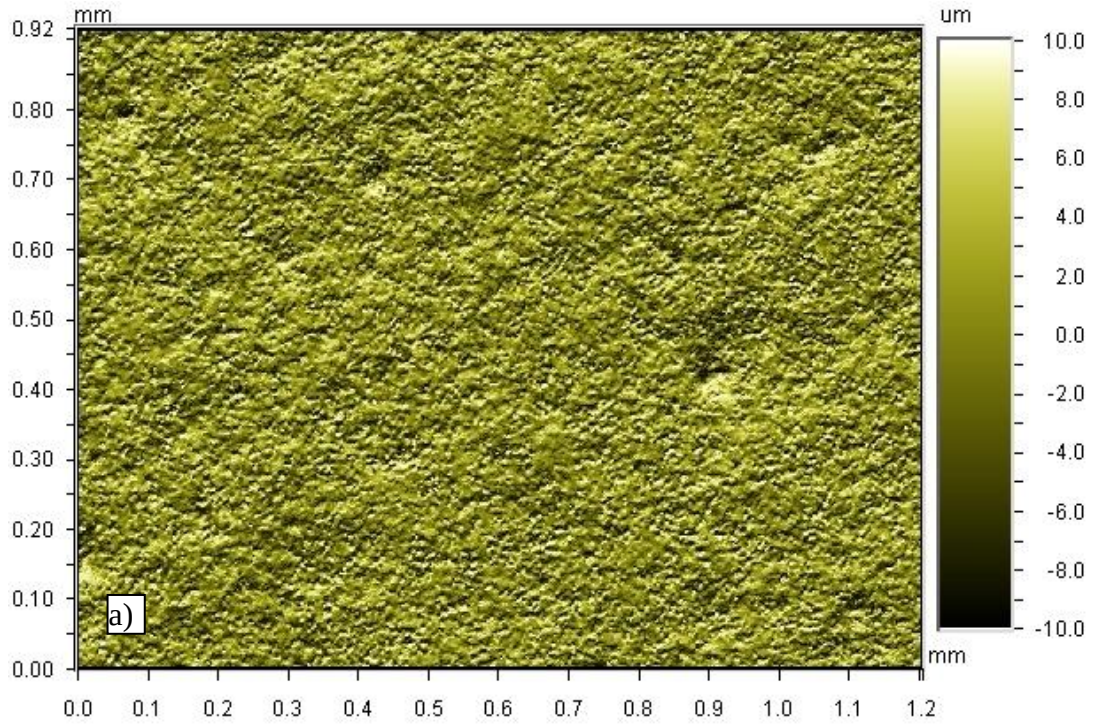
6.1.2. XRD Analizleri

Kaplama öncesi toz malzemelere ait XRD analizleri Şekil 6.3'te verilmiştir. XRD analizinden YSZ tozlarının tamamen YSZ, alümina tozlarının hepsinin ise kararlı α - Al_2O_3 (korundum) olduğu görülmüştür.

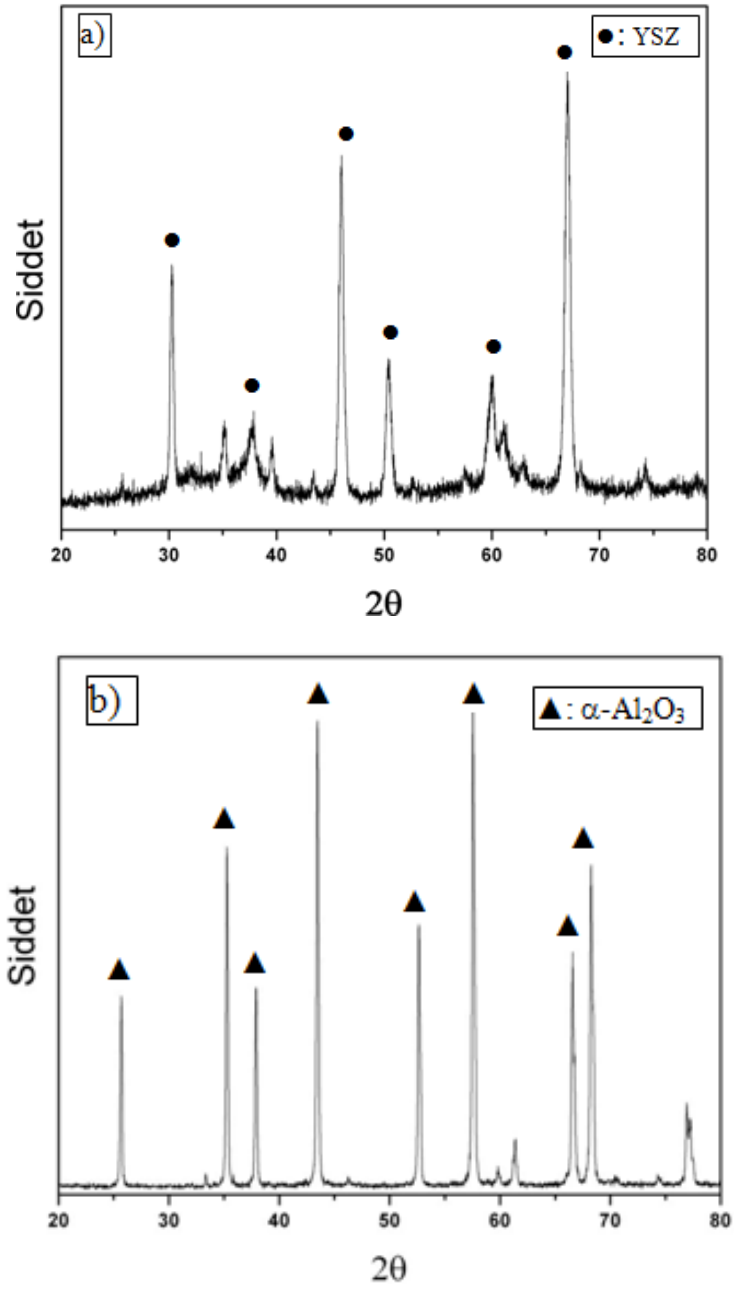
Korundum tanelerinin spinel kristalleri ile bağlanmış olup oksit empüritelerinden kaynaklanan az miktarda camsı faz içerdiği bilinmektedir [39]. Bu yüzden Al_2O_3 zırh seramiği üretimi için korundum taneleri yaygın olarak kullanılır.



Şekil 6.1: Kumlama öncesi alümina yüzeyinin a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu görüntüleri.



Şekil 6.2: Kumlama sonrası alümina yüzeyinin a) 2 boyutlu, b) 3 boyutlu görüntüsü.



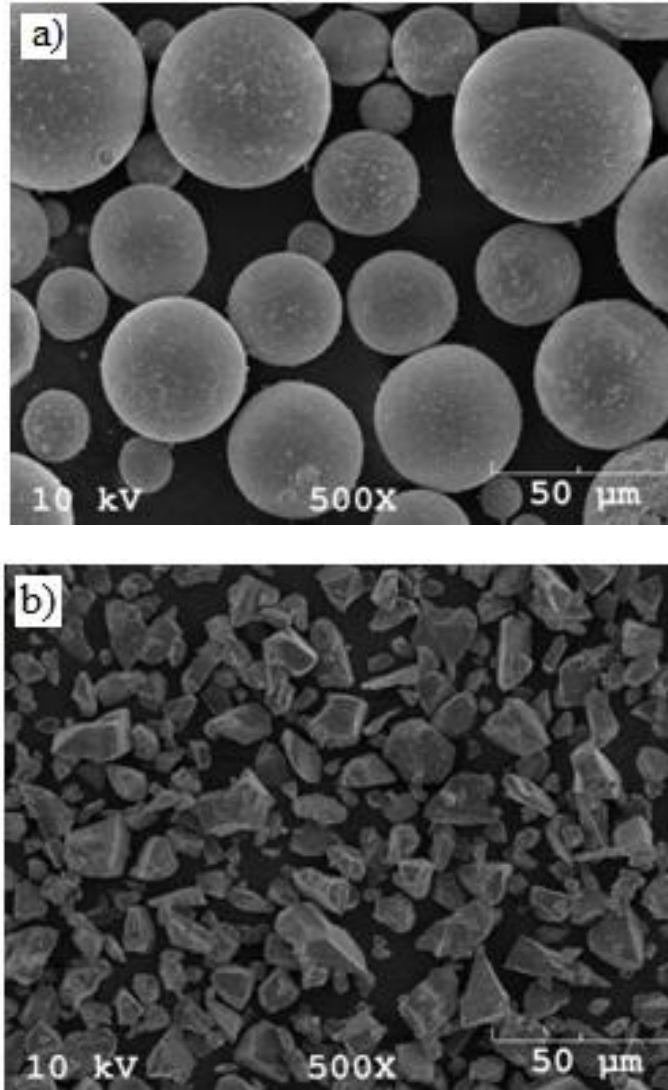
Şekil 6.3: Kaplamada kullanılan a) YSZ b) korundum toz malzemelerinin XRD analizi sonuçları.

6.1.2. Mikroyapı Analizleri

6.1.2.1. Kaplama Malzemelerinin Mikroyapı Analizi

Kaplama malzemelerinin karıştırılmadan önceki SEM görüntüleri Şekil 6.4'te verilmiştir. Kaplama toz malzemeleri seçilirken literatür çalışmasında da değinildiği gibi tek bir tane boyutuna bağlı kalmadan, belirli bir tane boyutu aralığı göz önünde bulundurularak seçim yapılmıştır.

YSZ taneleri arzu edildiği gibi küresel şekilli olup $-125+45\mu\text{m}$ tane boyutlarına sahiptir. Alümina taneleri ise açısall şekilli olup $-31+3,9\mu\text{m}$ tane boyutlarındadır.



Şekil 6.4: Kaplama malzemelerinin SEM görüntüleri a) YSZ b) Al_2O_3

Kaplama malzemesinin tanecik şekli, kaplamanın bir diğerr önemli parametresidir. Küresel şekilli taneciklerin ergimesi için düşük yüzey alanı ve yüksek yüzey enerjisine sahip olduklarından ötürü yüksek yüzey alanına sahip açılı tozlardan daha fazla enerji vermek gerekir. Bu yüzden TBC’lerde seramik kaplama malzemelerinin açılı, metalik kaplama malzemelerinin küresel olması istenmektedir [34]. Bu çalışmada da Şekil 6.4’te görüldüğü gibi açılı alümina kaplama malzemesine katkı malzemesi olarak küresel YSZ tozları ilave edilmiştir.

