



**5083 ALÜMİNYUM PLAKA MALZEMESİNİN ÇEŞİTLİ SERAMİK
TOZLAR KULLANILARAK TERMAL SPREY YÖNTEMİYLE BALİSTİK
AMAÇLI KAPLANABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Sefa KAYIR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Sefa KAYIR

26/04/2022

5083 ALÜMİNYUM PLAKA MALZEMESİNİN ÇEŞİTLİ SERAMİK TOZLAR
KULLANILARAK TERMAL SPREY YÖNTEMİYLE BALİSTİK AMAÇLI
KAPLANABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Sefa KAYIR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Nisan 2022

ÖZET

Bu çalışmada; metal+seramik tozları kullanılarak mekanik ve balistik özelliklerinin geliştirilebilmesi için A 5083 alüminyum plakaların yüzeylerinin termal spreyle kaplama yöntemiyle kaplanabilirliği araştırılmıştır. Bu plakaların yüzeyleri, yüksek hızlı oksit yakıt (HVOF) tekniğiyle Ni+Krom Karbür ve Co+Tungsten Karbür malzemeleri ile kaplanmıştır. Ayrıca kaplama sonrası ısı işlem etkisinin tespiti amacıyla bazı plakalara T6 ısıtma işlemi uygulanmıştır. Üretilen numuneler yapısal, mekanik ve balistik özellikler açısından incelenmiştir. İncelemeler neticesinde; termal spreyle kaplama yöntemiyle AA5083 malzemesinin başarıyla kaplanabildiği, altlık/kaplama ara yüzeyinin sürekli ve tamamen birleşik olduğu, kaplama yapısının homojen olduğu tespit edilmiştir. Kaplamanın mekanik özellikleri geliştirdiği, özellikle Co+WC malzemesi ile kaplama yapıldığında daha iyi sonuçların elde edildiği görülmüştür. İnce bir katman şeklinde de olsa kaplama yapılmasının A5083 malzemelerinin balistik açıdan geliştirilmesine katkı sağladığı görülmüştür.

Bilim Kodu : 91510
Anahtar Kelimeler : 5083 Al alaşımı, katmanlı imalat, termal spreyle kaplama, mekanik özellikler, balistik özellikler
Sayfa Adedi : 85
Danışman : Assoc. Prof. Dr. Hasan HASIRCI

INVESTIGATION OF THE COATINGABILITY OF 5083 ALUMINUM PLATE
MATERIAL FOR BALLISTIC PURPOSES BY THERMAL SPRAY METHOD USING
VARIOUS CERAMIC POWDERS

(M. Sc. Thesis)

Sefa KAYIR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2022

ABSTRACT

In this study; In order to improve the mechanical and ballistic properties by using metal + ceramic powders, the coatingability of the surfaces of A 5083 aluminum plates by thermal spray coating method was investigated. The surfaces of these plates are coated with Ni+Chromium Carbide and Co+Tungsten Carbide materials by high speed oxy fuel (HVOF) technique. In addition, T6 heat treatment was applied to some plates in order to determine the post-coating heat treatment effect. Produced samples were examined in terms of structural, mechanical and ballistic properties. As a result of the investigations; It has been determined that the AA5083 material can be successfully coated with the thermal spray method, the substrate/coating interface is continuous and completely combined, and the coating structure is homogeneous. It has been observed that the coating improves the mechanical properties, and better results are obtained, especially when coating with Co+WC material. It has been observed that coating, albeit in the form of a thin layer, contributes to the ballistic development of A5083 materials.