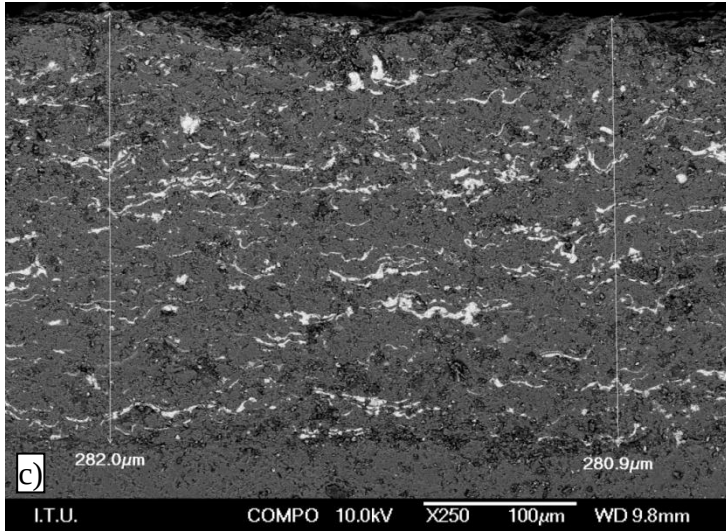
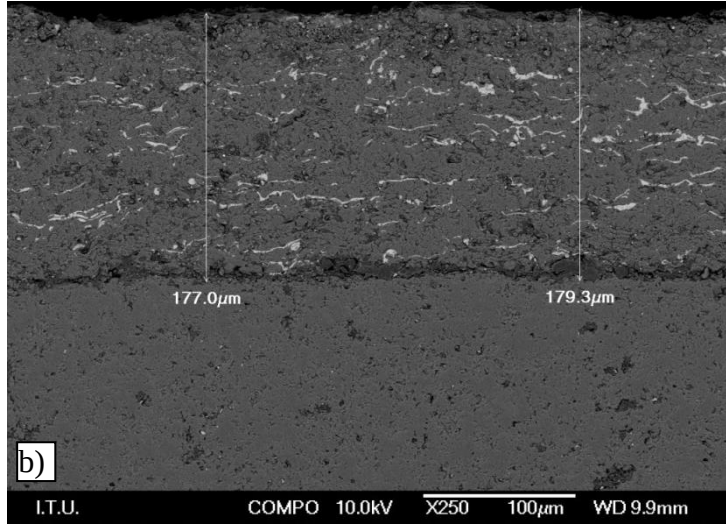
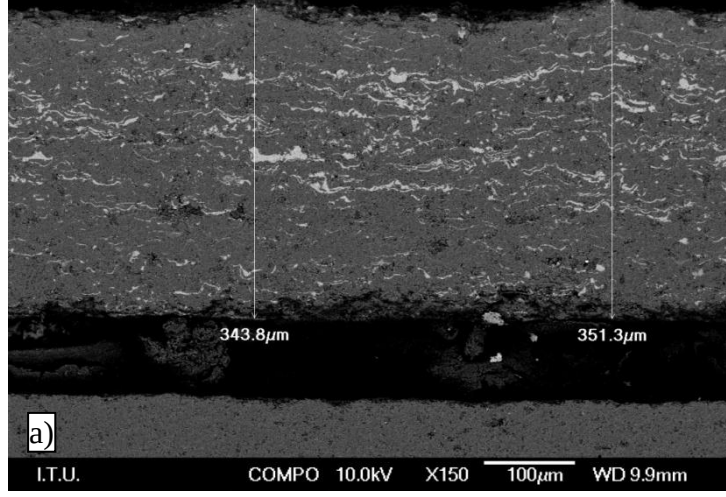
6.1.2.2. Kaplamaların Mikroyapı ve Elementel Analiz Sonuçları

348 µm ortalama kalınlığa sahip fonksiyonel kademeli kaplamanın SEM ile elde edilmiş mikroyapı görüntüsü Şekil 6.5 (a)'da, 178 µm ortalama kalınlığa sahip %10 ZrO₂ içeren kaplamanın SEM görüntüsü Şekil 6.5 (b)'de, 281 µm ortalama kalınlığa sahip %15 ZrO₂ içeren kaplamanın SEM görüntüsü Şekil 6.5 (c)'de verilmiştir. Hedeflenen kalınlık olan 400 µm'a sadece FK kaplamada ulaşılabilmesi, diğer kaplamalarda deneysel kısımda da değinilen toz malzemelerin plazma sprey cihazını tıkaması probleminden kaynaklanmaktadır. Şekil 6.5 (a)'da kaplamanın altlıktan ayrıldığı açıkça görülebilmektedir. Bütün FK kaplama numunelerinde görülen bu durumun nedeni olarak diğer deney setlerine kıyasla yüksek kaplama kalınlığı olarak düşünülebilir.

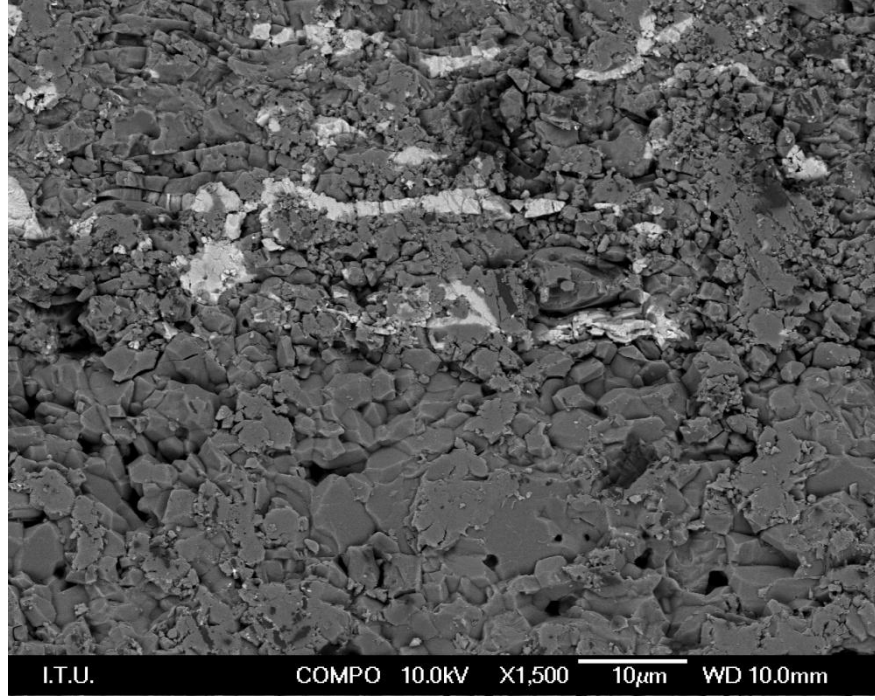
Kaplama yapısında bulunan YSZ kısmın beyaz olduğu göz önünde bulundurarak Şekil 6.5 (a), (b) ve (c)'deki kesit morfolojisine daha yakından bakıldığında kaplamalardaki malzeme içeriği hakkında kolayca yorum yapılabilir. Şekil 6.5 (a)'da üst kısımlarda beyaz renkle görülen YSZ kısmın, alt kısımlarda ise gri renkle görülen Al₂O₃ oranının daha fazla olduğu görülmektedir. Ancak fonksiyonel kademe geçişinin çok belirgin olmaması, yapının tek bir malzeme gibi davranacağı konusunda fikir verebilir. Şekil 6.5 (b)'de beyaz kısmın seyrek olup homojen dağılım göstermiştir. yoğun ve homojen olarak dağılmıştır. Şekil 6.5 (c)'de ise beyaz kısım yoğun ve homojen bir dağılım göstermektedir.

Şekil 6.6'da verilen kaplama görüntüsündeki porozite varlığı atmosferik plazma sprey uygulamasından kaynaklanmakta olup bu oran %10 civarındadır. Proses parametrelerinden toz besleme hızının (30g/dk) diğer çalışmalara [25,39] göre daha düşük (70g/dk civarında) olmasına rağmen kaplamanın diğer yapılardan daha yoğun görünmesi yüksek plazma gücünden (75-80 Volt) kaynaklanabilir.

Plazma ışın hızı gaz akış hızıyla doğru, nozül çapının karesi ile ters orantılıdır. Plazma ışın hızı ile taşıyıcı gaz akış hızı arasında, meydana gelen hidrostatik etkiler dolayısıyla etkileşim vardır. Taşıyıcı gaz hızının artışı, plazma sıcaklığı ve hızını düşürür. Plazma ışınındaki gibi yüksek hızlar, yüksek sıcaklıklarla birlikte ergime ve spreyleme için önceden belirlenmiş dolgu maddesi üzerine yüksek oranda ısı transferi sağlar.



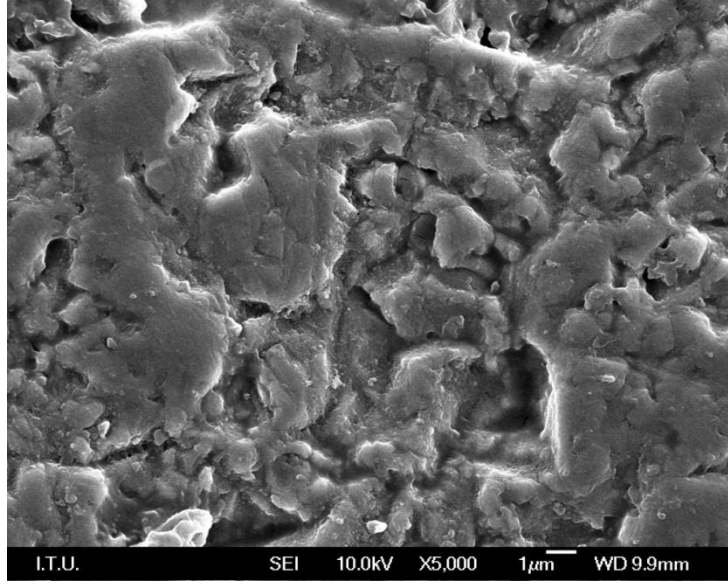
Şekil 6.5: a) Fonksiyonel kademeli kaplamanın SEM görüntüsü, b) %90Al₂O₃ + %10ZrO₂ kaplamanın SEM görüntüsü c) %85Al₂O₃ + %15ZrO₂ kaplamanın SEM görüntüsü.



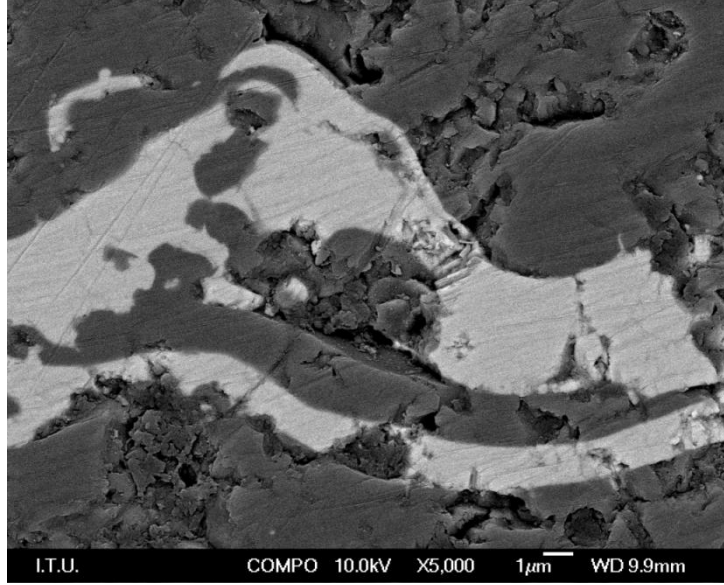
Şekil 6.6: Kaplama yapısındaki porozitelerin SEM görüntüsü.

Böylece ergimiş yüksek kinetik enerjiye sahip taneler katmanlar oluşturmak üzere altlık üzerine doğru uçar [23,44]. Şekil 6.7’deki splat yapısı incelenirken işlem sırasında başarılı ergime sağlandığı görülmektedir. SEM mikroyapıları incelenirken splatların morfolojisi üzerinde etkisi büyük olan bir diğer etken olan sprej basıncı da göz önünde bulundurulmalıdır. Sprej basıncı tanelerin çarpma hızını belirlemede önemli bir etkendir [49]. Sprej tabancası ile elde edilen laminar akış sayesinde ısının bütün tozlara dağıldığı, bunun sonucu olarak da bütün tozların plazma fazına geçerek splatlar halinde altlığa ve birbiri üzerine yapıştığı görülmektedir.

Liang ve arkadaşlarının [45] çalışmalarında tespit ettiği gibi YSZ oranının artışıyla porozite oranının azaldığı gözlenmektedir. Bu durum Şekil 6.8’de de açıkça görülmektedir. Bunun nedeni YSZ’nin Al_2O_3 ’ten daha iyi ergiyerek daha fazla kontak yüzeyi oluşturmasıdır. Bu durum, kimi malzemelerle oluşturulan kombinasyonlarda sertlik artışı ile sonuçlansa da bu çalışmada Al_2O_3 sertliğe daha fazla olumlu katkıda bulunduğu için sadece porozite miktarı ve kırılma tokluğu ile ilişkilendirilmektedir.



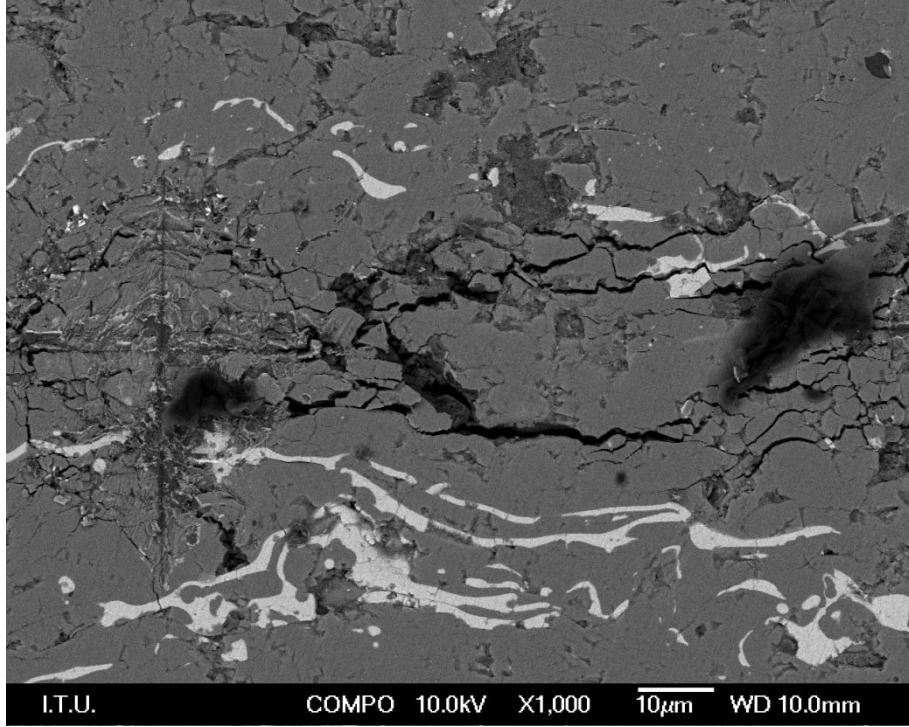
Şekil 6.7: Kaplamada görülen splat yapısı.



Şekil 6.8: Kaplamadaki YSZ ve Al₂O₃ yapısı.

Plazma sprey kaplama parametrelerinden akım, Tekmen ve arkadaşlarının çalışmasındaki gibi 500 A olarak belirlenmiştir. Katılaşma oranında çarpan partikül sıcaklığının altlık sıcaklığından daha etkin olduğunu belirten çalışmada görülen düzgün splat formu ile Şekil 6.9’da görülen splat formunun benzerliği partikül sıcaklığının yeterli olduğu sonucuna ulaşılmasını sağlamaktadır. Zira söz konusu çalışmadaki gibi bu çalışmada da altlık, kaplama öncesi ısıtma işlemine tabi tutulmamıştır [47].

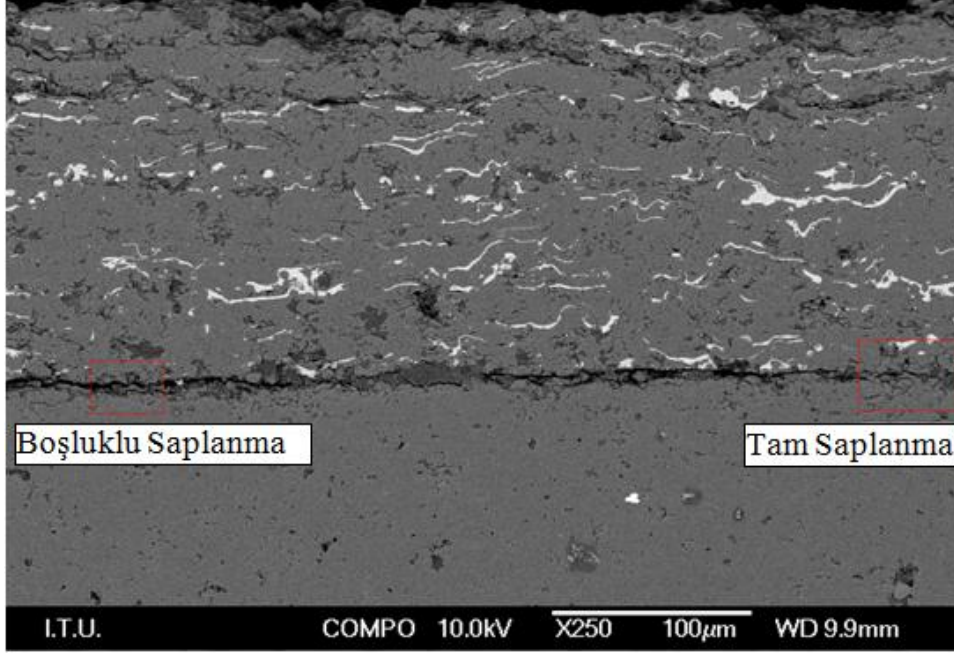
Mikroçatlaklar büyük çatlaklardan farklı olarak tane sınırları veya taneler boyunca gerçekleşir [50]. Bu durum Şekil 6.9'daki gibi indentasyon sonrası oluşan çatlaklarda açıkça gözlenebilmektedir.



Şekil 6.9: İndentasyon sonrası oluşan mikroçatlak yapısı.

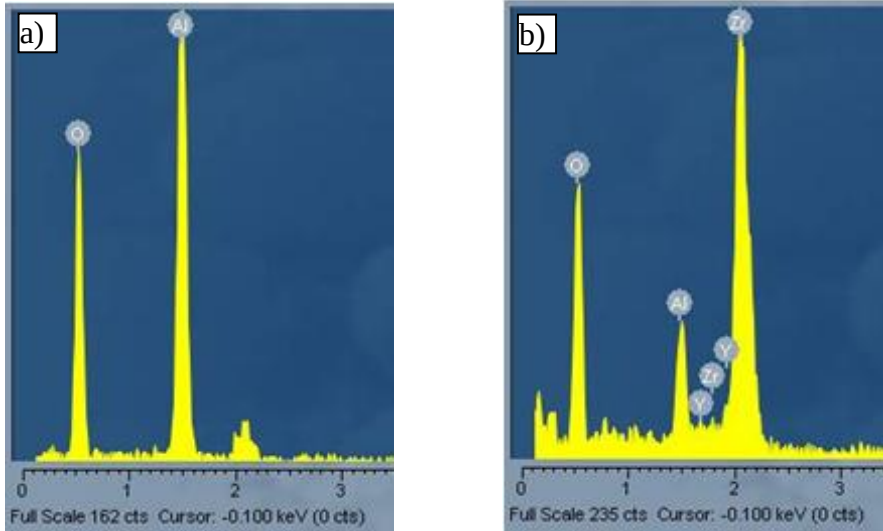
Literatür çalışmasında önerildiği gibi altlık ile kaplamanın yapışma kalitesi taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir. Kesitlerde arayüzeyle bakılacak olursa kumlama ile pürüzlendirilmiş substrat yüzeyi ile kaplama arasında literatürde anlatılan bağlanma mekanizmalarından mekanik kilitlenme olduğu görülmektedir. Bu da kaplama ile substrat arasında mekanik bağ kurulduğu anlamına gelmektedir. Kaplama ile substrat arasındaki düşük bağ mukavemetinin nedeninin bu durum olduğu düşünülmektedir. Şekil 3.14'te gösterilen yüzey çıkıntıları, kaplamanın tam ve boşluklu saplandığı kısımlar tespit edilip Şekil 6.10'da gösterilmiştir.

Kaplamanın genelinde metalurjik veya kimyasal bağ olmaksızın mekanik boşluklu saplanmanın yaygın olması, kaplamanın altlığa yapışma mukavemetinin düşük olduğunun en önemli göstergesidir.



Şekil 6.10: Kaplamadaki tam ve boşluklu saplanmaların tespiti.

Kaplamaların elementel analiz sonuçları Şekil 6.11’de belirtildiği gibidir. Şekil 6.11 (a)’da kaplama yapısındaki gri kısmın tamamının Al_2O_3 ’ten oluştuğu görülmektedir. Şekil 6.11 (b)’de ise beyaz kısmın O, Y, Zr ve Al elementlerinden oluştuğu görülmekte, buradan da beyaz kısmın bir miktar Al_2O_3 içermekle birlikte YSZ’den oluştuğu anlaşılmaktadır.



Şekil 6.11: a) Kaplama içerisindeki gri, b) beyaz kısmın elementel analizi.

SEM fotoğraflarında görülen düzgün splat şekilleri ve homojen porozite dağılımı ile kaplama istenen kaliteye sahiptir. Kaplamanın kalitesinin sistemde kullanılan güç ile

doğrudan ilişkili olduğu göz önünde bulundurulduğunda bu kaplama prosesi için tasarlanan güç değerinin uygun değer olduğu anlaşılmaktadır.

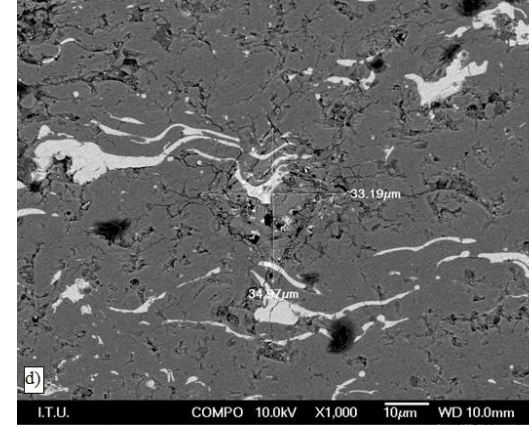
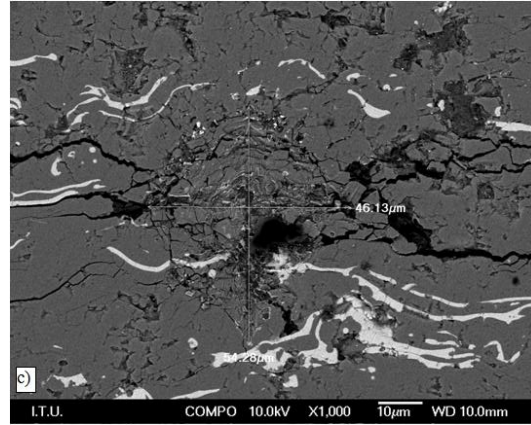
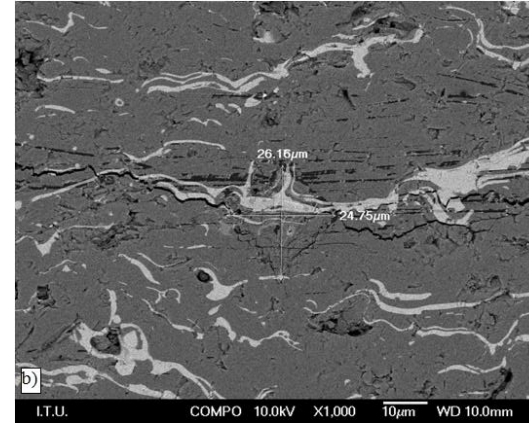
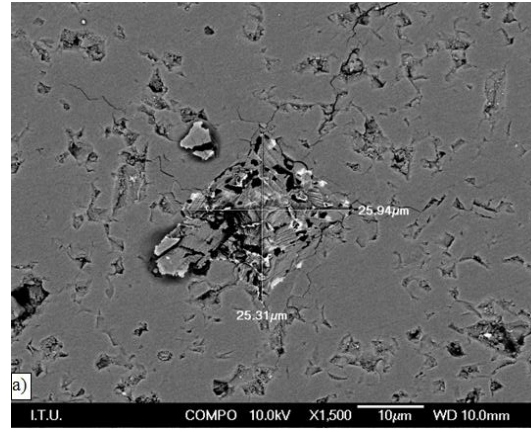
6.1.3. Mekanik Özelliklerin Karakterizasyonu

Malzemenin sertliği kristal yapılar ve atomlar arası bağ mukavemetiyle ilgilidir. Bağ kuvveti arttıkça sertlik de artar. Seramik malzemede oluşan kırılma ve çatlak ilerlemesi malzeme yapısındaki camsı faz yoğunluğuyla artar. Çalışmada YSZ ve alümina toz malzemeleri karıştırıldıklarında dönüşümlü toklaşma mekanizması ile “Kısmi Stabilize Zirkonya” (PSZ) ortaya çıkar.