Science Code : 91510

Key Words : 5083 Al alloy, additive manufacturing, thermal spray, mechanical properties, ballistical properties

Page Number : 85

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Hasan HASIRCI

TEŞEKKÜR

Her bakımdan yardımını eksik etmeyen akademik danışmanım değerli hocam Doç. Dr. Hasan HASIRCI ve akademik çalışma için beni teşvik ederek, yardımlarını sunan değerli Müdürüm Faruk OĞUZ ve Baş Mühendisim Arman ULUOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam süresince desteğini hep arkamda hissettiğim, sonsuz yardımı olan eşim Elif Hayal KAYIR' a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KATMANLI İMALAT VE UYGULAMA YÖNTEMLERİ	3
2.1. Katmanlı İmalata Genel Bakış	3
2.2. Katmanlı İmalat ile 3B Ürün Oluşturma Adımları.....	4
2.3. Katmanlı İmalat Yöntemleri.....	7
2.3.1. Fotopolimerizasyon ile katmanlı imalat.....	8
2.3.2. Malzeme ekstrüzyonuyla katmanlı imalat	11
2.3.3. Toz zemin üzerinde lazer füzyon	13
2.3.4. Tel beslemeli katmanlı imalat	15
2.3.4. Hibrit sistemli katmanlı imalat.....	17
2.3.5. Kompozit otomatik bant döşeme (Composite automated tape laying)	17
2.3.6. Termal sprey katmanlı imalat	18
3. KATMANLI İMALATTA KULLANILAN TOZLARIN ÜRETİM YÖNTEMLERİ VE KARAKTERİZASYONU.....	29
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	33
4.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler	33
4.1.1. Altlık malzemesi özellikleri	33

	Sayfa
4.1.2. Kaplamada kullanılan tozlar ve özellikleri	34
4.2. Termal Sprey Kaplama İşlemleri	36
4.3. Yapısal İnceleme Çalışmaları.....	40
4.3.1. Plakalardan numune hazırlanması	40
4.3.2. Isıl işlem uygulaması.....	41
4.3.3. Çekme testlerinin uygulanması	42
4.3.4. Üç nokta eğme testlerinin uygulanması	43
4.3.5. Sertlik testlerinin uygulanması.....	43
4.3.6. Optik ve SEM mikroskop inceleme işlemleri	43
4.3.7. Balistik test uygulaması	44
5. DENEYSEL BULGULAR, TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME.....	45
5.1. Altlık/Kaplama Geçiş Bölgelerinin Yapı İncelemesi.....	45
5.2. Mekanik Test Sonuçları	61
5.3. Balistik Test Sonuçları	65
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	75
6.1. Sonuç.....	75
6.2. Öneriler.....	76
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	85

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Toz özelliklerinin sınıflandırılması.....	29
Çizelge 4.1. Deneysel malzemelerin üretim işlemleri ve kullanılan malzemeler.....	33
Çizelge 4.2. Alüminyum 5083 alaşımının kimyasal kompozisyonu (%)	34
Çizelge 4.3 .Uygulanan işlemlere göre numunelerin kodlaması ve açıklaması	42

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Tasarımdan imalata genel katmanlı imalat adımları	5
Şekil 2.2. Termal sprey tekniklerinin gösterimi	20
Şekil 5.1. Çekme ve akma dayanımlarının üretim şartlarına göre değişimi	62
Şekil 5.2. Uzama ve kopma enerjilerinin üretim şartlarına göre değişimi.....	62
Şekil 5.3. Eğilme dayanımı ve eğilme oranının üretim şartlarına göre değişimi.....	63
Şekil 5.4. Sertliğin üretim şartlarına göre değişimi	64
Şekil 5.5. Üretim şartlarına bağlı olarak mermi çekirdeğinin oluşturduğu iz derinliklerinin değişimi.....	73