Kompozit halinde bulunan Al_2O_3 ve PSZ’nin camsı fazı yoktur. Zirkonya taneleri korundum taneleri arasına muntazam bir şekilde dağılır. Lin ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [44] taneler arasında bulunan zirkonyanın sinterleme esnasında korundum tane büyümesini engellediği gözlemlenmiştir. Bu sayede malzemenin HEL ve kırılma tokluğu artar.

Zirkonya ilavesi miktarının alüminanın sertliğine etkisi konusunda iki farklı yaklaşım vardır. Liang ve arkadaşları [45], kaplamadaki zirkonya oranının artmasıyla porozite miktarının azaldığını, böylelikle mikrosertlikte artış meydana geldiğini savunurken De Aza ve arkadaşları [46], kaplamadaki zirkonya oranı artışının, alüminaya kıyasla düşük sertlikli malzeme oranının artması anlamına geldiğini, bu yüzden de sertlikte düşüş meydana geleceğini savunmaktadır.

Kaplamanın ve altlık plakanın sertliğinin ölçümü için indentasyon esnasında Al_2O_3 altlığa 1000g, kaplamalara 300g yük uygulanmıştır. Şekil 6.12’de numunelerde indentasyon sonrası elde edilen izler ve çatlak ilerlemeleri görülmektedir. Şekil 6.12 a Al_2O_3 altlık üzerindeki, Şekil 6.12 (b) %90 Al_2O_3 + %10 ZrO_2 kaplamadaki, Şekil 6.12 (c) %85 Al_2O_3 + %15 ZrO_2 kaplamadaki, Şekil 6.12 (d) fonksiyonel kademeli kaplamadaki indentasyon izlerini göstermektedir.



Şekil 6.12: a) Al_2O_3 plakada, b) %90 Al_2O_3 + %10 ZrO_2 kaplamada, c) Fonksiyonel kademeli kaplamada, d) %85 Al_2O_3 + %15 ZrO_2 kaplamada sertlik ölçümleri için oluşturulan indentasyon izlerinin SEM görüntüleri

Şekil 6.12’de sadece birer tanesi verilen indentasyon izlerinden, her deney setinden alınan bir kaplama numunesi üzerinde 5’er tane oluşturulmuştur, sertlik değerleri Vickers cinsinden elde edilmiştir. %99,9 safiyetteki zırlama amaçlı kullanılan Al_2O_3 plakanın sertlik değeri 1445 ± 5 Vickers ile tahmin edildiği gibi bu çalışmadaki en yüksek sertlik değeridir. %90 Al_2O_3 +%10 ZrO_2 içeren kaplamadaki sertlik değeri 836 ± 5 olarak ölçülmüş, bu değer ağırlıkça %5’lik YSZ katkısı ile %6,3’lük azalma göstererek 783 ± 5 ’e düşmüştür. Elde edilen bu değerler, De Aza ve arkadaşlarının çalışmasını [46] destekler niteliktedir. Fonksiyonel kademeli kaplama (FKK) üzerinde ölçülen sertlik değerinin diğer iki kaplamanın sahip olduğu sertlik değerlerinin arasında bir değere sahip olmasının dengeli kaplama kalınlığından kaynaklandığı düşünülebilir. Çünkü bütün ölçümler kaplama doğrultusunda alınan kesitler üzerinde yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarında elde edilen değerler Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1: Al_2O_3 plaka, %90 Al_2O_3 +%10 ZrO_2 kaplama, %85 Al_2O_3 +%15 ZrO_2 kaplama ve fonksiyonel kademeli kaplama için sertlik ölçümü sonuçları (HV).

Malzeme	Sertlik Değeri (HV)
Al_2O_3 Plaka	1445 ± 5
%90 Al_2O_3 +%10 ZrO_2 Kaplama	836 ± 5
%85 Al_2O_3 +%15 ZrO_2 Kaplama	783 ± 5
Fonksiyonel Kademeli Kaplama	824 ± 5

Literatür çalışmasında da değinildiği gibi altlığa çarpan her damlacığın altlık veya kendisinden önce çarpan damlacığın oluşturduğu katman üzerine yapışmaması, bazılarının ergimeden yapışma yüzeyden sekmesinden ötürü kaplamada hatalar, boşluklar, malzeme kayıpları görülmekte olup bu durum, kaplama malzemesinin mekanik özelliklerinin, malzemenin orjinal halinden daha düşük çıkmasına neden olmaktadır. Söz konusu durum sertlik ölçümü sonuçları ile de desteklenmektedir.

Kaplama işlemi için kullanılan toz malzemelerden YSZ’nin tane boyutu dağılımının -125+45 μm , alüminanın ise -31+3,9 μm olduğu çalışmanın literatür kısmında verilmiştir. Çizelge 6.1’deki sertlik değerleri bu toz malzemelerle elde edilmiştir. Ding ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [40] %90 Al_2O_3 + %10 ZrO_2 ile elde edilen kaplamada aynı sertlik değerine ulaşıldığı görülmüştür. Söz konusu çalışmada kullanılan toz boyutunun 200nm olduğu göz önünde bulundurulduğunda bu

çalışmada kullanılan plazma sprey parametrelerinin sert kaplama elde etmek adına daha etkin olduğu görüşü ortaya çıkmaktadır.

Seramik malzemelere uygulanan her darbeye heterojen yapıları nedeniyle düzensiz çatlaklar oluşmaktadır. Bu çatlaklar her darbeye farklı yapılırlar. Bu yüzden seramik malzemeye her indentasyon uygulamasında farklı kırılma yapısı gözlenebilir. Kırılma tokluğu ölçümü bu doğrultuda global bir anlam ifade etmez, ancak malzeme özelliklerinin birbiriyle kıyaslanması bakımından kullanılabilir. Kırılma tokluğu değerlerinin literatürdeki değerler ile farklılık göstermesinin hem kaplama parametrelerinin özgünlüğünden hem de kırılma tokluğu ölçümündeki elastisite modülünün yaklaşık olarak hesaplanmasından kaynaklandığı da düşünülmektedir.

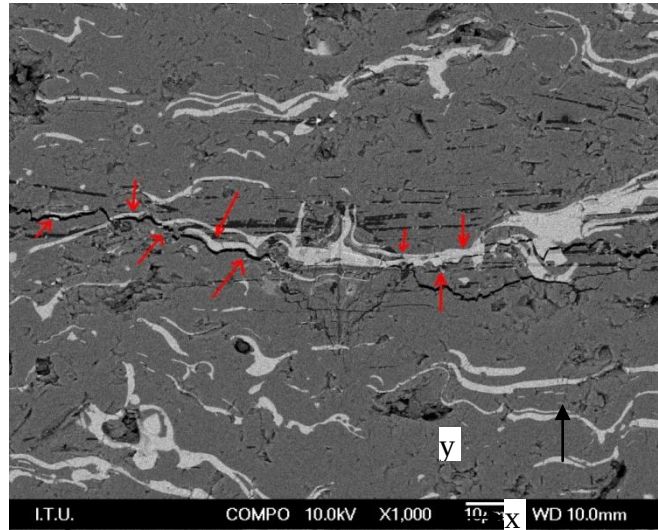
Kırılma tokluğu ölçümü için Lima ve arkadaşlarının [38] yaptığı çalışmadan yararlanılmış, K_{Ic} değerine ulaşmak için kullanılan denklemler bu çalışmadan alınmıştır. Hesaplamalar sonucunda YSZ ilavesinin kırılma tokluğunu arttırmak adına olumlu sonuç verdiği görülmüştür. %10 YSZ içeren kaplamanın kırılma tokluğu değeri $4,08 \pm 0,05$ iken ağırlıkça %5'lik YSZ artışı kaplamanın kırılma tokluğunu %4,7 arttırarak $4,27 \pm 0,05$ değerine ulaştırmıştır. Kırılgan yapıdaki Al_2O_3 plakanın kırılma tokluğu değeri ise $3,76 \pm 0,05$ bulunmuştur. Bu değerler Çizelge 6.2'de verilmektedir.

Çizelge 6.2: Al_2O_3 plaka, %90 Al_2O_3 +%10 ZrO_2 kaplama, %85 Al_2O_3 +%15 ZrO_2 kaplama ve fonksiyonel kademeli kaplama için kırılma tokluğu ölçümü sonuçları K_{Ic} (MPa.m^{1/2}).

Malzeme	Kırılma Tokluğu Değeri (MPa.m ^{1/2})
Al_2O_3 Plaka	$3,76 \pm 0,05$
%90 Al_2O_3 +%10 ZrO_2 Kaplama	$4,08 \pm 0,05$
%85 Al_2O_3 +%15 ZrO_2 Kaplama	$4,27 \pm 0,05$
Fonksiyonel Kademeli Kaplama	$4,13 \pm 0,05$

Şekil 6.12'de bulunan tüm resimlerde beyaz kısımlar YSZ, gri kısımlar ise Al_2O_3 'den oluştuğu bölüm 6.1.3.2'de belirtilmiştir. Bütün indentasyon izleri göz önünde bulundurulduğunda çatlak ilerlemelerinde dikkat çekici iki nokta vardır:

1. Çatlak boyları x eksenine boyunca uzun, y eksenine boyunca daha kısadır. Durumun nedeninin altlık üzerindeki splat formundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Çatlakların büyük kısmının Şekil 3.12’de F_x ile gösterilen parçacık kaynaklanmalarının meydana geldiği yüzey boyunca gerçekleştiği sonucuna varılabilir.
2. Şekil 6.13’te çatlak ilerlemeleri yakından incelendiğinde indentasyon çatlaklarının büyük bölümünün ilerlemek için tok YSZ yapısını deformetmektense, kırılmalı Al_2O_3 yapısı içerinden ve YSZ sınırı boyunca ilerlediği net olarak görülmektedir. YSZ katkısının Al_2O_3 ’ün kırılma tokluğunu geliştirmek adına olumlu etki yaptığı bu durumla da desteklenmektedir.



Şekil 6.13: Kaplama yapısında YSZ boyunca çatlak ilerlemesi

6.1.4. Balistik Testlerin Sonuçları

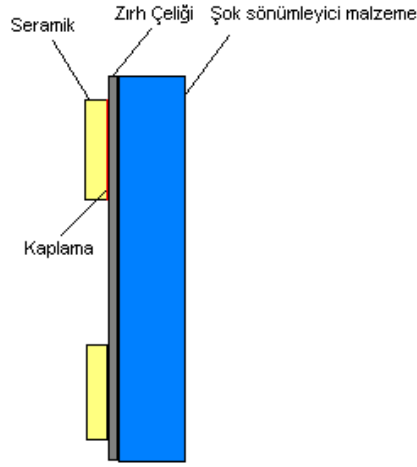
Yapılan kaplamaların amacına uygun bir şekilde hizmet edip etmediğini görmek için balistik testler tasarlanmıştır. Tasarımlar Çizelge 6.3’deki sıralamayla yapılmıştır.

Balistik test STANAG Seviye 3 mühimmatı 7.62x54R B32 API ile 30m mesafeden standarda uygun yapılmıştır [52].

Çizelge 6.3: Balistik test tasarımları.

Tasarım	İçerik
1. Deney Seti	%90 Al_2O_3 + %10 ZrO_2
2. Deney Seti	%85 Al_2O_3 + %15 ZrO_2
3. Deney Seti	Fonksiyonel Kademeli

1. deney numunesi için hazırlanan ilk zırh kompozisyonu Şekil 6.12’de gösterilmiştir.

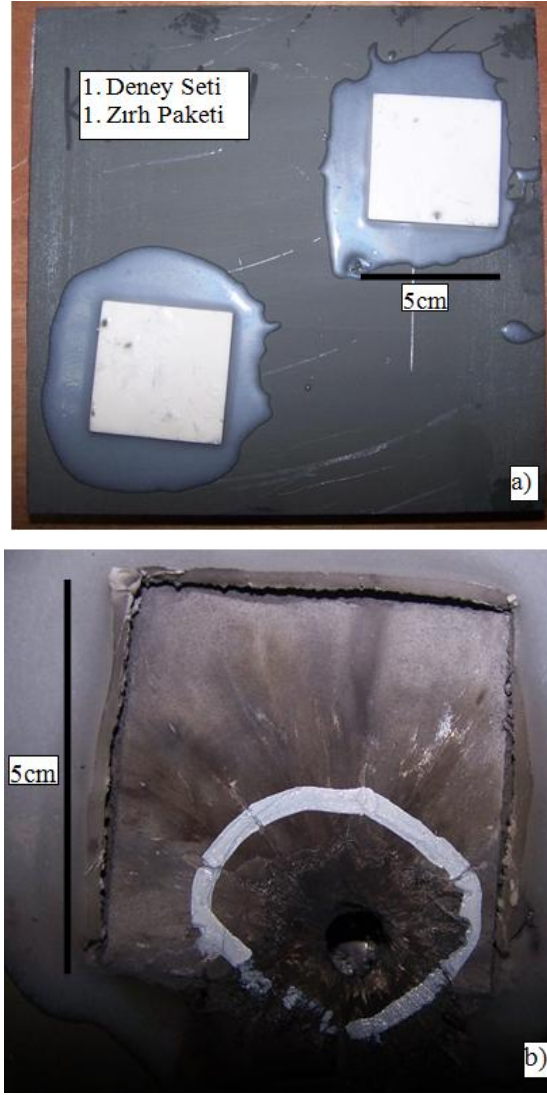


Şekil 6.14: 1. Deney seti, 1. Balistik test numunesi gösterimi.

Kaplama yapılmış seramik altlık çelik üzerine yapıştırılmış, çeliğe destek olması ve diğer deney numuneleriyle parametrelerin aynı olması bakımından arkaya şok sönümleyici malzeme konulmuştur. 2. seramik kaplamanın etkisini görmek amaçlı kaplama yapılmamış bir numunedir.

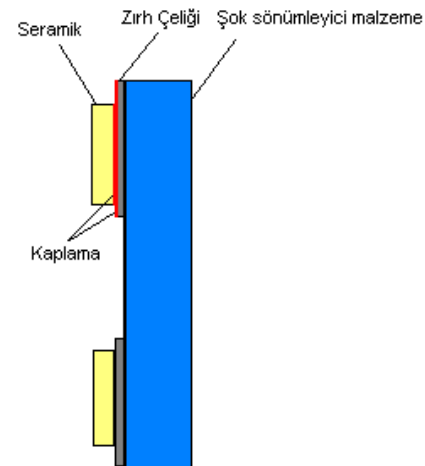
Atış sonucunda hedefte tam penetrasyon gerçekleşmemiştir. Zırh kompozisyonunun atış öncesi ve sonrası fotoğrafları Şekil 6.15’te gösterilmiştir.

Şekil 6.15 (b)’de seramiğin parçalanıp dağılmış olduğu, ancak seramik altlığından ayrılan kaplamanın yapıştırıcı etkisiyle çelik üzerinde bütün halde kaldığı görülmektedir. Çatlak dağılımı incelendiğinde standart bir seramik malzemeye kıyasla çatlakların düzenli ve bölgesel kaldığı görülmüştür. 2. seramik ilk atışın etkisiyle parçalandığı için test edilememiştir.



Şekil 6.15: 1. Balistik test numunelerinin atış öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri.

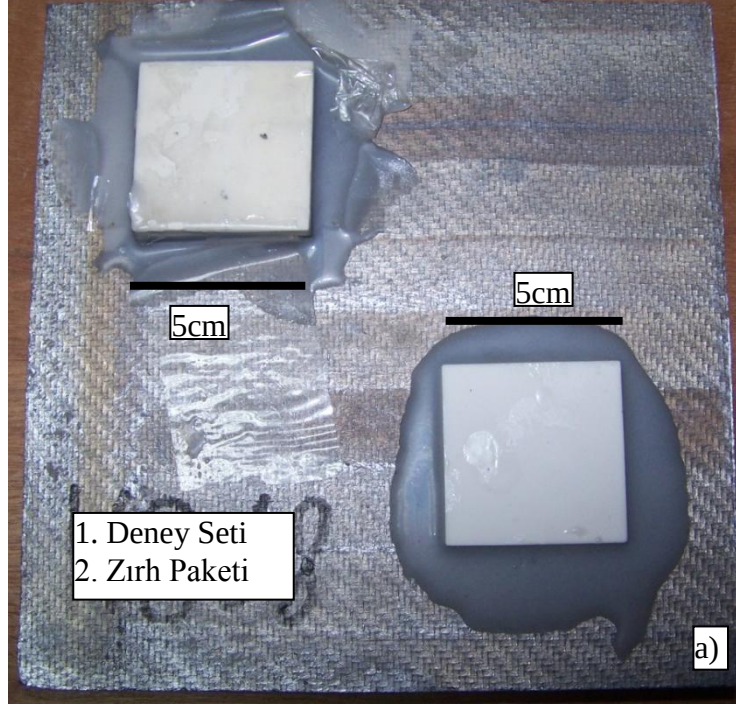
1. deney numunesi için hazırlanan ikinci zırh kompozisyonunu Şekil 6.16'daki gibidir.



Şekil 6.16: 1. Deney seti 2. Balistik test numunesi gösterimi.

Burada seramik ve zırh çeliği altlığın kaplama yapılmış yüzeyleri birbiri üzerine gelecek şekilde yapıştırılmış, zırh çeliği şok sönümleyici malzeme ile desteklenmiştir.

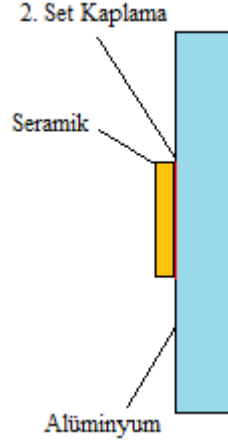
Atış sonucunda hedefte tam penetrasyon gerçekleşmemiştir. 2. zırh kompozisyonunun atış öncesi ve sonrası fotoğrafları Şekil 6.17’de gösterilmiştir.



Şekil 6.17: 2. Balistik test numunelerinin atış öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüsü.

Şekil 6.17 (b)'de seramiğin kaplamayı bırakarak parçalandığı, birbirine yapışmış iki kaplamanın çelik üzerinde kaldığı görülmektedir. Ayrıca bölgesel hasar ve uzamayan çatlaklar da dikkat çekicidir.

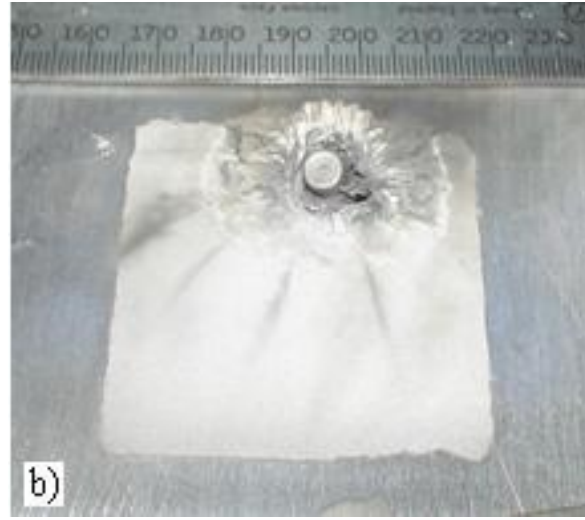
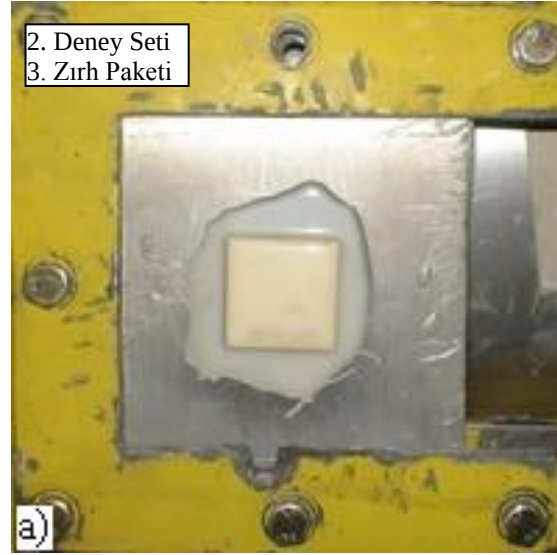
2. deney seti için hazırlanan 1. zırh kompozisyonu Şekil 6.18'de gösterilmiştir.



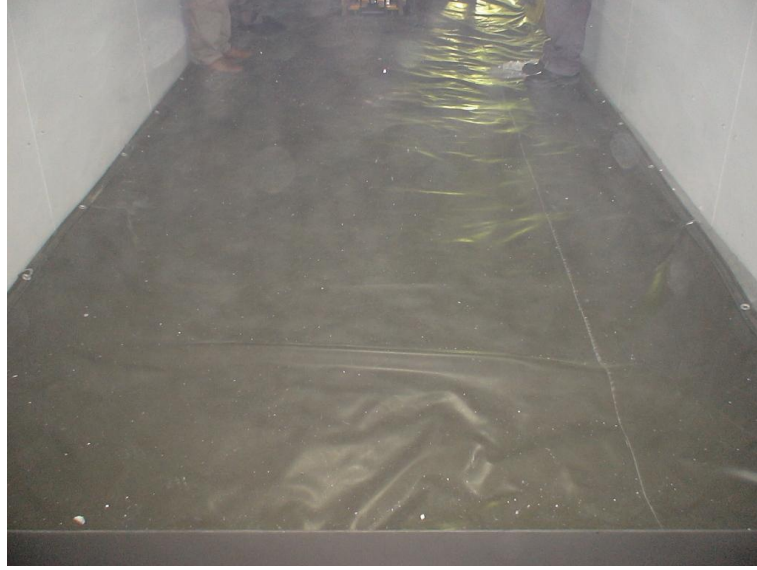
Şekil 6.18: 2. Deney seti 1. Balistik test numunesi gösterimi.

Burada 2. Set kaplama numunelerinden biri, zırh uygulamalarında yoğun olarak kullanılan 5083 serisi alüminyum üzerine yapıştırılmıştır. Burada amaç kaplamanın penetrasyon derinliğine etkisini ve kaplama sonrasında etrafa saçılan seramik parçacık miktarını karşılaştırmaktır. Kaplama öncesi ve sonrası numune resimleri Şekil 6.19'da gösterilmiştir.