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Katmanlı imalat esnasında oluşan katmanların gösterimi	6
Resim 2.2. Katmanlı imalat ile üretilecek parçanın dilimli katmanlarının gösterimi.....	6
Resim 2.3. Katmanlı imalatlarda destek yapılar	6
Resim 2.4. Stereolitografi sistemi	9
Resim 2.5. Stereolitografi ile imal edilen parça inşası.....	10
Resim 2.6. Sürekli dijital ışık işleme sistemi.....	11
Resim 2.7. Ergiyik yığarak modelleme sistemi	12
Resim 2.8. Seçici lazer sinterleme sistemi.....	13
Resim 2.9. Doğrudan metal lazer sinterleme sistemi.....	14
Resim 2.10. Elektron ışınıyla ergitme sistemi	15
Resim 2.11. Tel elektron ışını katmanlı imalat sistemi (EBAM).....	16
Resim 2.12. Tel ark katmanlı imalat sistemi (WAAM)	16
Resim 2.13. Ekstrüzyon ve freze işlemlerini birlikte yapabilen hibrit üretim tezgahı ...	17
Resim 2.14. Kompozit otomatik bant döşeme makara ve serim gösterimi	18
Resim 2.15. Kompozit otomatik bant döşeme serim gösterimi	18
Resim 2.16. Ark sprej yöntemi	21
Resim 2.17. HVOF tabanca gösterimi	23
Resim 2.18. Patlamalı termal sprej ile katmanlı imalat sistemi	25
Resim 2.19. Soğuk sprej sistemi	27
Resim 2.20. Soğuk sprej partikül dağılımı.....	27
Resim 4.1. Oerlikon metco krom karbür tozu mikroskop görüntüsü	35
Resim 4.2. Oerlikon metco tungsten karbür tozu mikroskop görüntüsü	36
Resim 4.3. Hobart Tafa Technologies JP 5000 model termal sprej makinesi	37
Resim 4.4. Termal sprej yöntemiyle Al plakaların a) Co+WC b) Ni+CrC kaplanması	38

Resim	Sayfa
Resim 4.5. Termal sprej ile Al plakaların a)Co+WV ve b) Ni+CrC kaplanması sonrası yüzey görüntüleri	39
Resim 4.6. Kaplanmış alüminyum plakaların kaplama kalınlıklarının ölçümü.....	39
Resim 4.7. Bakalite gömülmüş numune görüntüsü	40
Resim 4.8. Bystronic By Jet Flex 6030 su jeti kesim tezgahı.....	41
Resim 4.9. Su jetiyle kesilerek oluşturulan test numuneleri.....	41
Resim 4.10. Fırın içerisinde ısıtıl işlem gören numunelerin görüntüsü	42
Resim 4.11. 3 nokta eğme testlerinin yapıldığı cihaz ve testin uygulanması	43
Resim 4.12. Değişken namlulu mermi atış düzeneği.....	44
Resim 4.13. Sarsılmaz marka 9x19 luger mermisi	44
Resim 5.1. A1 numunesinin 3 nokta eğme ve çekme testi sonrasında oluşan deformasyonun kaplama yapısına etkisi ve metalografik kesit görüntü hazırlığı	46
Resim 5.2. A1 numunesi kaplama bölgesinin mikroskop görüntüsü.....	46
Resim 5.3. A1 numunesi çekme deformasyon bölgesi kaplama görüntüsü	47
Resim 5.4. A1 numunesi eğme deformasyon bölgesi kaplama görüntüsü	48
Resim 5.5. A1 numunesi SEM görüntüsü ve 3 farklı bölgeden EDS analiz sonuçları ...	49
Resim 5.6. çA2 numunesinin 3 nokta eğme ve çekme testi sonrasında oluşan deformasyonun kaplama yapısına etkisi ve metalografik kesit görüntü hazırlığı.....	50
Resim 5.7. A2 numunesi kaplama bölgesinin mikroskop görüntüsü.....	51
Resim 5.8.A2 numunesi çekme deformasyon bölgesi kaplama görüntüsü	51
Resim 5.9. A2 numunesi eğme deformasyon bölgesi kaplama görüntüsü	51
Resim 5.10. A2 numunesi kimyasal analiz sonuçları	52
Resim 5.11. B1 numunesinin 3 nokta eğme ve çekme testi sonrasında oluşan deformasyonun kaplama yapısına etkisi ve metalografik kesit görüntü hazırlığı.....	54
Resim 5.12. B1 numunesi kaplama bölgesinin mikroskop görüntüsü.....	54
Resim 5.13. B1 numunesi çekme deformasyon bölgesi kaplama görüntüsü.....	54