Şekil 6.19 (b)'de de görüldüğü gibi hedefte tam penetrasyon gerçekleşmemiştir. Seramikte Hertzian çatlakları gözlenmiş, parçalanan seramiğin bir kısmı etrafa saçılmış, bir kısmı ise yapıştırıcının etkisiyle bir arada kalmıştır (Şekil 6.19 c). Kısmi penetrasyon sonucunda alüminyumun arka kısmında yaklaşık 3 mm kadar bir çıkıntı söz konusudur. Etrafa saçılan seramiklerin görüntüsü Şekil 6.20'de verilmiştir.

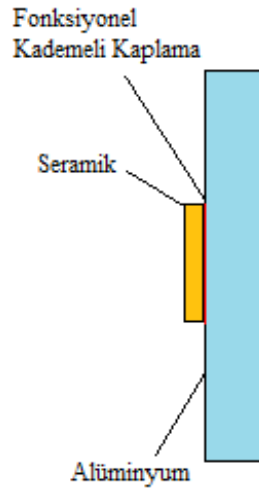


Şekil 6.19: 3. Balistik test numunelerinin atış öncesi (a) ve sonrası (b, c) görüntüleri.



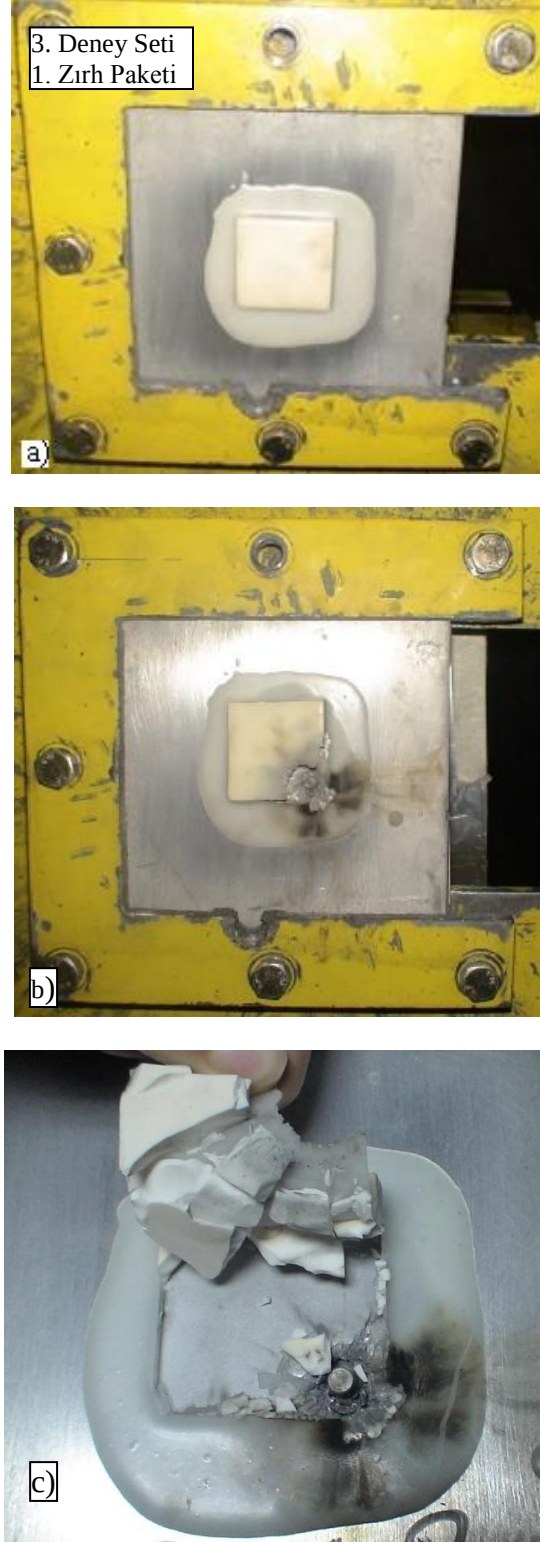
Şekil 6.20: 3. Balistik test sonunda etrafa saçılan seramik parçalarının görüntüsü.

3. deney seti için hazırlanan 1. zırh kompozisyonu Şekil 6.21’de gösterilmiştir.



Şekil 6.21: 3. Deney seti 1. Balistik test numunesi gösterimi.

Burada 3. Set kaplama numunelerinden biri, yine 5083 alüminyum numunesi üzerine penetrasyon derinliği ve saçılan seramik parçaları miktarının gözlenmesi için yapıştırılmıştır. Kaplama öncesi ve sonrası balistik numune görüntüleri Şekil 6.22’de gösterilmektedir.



Şekil 6.22: 3. Balistik test numunelerinin atış öncesi (a) ve sonrası (b, c) görüntüleri.

Hedefte yine tam penetrasyon gerçekleşmemiş olup alüminyumun arkasında yaklaşık 2 mm'lik çıkıntı oluşmuştur. Etrafa saçılan seramiklerin görüntüsü Şekil 6.23'te verilmiştir.



Şekil 6.23: 4. Balistik test sonunda etrafa saçılan seramik parçalarının görüntüsü.

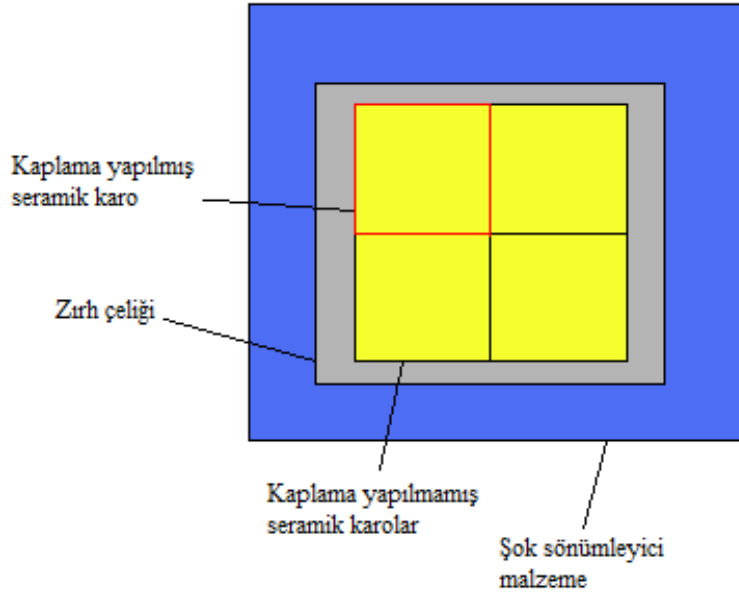
Parçacık saçılma oranının kaplama uygulaması yapılmayan bir numuneye nazaran daha düşük olması dikkat çekicidir. Parçacık saçılımının absorblanmayan enerjiden kaynaklandığı göz önünde bulundurulursa [51] bu durum, kaplamalı numunelerde enerji absorpsiyonunun daha fazla olduğunu göstermektedir.

Kaplama yapılmaksızın aynı özellikteki seramikle yapılan test Şekil 6.24'te görülmektedir. Bu numunede penetrasyon derinliği 6 mm olarak ölçülmüştür.

Penetrasyon derinlikleri göz önünde bulundurulduğunda kaplama varlığının etkin olduğu açıktır. Ancak kaplamada bulunan YSZ oranları değişiminin önemli bir etkisi görülmemektedir. Sertlik ölçümleri sonrasında yapılan hesaplar doğrultusunda kırılma tokluğu daha yüksek olan 2. Deney seti numunelerinden biri alınıp çoklu atışa dayanımın gözlenmesi için kaplama yapılmamış aynı kalınlık ve kalitede seramiklerle Şekil 6.25'te de şekilsel olarak gösterilen bir yapı oluşturulmuştur.



Şekil 6.24: Kaplama yapılmamış seramik numune ile hazırlanan paketin atış sonrası görünümü.



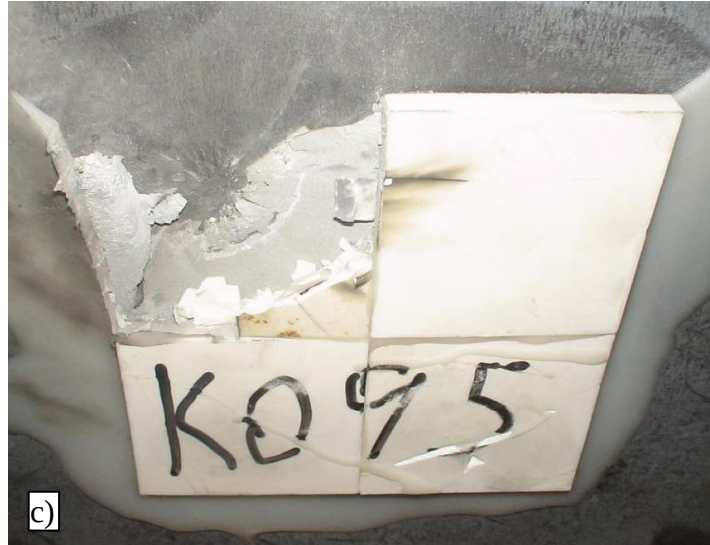
Şekil 6.25: 2. Deney seti 3. Balistik test numunesi gösterimi.

Burada ayrıca 1. Deney seti 1. Test numunesi ile penetrasyon derinliği etkisini test etme imkanı bulunmaktadır. Hazırlanan test numunesinin atış öncesi ve sonrası fotoğrafları Şekil 6.26’da görüldüğü gibidir.

Bu kompozisyonadaki kaplamanın etkisini daha net gözlemlemek için kaplama yapılmamış bir kompozisyonda komşu karolardaki çatlak ilerlemeleri incelenebilir. Şekil 6.27 (c)’den sadece bir komşu seramikte enlemesine bir çatlak meydana geldiği görülmekte olup diğer seramiklerde herhangi bir hasar tespit edilmemiştir.



Şekil 6.26: 3. Balistik test numunelerinin (a) atış öncesi ve (b) sonrası görüntüleri



Şekil 6.27: 3. Balistik test numunelerinin atış sonrası (c) görüntüsü

Atış sonrasında etrafa saçılan seramik miktarı Şekil 6.28’de görüldüğü gibi oldukça yüksektir.



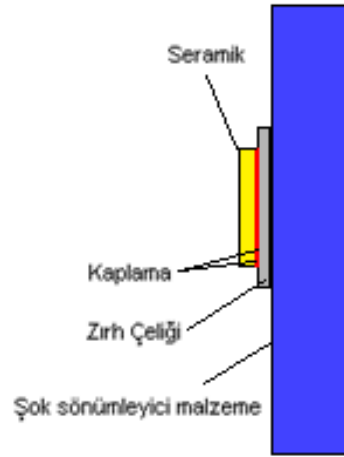
Şekil 6.28: 5. Balistik test sonunda etrafa saçılan seramik parçalarının görüntüsü

Kaplama yapılmamış seramik üzerine atış yapıldığında çatlak ilerlemesi Şekil 6.29’daki gibi görülmektedir.



Şekil 6.29: Kaplama yapılmamış seramikte balistik test sonrası meydana gelen çatlak ilerlemesi görünümü

Bir diğer testte ise 3. Deney setinden bir numune 3. balistik testteki reçete ile hazırlanmıştır. Şekilsel gösterim Şekil 6.30’daki gibidir.



Şekil 6.30: 3. Deney seti 3. Balistik test numunesi

Burada, üzerine fonksiyonel kademeli kaplama uygulanmış zırh çeliği ve seramik plaka ilk numunede olduğu gibi kaplamalar üst üste gelecek şekilde yapıştırılmıştır. Oluşturulan yapı da balistik testinin gerçekleştirilmesi için şok sönümleyici malzemenin üzerine yapıştırılmıştır.