Resim	Sayfa
Resim 5.14. B1 numunesi eğme deformasyon bölgesi kaplama görüntüsü	55
Resim 5.15. B1 numunesi kimyasal analiz sonuçları	56
Resim 5.16. B2 numunesinin 3 nokta eğme ve çekme testi sonrasında oluşan deformasyonun kaplama yapısına etkisi ve metalografik kesit görüntü hazırlığı	58
Resim 5.17. B2 numunesi kaplama bölgesinin mikroskop görüntüsü.....	58
Resim 5.18. B2 numunesi çekme deformasyon bölgesi kaplama görüntüsü.....	58
Resim 5.19. B1 numunesi eğme deformasyon bölgesi kaplama görüntüsü	59
Resim 5.20. B2 numunesi EDS analiz sonuçları	60
Resim 5.21. 5083 numunesi atış sonrası plaka üzerinde mermi çekirdeğinin oluşturduğu deformasyon	66
Resim 5.22. A2 numunesi atış sonrası plaka üzerinde mermi çekirdeğinin oluşturduğu	67
Resim 5.23. B2 numunesi atış sonrası plaka üzerinde mermi çekirdeğinin oluşturduğu	68
Resim 5.24. 5083 Al alaşımı numunesi tahribata uğramış atış bölgesinin kesit görüntüleri	69
Resim 5.25. 5083 Al alaşımı numunesi tahribata uğramış atış bölgesinin stereo mikroskop görüntüleri	69
Resim 5.26. A2 numunesi (ısıtıl işlemlili Ni-CrC) tahribata uğramış atış bölgesinin kesit görüntüleri.....	70
Resim 5.27. A2 numunesi (ısıtıl işlemlili Ni-CrC) tahribata uğramış atış bölgesinin stereo mikroskop görüntüleri.....	70
Resim 5.28. B2 numunesi (ısıtıl işlemlili Co-WC) tahribata uğramış atış bölgesinin kesit görüntüleri.....	71
Resim 5.29. B2 numunesi (ısıtıl işlemlili Co-WC) tahribata uğramış atış bölgesinin stereo mikroskop görüntüleri.....	71

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

Ra

Yüzey pürüzlülük değeri

α

Termal genleşme katsayısı

Kısaltmalar

Açıklamalar

3D

3 Boyutlu

CDLP

Sürekli dijital ışık işleme

DLP

Dijital ışık işleme

DMLS

Doğrudan metal lazer sinterleme

FDM

Ergiyik yığarak modelleme

HVAF

Yüksek hızlı hava yakıtlı

HVOF

Yüksek hızlı oksijen yakıtlı

SEM

Taramalı elektron mikroskobu

SLA

Stereolitografi

SLS

Seçici lazer sinterleme

TS

Termal sprey

UV

Ultra viyole

XRD

X ışın kırınım yöntemi

1. GİRİŞ

Günümüzde mekanik özellikleri yüksek plakalar ve bu malzemelerin özelliklerinin daha da geliştirilmesi, savunma ve havacılık sektörleri için gelişen teknolojiyle oldukça önem arz etmektedir. An itibarıyla malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmek için pek çok yöntem bulunmuş ve aktif olarak kullanılmaktadır. Bu sektörler için malzemenin geliştirilmesi gereken en önemli özelliklerinin; korozyon direnci, sertlik ve aşınma olduğu görülmektedir. Yeni imalat yöntemlerinden biri olan katmanlı imalat yöntemleri ile malzemelerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi de mümkün olmaktadır. Katmanlı imalat yöntemi genel anlamda malzemelerin katman katman birbirine ısı, lazer, indüksiyon, ışın vb. ile eklenmesi ve 3 boyuta kadar imal edilmesini sağlayan bir üretim işlemidir. Üretilen malzemelerin tüm iç ve dış yapısında özelliklerin aynı olmasını sağlayabilmesi bakımından avantajları olmasının yanında, sadece yüzey geliştirme için de kullanılmaktadır. Uygulanacak malzemenin tüm yüzeyleri veya istenilen bir yüzeyin özelliklerinin geliştirmek de mümkündür. Katmanlı imalat yöntemleri, tasarlanmış malzemelerin aynı kimyasal yapıya sahip malzemenin veya birden fazla malzemenin katmanlı bir yapıda birleştirilmesi işlemini de mümkün kılmaktadır. Bu şekilde tek malzemeyle elde edilemeyecek özellikler farklı malzemelerin karışımı veya kaplanması ile sağlanmaktadır.