Kaplama kalınlığının balistik anlamda etkisinin incelendiği bu testten atış sonrası elde edilen görüntüler Şekil 6.31’de gösterilmiştir. Görüntülerden, mühimmatın yüksek gücü dolayısıyla zırh çeliğinin şok sönümleyici malzemenin içine bir parça gömüldüğü görülmektedir. Kaplama, diğer numunelerde olduğu gibi çelik plakanın üzerinde kalmamış, yapıştırıcı etkisiyle üst yapıya geçerek atış sonrasında Şekil 6.32’deki parçacıklarla birlikte etrafa saçılmıştır. Bu durumun kaplama kalınlığı ile açıklanabilir. Fonksiyonel kademeli kaplamanın diğer kaplamalardan daha kalın olduğu önceki bölümlerde belirtilmiştir. Buradaki kontrolsüz saçılmanın, kaplamanın yüksek kalınlık nedeniyle sahip olduğu düşük yapışma mukavemetinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Ayrıca bu testin sonucu 1. Deney seti ile yapılan ilk balistik testin sonucuyla kıyaslandığında ilk testte çelik plakanın alüminyum köpük içine daha çok gömüldüğü fotoğraflardan da görülmektedir. Bu durumun bir açıklaması kalın kaplamanın neden olduğu düşük yapışma mukavemetidir. Diğer bir açıklama olarak da kalın kaplamanın balistik dayanımı olumsuz etkilediği düşünülmektedir.



Şekil 6.31: 6. Balistik test numunelerinin atış öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri



Şekil 6.32: 6. Balistik test sonunda etrafa saçılan seramik parçalarının görüntüsü

Seramiklerde balistik test esnasında kırılma aşağıdaki aşamalarla meydana gelmektedir:

- Penetratörün hidrodinamik akışıyla seramiğe anlık darbesi
- Penetratörün parçalanması ve hidrodinamik akışın devam etmesi, bu esnada parçacıkların yüksek hızla saçılması
- Seramiğin kırılması, ön tarafta hertzian konik çatlak oluşurken arka yüzde çekme çatlaklarının oluşumu, penetratörün akış ile birlikte parçalanmaya devam etmesi
- Penetratörün erozyonu ve seramik kırılmasının geniş bir yüzeye yayılması [52]

Seramiklerin balistik test sonucu kırılması ile etrafa saçılan parçalar farklılık gösterir. Alümina seramiklerde büyük parçacık saçılmaları görülür [50]. Şekil 6.21, 6.25 ve 6.29'da etrafa saçılan bu kalın parçacıklar bu durumu desteklemektedir. Diğer seramiklerin davranışları göz önünde bulundurulduğunda, örneğin B_4C veya SiC 'de saçılma patlamalı gerçekleşmektedir. Bu da saçılmanın büyük parçacıklardan ziyade küçük toz zerrecikleri şeklinde gerçekleşmesine neden olur [2]. Büyük çatlaklar camsı faz boyunca gerçekleşir. İhmal edilebilir camsı faza sahip ince kristalin seramiklerde daha az parçacık saçılımı gözlenir.

Balistik testler sonucunda tüm kaplamaların seramik altlıkla olan yapışma mukavemetinin, yapıştırıcının kaplama ve arka plaka ile olan yapışma mukavemetinden düşük olduğu gözlenmiştir. Bu durum ilk başta bir dezavantaj gibi görülebilir. Ancak atış yapılan seramik karonun, bu durum sayesinde mühimmatın ucunu aşındırma görevini yerine getirdikten sonra tamamen parçalanıp döküldüğü, bu şekilde komşu karolardaki hasarın standart bir paket üzerine yapılan atıştan daha az olduğu görülmüştür. Yapılan penetrasyon derinliği testlerinde kaplamanın, yüksek hugoniot elastisite limitine sahip bir alüminyum yapıdan daha etkin, ancak 25 mm kalınlığındaki bir alüminyum köpük kadar etkin olmadığı görülmüştür. Kaplama kalınlığının, alüminyum köpüğün 1/1000'i kadar olduğu göz önünde bulundurulursa ağırlık-etkinlik kıyaslamasında seramik kaplamanın daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.

Balistik testler sonucunda kaplama içeriği farklılığının test sonucuna etkisi net bir şekilde gözlemlenememiş olup bu durumun nedeni kullanılan STANAG Seviye 3 mühimmatın yüksek kinetik enerjisi olarak görölmüştür. Ayrıca fonksiyonel kademeli kaplamadaki yumuşak geçişin de bu duruma etkisi olduğu söylenebilir.

Atış testlerinin ardından arka plaka üzerinde kalan kaplama yapısı incelendiğinde çatlak ilerlemesinin bölgesel kaldığı, seramik karolardaki gibi uzun ve sık çatlaklar meydana gelmediği gözlenmiştir. Bu durum, geliştirilen kırılma tokluğunun bir göstergesidir.

7. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada zırh uygulamalarında yoğun olarak kullanılan %99.9 safiyetteki Al_2O_3 seramik plakaların çoklu atışa dayanımının arttırılması, penetrasyon derinliklerinin azaltılması amaçlanmıştır. Bunun için yüksek Hugonoit Elastisite Limitine sahip çekirdek malzeme kullanımı uygun görülmüştür. Mevcut çekirdeklerden daha hafif yapılar oluşturmak amacı ile kaplama teknikleri gözden geçirilmiştir. Termal spreycaplama yöntemlerinden atmosferik plazma spreycaplama yöntemi ile oluşturulacak seramik yapının bu amaç için uygun olduğu düşünülmüştür. Çoklu atışa dayanımı arttırma ve penetrasyon derinliğindeki azalmada yüksek kırılma tokluğuna sahip malzemelerin rolünün büyük olduğu göz önünde bulundurularak kaplama yüksek kırılma tokluğuna sahip Al_2O_3 -%8YSZ kompozitlerinden oluşturulmuştur. Kaplama içeriğinin balistik anlamda bir fark yaratıp yaratmayacağını gözlemlemek amacıyla 3 farklı kaplama içeriği tasarlanmıştır: %90 Al_2O_3 + %10 ZrO_2 , %85 Al_2O_3 + %15 ZrO_2 ve iki içeriğin bir arada kullanıldığı fonksiyonel kademeli kaplama. Kaplamaların uygulanması, karakterizasyon ve balistik testlerin sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Genellikle metal altlık üzerine uygulaması yapılan atmosferik plazma spreycaplama yöntemi seramik altlıklara da uygulanabilir olduğu görülmüştür.
2. Bu yöntemle %90 alümina %10 zirkonya, %85 alümina %15 zirkonya karışımları ayrı ayrı ve birlikte fonksiyonel kademeli olarak başarıyla kaplanmıştır.
3. Kullanılan plazma spreycaplama parametreleri ve kaplama malzemeleri ile kaplama yaklaşık %11 poroziteye sahiptir.
4. Kaplama kalitesi göz önünde bulundurulduğunda, kalite ile doğrudan ilişkili olan güç (75-80 Volt) başta olmak üzere bütün parametrelerin uygun değerler olduğu sonucuna varılabilir.
5. Kaplama kalınlığı artışı, kaplamanın altlık üzerine yapışmasını zorlaştırmaktadır. Farklı kalınlıktaki numuneler (348 μm , 281 μm , 178 μm)

göz önünde bulundurulduğunda en iyi yapışmayı 281µm kalınlığındaki kaplamanın gösterdiği görülmektedir. Bu yüzden kaplama kalınlığının optimum değeri 250 µm olarak belirlenmiş, bu değer üzerinde yapışma etkinliğinin azaldığı gözlenmiştir.

6. Kaplamaların sertlik ve kırılma tokluğu ölçüm sonuçlarına göre YSZ katkısının sertlik artışı adına olumsuz, kırılma tokluğunu geliştirmek adına ise olumlu etkisi gözlenmiştir. %10 YSZ içeren kaplamadaki sertlik değeri 836 ± 5 olarak ölçülmüş, bu değer ağırlıkça %5'lik YSZ katkısı ile %6,3'lük azalma göstererek 783 ± 5 'e düşmüştür. Fonksiyonel kademeli kaplamanın (FKK) sertliği bu iki değer arasında 824 ± 5 olarak ölçülmüştür. Zırh amaçlı kullanım için üretilmiş %99,9 safiyetteki Al_2O_3 plakanın sertlik değeri ise 1445 ± 5 olarak ölçülmüştür. Katkısı ile kaplamanın sertliğinde düşüşe neden olan YSZ, kırılma tokluğunda artışı sağlar. Vickers indentasyon yöntemi ile yapılan ölçümlerde %10 YSZ içeren kaplamanın kırılma tokluğu değeri $4,08 \pm 0,05$ iken ağırlıkça %5'lik YSZ artışı kaplamanın kırılma tokluğunu %4,7 arttırarak $4,27 \pm 0,05$ değerine ulaştırmıştır. Kırılma tokluğu değeri $3,76 \pm 0,05$ bulunmuştur. Kaplamalarda indentasyon izleri kesit boyunca alındığı için FK kaplamada sertlik ve kırılma tokluğu değerleri diğer iki kaplamada ölçülen değerlerin arasında çıkmıştır. Bu durumun, FKK yapısındaki katman kalınlıklarının birbirine yakın olduğunun göstergesi olduğu düşünülmektedir.
7. Substrata paralel ilerleyen çatlakların YSZ kısımlara geldiğinde YSZ yapısını bozmadan YSZ kenarından devam ettiği mikroyapı incelemeleri sonucunda görülmüştür. Yani çatlaklar, tok YSZ'den ziyade kırılma Al_2O_3 yapısında ilerlemişlerdir.
8. İndentasyon izlerinin kaplama doğrultusuna dik doğrultuda ilerlemesi, splat arayüzeylerinin bu doğrultu boyunca en geniş alana sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
9. Kaplama yapısındaki YSZ'lerin substrata paralel ve uzun ince bir görüntüye sahip olduğu mikroyapı incelemeleri sonucu görülmüştür. Bunun nedeninin YSZ'nin yüksek ergime oranı olduğu düşünülebilir.

10. Balistik testlerin sonucunda, kalınlıkları ortalama 250 µm olan bu kaplamalar ile 25cm kalınlığında alüminyum köpüğün etkinliğine yakın bir performans STANAG Seviye 3 mühimmatı için sağlanmıştır. 1000 katlık kalınlık farkı göz önünde bulundurulduğunda kaplamanın daha etkin olduğu sonucuna varılabilir.
11. Balistik testlerin sonucunda atış yapılan seramiğe komşu seramiklerde meydana gelen deformasyon, kaplama yapılmayan seramiklere kıyasla daha azdır. Bu durum zırh paketinin çoklu atışa dayanımının gelişmiş olduğunun önemli bir kanıtıdır.
12. Balistik testlerin sonucunda kaplama varlığının, içeriğinden daha büyük etkisi olduğu gözlenmiştir. Penetrasyon testleri sonucunda numuneler arasında çok büyük farklılıklar olmamasına rağmen en iyi performansı ağırlıkça % 15 YSZ, en kötü performansı da ağırlıkça %10 YSZ içeren numunenin gösterdiği görülmektedir. Buradan YSZ ilavesinin önemi bir kez daha anlaşılmaktadır.
13. Alüminyum ile yapılan penetrasyon derinliği testlerine göre yaklaşık 2 gram ağırlığındaki kaplama, seramiğin etkinliğini %50 oranında arttırmıştır.

Bu konu ile ilgili bir sonraki çalışma, kaplamanın seramik altlık üzerine yapışmasının geliştirilmesini konu edinebilir.