Toz malzeme ile yapılan katmanlı imalatlarda kullanılacak tozlar malzeme için oldukça önemlidir. Hangi özelliklerde malzeme gerekiyorsa, istenilen özellikleri sağlayabilecek tozlar seçilmelidir. Bu tozların sadece metal veya seramik gibi tek çeşit olarak kullanılması da günümüz şartlarında mümkün değildir. Oluşturulacak katmanlarda mekanik özellikleri geliştirmenin yanı sıra kullanılan tozların yapısını bir arada tutacak yapıştırıcı özellikleri sağlayacak tozlar da bağlayıcı amacıyla karışımlarda kullanılmaktadır. Bu toz karışımları oluşturulurken, sadece mekanik etki değil, aynı zamanda kimyasal etkileri de göz önünde bulundurulmalıdır. Katmanlı imalat yönteminin seçimi de istenilen özellikte katmanlı malzeme oluşturması için oldukça önemli ikinci faktördür. Kullanılacak toz malzeme bileşimi/karışımı, uygulanan katmanlı imalat yöntemiyle başarılı bir üretimi mümkün kılmayabilir. Lazer, ışın, indüksiyon veya ergitme işlemiyle tozların katman oluşturabilmesi uyum içinde ve optimize edilmesi güç bir uygulamadır. Şu ana kadar dünya üzerinde pek çok firma katmanlı imalatın bu alanında büyük yatırımlar ve denemeler gerçekleştirerek parametrelerin, katmanlı imalat işlem adımlarının, kullanılacak

toz/tel karakterizasyon çalışmalarını yaparak bilime kazandırmıştır.

Katmanlı imalat yöntemlerinden biri olan termal spreyle malzemelerde mekanik özelliklerin geliştirilmesi hedeflenmektedir. En önemli kazanım sağlayan mekanik özellikler aşınma, yorulma, korozyon dayanımıyla malzeme çalışma ömrünün uzatılmasıdır. Termal spre (TM) toz veya tel şeklinde malzemelerin bir ısı kaynağı yardımıyla (plazma, alev vb.) kısmen veya tamamen eriyik hale getirilerek basınç yardımıyla hızla kaplanacak yüzeye püskürtülmesi ile katmanlar halinde kaplama tabakası oluşturma temeline dayanmaktadır. Bu çerçevede alt katman olarak kullanılacak malzeme ve kaplama yapılacak tozlar ile oluşturulan kaplama katmanı sayesinde parçada mekanik özelliklerin geliştirilmesi mümkün olmaktadır. Tüm termal spre ile malzeme kaplama yöntemlerinde kaplamanın istenen özellikleri ve performansı kaplama malzemesinin yapısı ve kaplama parametrelerine bağlı olduğundan araştırmalar ve incelemeler günümüzde de halen devam etmektedir. Tüm bu araştırmalar; önemli parametrelerin optimizasyonu sürecini, alternatif denemelerin devamını ve farklı kaplama proseslerinin ortaya çıkmasını sağlamakta, sürekli olarak geliştirilmesi ve güncelleştirilmesini de beraberinde getirmektedir.

Bu çalışmada; katmanlı imalat yöntemlerinden biri olan termal spre yöntemiyle mekanik özellikleri artırmak amacıyla Tungsten Karbür ve Krom Karbür malzemeleriyle kaplama yapılmıştır. Ayrıca kaplanmış malzemelere ısıtma işlemi uygulanması yapılarak malzeme/kaplama ara yüzey yapısal ve mekanik özelliklerdeki değişim incelenmiştir. Farklı kaplama malzemeleri ve ısıtma işlemi uygulanması ile Al plaka malzemelerinin mekanik ve balistik özelliklerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Kaplama ve ısıtma işlem süreçleri neticesinde A5083 alüminyum plakaların, mekanik özelliklerinin geliştirilmesi daha uzun çalışma ömrüne ve balistik özelliklerin geliştirilmesiyle de koruyucu özelliklerinin artması sağlanabilecektir.

2. KATMANLI İMALAT VE UYGULAMA YÖNTEMLERİ

2.1. Katmanlı İmalata Genel Bakış

Katmanlı imalat teknolojileri günümüzde sürekli gelişmekte olan üretim sektörlerindendir. Katmanlı imalat, endüstriyel aşamaları direkt olarak etkilediği gibi hayal edilebilen hemen her tasarımı gerçeğe dönüştürebilecek bir esnekliğe sahiptir. Genel anlamda malzemelerin üst üste eklenmesini sağlayarak katman katman yapının oluşturulması şeklinde yapılır. Ana malzemenin tezgâh ve cihazlar yardımıyla eksiltilerek şekillendirilmesi (talaşlı imalat) pek çok sanayide kullanılan sıradan herkes tarafından bilinen bir üretim yöntemidir. Eklemeli imalat yöntemi ise, ana malzemedan eksiltme yaparak imalatın tam tersine, çeşitli yöntemlerle katman katman eklenerek ürünün ana malzeme yapısının arttırıldığı bir imalat yöntemidir [1].

Katmanlı imalatta kullanılan teknikler kullanılan ham maddeye göre farklılık gösterebilir. Tozların sinterlenmesi, toz/tel ham malzemenin ergitilmesi veya birleştirilmesi parçanın katmanlarını üst üste eklenmesinde kullanılan bazı teknik çeşitleridir [2].

Katmanlı imalat yöntemleri içerisinde 3 boyutlu üretimin gerçekleştirebilmesini sağlayan yazıcılar (3D Printerler) sayesinde, prototip ürün çalışmaları kolaylıkla denenebilmektedir. Malzemelerin 3 boyutlu (3D) model verilerinden nesneler yapmak için üst üste eklemeli katmanlar şeklinde üretilme süreci ASTM (American Society of Testing Materials) F2792-10 katmanlı imalat standardında anlatıldığı gibi geleneksel malzeme işleme yöntemlerinden farklıdır ve eklemeler yapılarak gerçekleştirilir [3].

Üç boyutlu yazıcılar, toz malzemelerin katmanlar halinde depolandığı ve püskürtmeli bir baskı kafasından bağlayıcı ile birleştirilerek hızlı bir prototipleme işlemidir. Bu yöntemlerle doğrudan yüksek performanslı parçaların üretimi gerçekleştirilebilmektedir [4].

Aynı zamanda sürekli geliştirilen üç boyutlu yazıcılar sayesinde, küçük yapıları portatif ürünlerin haricinde, daha büyük ve kompleks yapıları ürünler oluşturulabilmektedir. Katmanlı imalat çatısı altında pek çok farklı imalat yöntemi bulunmaktadır. Bu farklılık, oluşturulacak ürünlerdeki mekanik özellikler, ürün geometrik yapısı, yapı içindeki