8. KAYNAKLAR

- [1] **Hazell, P. J.**, 2006: Ceramic Armour: Design and Defeat Mechanism, Canberra
- [2] **Crowson, A., Gooch, W. A., and McCauley, J. W.**, 2002: Ceramic Armor Materials by Design, Ohio
- [3] **Franks, P. L., Ohji, T., and Wereszczak, A.**, 2008: Advances in Ceramic Armor IV, New Jersey
- [4] **Al-Qureshi H. A., Gonçalves, D. P., de Melo F. C. L., and Klein, A. N.**, 2004: Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. **44**, pp. 307–316
- [5] **Biswas, S. K., Chakraborty, R., Dey, A., Gupta S. C., Joshi, K. D., Mukhopadhyay, A. K., and Rav, A.**, 2010: Shock deformation of coarse grain alumina above Hugoniot elastic limit, *Journal of Materials Science*, Vol. **45**, no. 13, pp. 3635-3651
- [6] **Cowperthwaite, M.**, 1968: Properties of some Hugoniot curves associated with shock instability, *Journal of Franklin Institute*, Vol. **285**, no. 4, pp. 275-284
- [7] **Li, P., Ning, J., and Ren, H.**, 2008: Mechanical behaviors and damage constitutive model of ceramics under shock compression, *Acta Mech Sin*, Vol. **24**, pp. 305-315
- [8] **Babock, W. G., Craig, B. D., and Lane, R. A.**, 2001, Blast and Penetration Resistant Materials, *AMPTIAC*
- [9] **Güler, İ.**, 1995: Relationships Between the Plasma Spraying Parameters and Quality of Co-Mo-Si Coatings, MSc Thesis, METU
- [10] **An, K., Dutton, R. E., Ravichandran, K. S., and Semiatin, S. L.**, 1999: Thermal Conductivity of Plasma-Sprayed Monolithic and Multilayer Coatings of Alumina and Yttria-Stabilized Zirconia, *Journal of American Ceramic Society*. Vol. **82**, no. 3, pp. 673-682.
- [11] **Berndt, C. C., Bernecki, T., Crawmer D. E., and Harris D. H.**, 2004: Handbook of Thermal Spray Technology, USA
- [12] **Pawlowski, L.**, 2008: The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings, England
- [13] **Yüksek, E., Altuncu, E., Şeker, İ. Y., Üstel, F.**, 2007: Plazma Sprey Kaplama Yöntemi ve Teknolojik Uygulamaları

- [14] Vardelle, M., Vardelle, A., Fauchais, P. and Saray, I., 1994: Comparison of classical and axial injection torches for spraying alumina coatings, *Mater. Manufact. Proc.*, **9**, 735–755.
- [15] Keller, S., Tommer, P., Clarke, R. and Nicoll, A.R., 1995: Key factors in the development of plasma spray systems and the spray process, in *Thermal Spraying – Current Status and Future Trends*, A. Ohmori (Ed.), High Temperature Society of Japan, Osaka, Japan, pp. 275–281.
- [16] Barbezat, G., Zierhut, J. and Landes, K.D., 1999: Triplex – a high performance plasma torch, in *United Thermal Spray Conference*, E. Lugscheider and P.A. Kammer (Eds), DVS, Düsseldorf, Germany, pp. 271–274.
- [17] Sampson, E., 1993: Advances in thermal spray coatings broaden their applications, *Weld. J.*, July, 39–41
- [18] Thornton, J.A., 1982: Plasma in deposition processes, in *Deposition Technologies for Films and Coatings*, R.F. Bunshah (Ed.), Noyes Publishers, Park Ridge, NJ, USA, pp. 19–62.
- [19] Guo, H.B., Stöver, D., and Vaßen, R., 2005: Thermophysical properties and thermal cycling behavior of plasma sprayed thick thermal barrier coatings, *Surface & Coatings Technology*, Vol. **192**, pp. 48 – 56
- [20] Bick, H. and Jürgens, W. (1983). Advanced high velocity thermal spraying of metallic and ceramic powders, in *Proceedings of the 10th International Thermal Spray Conference*, DVS, Düsseldorf, Germany, pp. 92–94.
- [21] Nutsch, G. and Dzur, G., 1996: Plasma spraying with inductively coupled plasma as process variation of the atmospheric plasma spraying, in *Thermische Spritzkonferenz TS96*, Vol. 175, DVS, Lugscheider E. (Ed.) Düsseldorf, Germany, pp. 48–52.
- [22] Bergaus O. J., Chraska T., Legoux J. G., Moreau, C., Tarasi, F., 2007: Mechanical and Thermal Transport Properties of Suspension Thermal-Sprayed Alumina-Zirconia Composite Coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol.17, no. 1, pp. 91–104.
- [23] Kobayashi, A., and Shanmugavelayutham, G., 2007: Mechanical properties and oxidation behaviour of plasma sprayed functionally graded zirconia–alumina thermal barrier coatings, *Materials Chemistry and Physics* Vol. **103**, pp. 283–289
- [24] Cannillo, V., Lusvarghi, L., Siligardi, C., and Sola, A., 2007: Characterization of glass–alumina functionally graded coatings obtained by plasma spraying, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. **27**, pp. 1935–1943
- [25] Limarga, A. M., Widjaja, S., and Yip T. H., 2003 Modeling of residual stresses in a plasma-sprayed zirconia-alumina functionally graded-thermal barrier coating, *Thin Solid Films*, Vol. **434**, pp. 216–227
- [26] Richerson, D. W., 1992: Modern Ceramic Engineering, New York

- [27] Tsipas, S. A., 2010: Effect of dopants on the phase stability of zirconia-based plasma sprayed thermal barrier coatings, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 30 pp. 61–72
- [28] Andrievskaya, E. R., 2008: Phase equilibria in the refractory oxide systems of zirconia, hafnia and yttria with rare-earth oxides, *Journal of European Ceramic Society*, Vol. 28, no.12, pp. 2363-2388
- [29] Chen, R. Z., Chiu, Y. T., Tuan W. H., 2000: Toughening alumina with nickel and zirconia inclusions, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 20, pp.1901-1906.
- [30] Anglada, M., Casellas, D., Llanes, L., and Rafols, I., 1999: Fracture toughness of zirconia-alumina composites, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, Vol. 17, pp. 11-20
- [31] Marshall, D. B., 2005: Strength Characteristics of Transformation-Toughened Zirconia, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 69, no. 3, pp. 173-180
- [32] Butler, E. P., 1985: Transformation-Toughened Zirconia Ceramics, *Materials Science and Technology*, Vol.1, no. 6, pp. 417-432
- [33] Porter, D. L., Evans, A. G., and Heuer, A. H., 1979: Transformation-toughening in partially-stabilized zirconia (PSZ), *Acta Metalurgica*, Vol. 27, pp. 1649-165
- [34] Chevalier, J., De Aza, A. H., Fantozzi, G., Schehl, M., Torrecillas, R., 2002: Crack growth resistance of alumina, zirconia and zirconia toughened alumina ceramics for joint prostheses, *Biomaterials*, Vol. 23, pp. 937-945
- [35] Benes, N.E., Heijman, M. J. G. W., ten Elshof, J. E., and Verweij H., 2002: Quantitative analysis of the microstructural homogeneity of zirconia-toughened alumina composites, *Materials Research Bulletin*, Vol. 37, pp. 141-149
- [36] Basu, B., Van Der Biest, O., and Vleugels, J., 2004 Microstructure–toughness–wear relationship of tetragonal zirconia ceramics , *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 24, pp. 2031–2040
- [37] Hutar, P., Nahlik, L., and Sestakova, L., 2009: Estimation of apparent fracture toughness of ceramic laminates, *Computational Materials Science*, Vol.46, pp. 614-620
- [38] Lima, M.M., Godoy, C., Modenesi, P. J., Avelar-Batista, J. C., A. Davison, A., and Matthews, A., 2003: Coating Fracture Toughness Determined by Vickers Indentation: an Important Parameter in Cavitation Erosion Resistance of WC–Co Thermally Sprayed Coatings, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 177-178, pp. 489-496
- [39] Aldinger, F., Bahr, H. A., Schneider, G. A., and Thurn, G., 2000: Toughness anisotropy and damage behavior of plasma sprayed ZrO₂ thermal barrier coatings, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 123, no.2-3, pp. 147-158

- [40] Ding, C.X., Lee, S.W., and Zeng, Y., 2002, Plasma spray coatings in different nanosize alumina, *Materials Letters*, Vol. 57 pp. 495– 501
- [41] Bussmann, M., Liu H., Mostaghimi, J., and Salimi Jazi, H. R., 2009: Experiments and modeling of rapid solidification of plasma-sprayed yttria-stabilized zirconia, *Acta Materialia*, Vol. 57 pp. 6013–6021
- [42] Ding, C., Lee, S. W., and Zeng, Y., 2001 Young's modulus and residual stress of plasma-sprayed boron carbide coatings, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 21, pp. 87-91
- [43] Molinari, J. F., Ramesh, K. T., and Zhou, F., 2006: Effects of material properties on the fragmentation of brittle materials, *International Journal of Fracture*, Vol. 139, pp. 169–196
- [44] Chou, J.H., Jean, M.D., and Lin, B.T., 2007: Using response surface methodology for optimizing deposited partially stabilized zirconia in plasma spraying, *Applied Surface Science*, Vol. 253, pp. 3254–3262
- [45] Coddet, C., Ding, C., Liang, B., Liao, H., and Zhang, G., 2009: Friction and wear behavior of $ZrO_2-Al_2O_3$ composite coatings deposited by air plasma spraying: Correlation with physical and mechanical properties, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 203, pp. 3235–3242
- [46] Aza De, A.H., Chevalier, J., Fantozzi, G., Schehl, M., and Torrecillas, R., 2002: Crack growth resistance of alumina, zirconia and zirconia toughened alumina ceramics for joint prostheses, *Biomaterials*, Vol. 23, no. 3, pp. 937-945
- [47] Tekmen, C., Tsunekawa, Y., and Okumiya, M., 2008: Effect of plasma spray parameters on in-flight particle characteristics and in-situ alumina formation, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 203, no. 3-4, pp. 223-228
- [48] Fisher, I.A., 1972: Variables influencing the characteristics of plasma sprayed coatings, *Int. Metal. Rev.*, 17, 117–129.
- [49] Faber, K. T., Mawdsley, J. R., Su, Y. J., and Trice, R. W., 2002: Effect of heat treatment on phase stability, microstructure, and thermal conductivity of plasma-sprayed YSZ, *Journal of Materials Science*, Vol. 37, pp. 2359-2395
- [50] Avelar-Batista, J. C., Davidson, A., Godoy, C., Lima, M. M., and Modenesi, P. J., 2004: Coating fracture toughness determined by Vickers indentation: an important parameter in cavitation erosion resistance of WC–Co thermally sprayed coatings, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 177-178, pp. 489-496
- [51] Lin, T. Z., Liu, B., McDonald, A., Tan, C., and Yang, Q., 2008: Processing and ballistic performance of lightweight armors based on ultra-fine-grain aluminum composites, *Journal of Materials Science*, Vol. 43, pp. 7344-7348

- [52] **Arias, A., Lopez-Puente, J., Navarro, C., and Zaera, R.,** 2005: The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. **32**, no. 1-4, pp. 321-336
- [53] **Nato Standardization Agreement (STANAG),** (2004). Protection Levels for Occupants of Logistic and Light Armoured Vehicles. USA



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Zeynep DERELİOĞLU

Doğum Yeri ve Tarihi: Nazilli 1985

Adres: Oyak Sitesi No: 46/20 Yenilevent/İstanbul

Lisans Üniversitesi: İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği 2003-2010