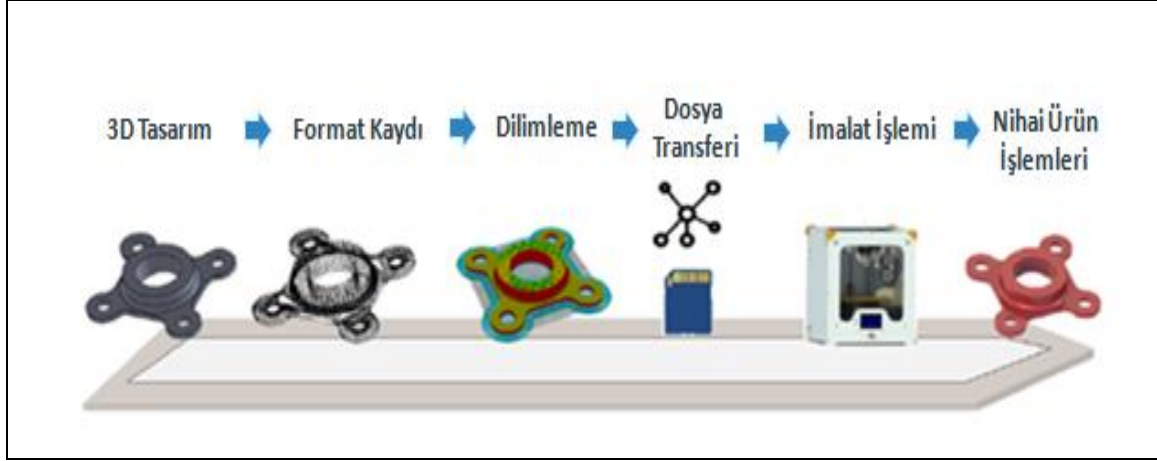
maddelerin homojen gerekliliklerine göre değişmektedir. Toz veya tel formundaki hammaddenin yazılım desteğiyle parça yapısını oluşturması, ürüne göre destek yapılarında ihtiyacı gerektirebilmektedir. Bu destek yapılar nihai ürün oluşturulması tamamlandıktan sonra özel proseslerle kesimi yapıp tasarlanan ürünün üretimi tamamlanmış olur. Taşlama, freze işlemleri destek yapıların kesilerek ayrılması için kullanılan genel yöntemlerdir [5].

Katmanlı imalat teknolojileri son zamanlarda karmaşık ve büyük boyutlara sahip metal kompozit parçaları üretmek için en önemli yöntemlerdendir. Lazer tabanlı katmanlı imalat süreçlerinden bazılarında farklı tozlarda yapılan çalışmalarda prosese ait beklenmedik kusurların varlığı nedeniyle son derece zayıf mekanik özellikler gösterdiği mikro çatlaklar, gözenekler ve ısıdan etkilenen bölgelerde kristalleşme gibi olumsuzluklar ortaya çıkmıştır. Bu gibi olumsuzlukların giderilmesi katmanlı imalat gelişimini sürekli canlı tutmaktadır [6].

Zırh olarak kullanılan katmanlı yapılar genellikle iki veya daha fazla yapılı sistemlerdir. Metal ve kompozit malzemelerin balistik özelliklerini kullanarak oluşturulur [7].

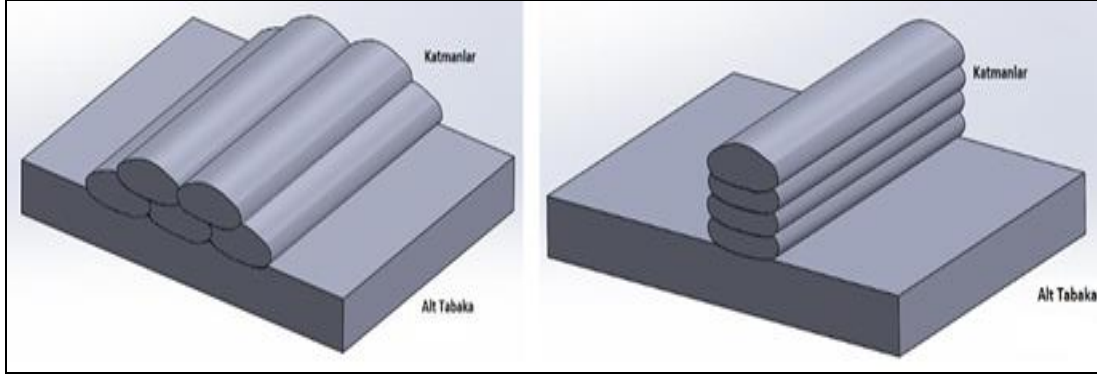
2.2. Katmanlı İmalat ile 3B Ürün Oluşturma Adımları

Katmanlı imalat ile tasarımından başlayarak, üretilecek malzemelerin üretim adımları seçilen katmanlı imalat yöntemine göre çeşitlilik içermektedir. Ancak genel anlamda yapılacak işlemlere bakılacak olursa; imalat tezgâhlarına yazılım ile kodlayabilecek modelin aktarılması ve tezgâhın girilen işletme değerlerine göre katmanları sırasıyla oluşturmaya dayanır [5].

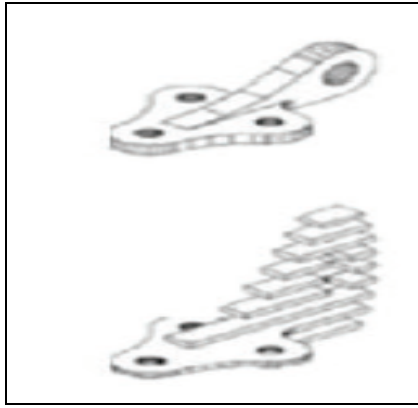


Şekil 2.1. Tasarımdan imalata genel katmanlı imalat adımları [5]

Bu adımların en başında elde tasarlanmış bir model yoksa imal edilecek parçanın 3 boyutlu tasarımı gerçekleştirilir. Bu model tasarımı pek çok bilgisayar destekli tasarım (CAD) programlarından kolaylıkla oluşturulabilir. Yüzeysel olarak tabandan yukarı doğru imal edilecek bu model için yükselen katmanlarda 45 derecelik bir açı destek yapılarının olup olmaması önemlidir. Yapının x eksenine yaptığı açı 45 derecelik açıdan küçükse, yapının ve katmanların istenilen şekilde elde edilmesi için destekleyici kolon yapılarına kesinlikle ihtiyaç duyulacaktır. Tasarım ve modelleme aşamasında bu madde nihai ürünün sorunsuz bir şekilde elde edilmesi için önemli bir faktördür. Sonraki adım, tasarlanan programdan alınan model imal edilecek tezgâh için gerekli dilimleme formatına çevrilerek kaydedilir. Dilimleme aşaması parçayı inşa ederken oluşturulacak katmanların özelliklerini ve bu katmanlar için gerekli tezgâh yazılım G-kodlarını elde etmek için kullanılır. Yazılım içerisinde kullanılacak katmanlı imalat yöntemine göre parametreler; katman kalınlığı, başlık ilerleme hızı, lazer gücü, sıcaklık derecesi, baskı yoğunluk miktarı, akım miktarı, malzeme cinsi, malzemenin imal edilirken tezgâh üzerindeki pozisyonu, yönü gibi bileşenler belirlenmeye başlanır. Parçanın imal edilecek yönü bile üretim hızı ve toplam üretim zamanı için oldukça önemlidir [5].



Resim 2.1. Katmanlı imalat esnasında oluşan katmanların gösterimi [8]



Resim 2.2. Katmanlı imalat ile üretilecek parçanın dilimli katmanlarının gösterimi [9]

İmalat işlemine başlamadan önce cihazlarla ilgili tüm ayar ve doğrulamalar kontrol edilmelidir. Optimize edilmiş parametrelerin kullanımı başarılı bir imalat için ön koşullardan biridir. Denenmemiş ve belirgin olmayan değişikliklerden seri imalatlarda kaçınılmalıdır. Prosesin imalat süresi destek yapıların sayısı, malzeme katman sayısı, istenen çözünürlük seviyesine göre değişir. Son adım olarak destek yapıların imal edilmiş üründen ayrışımı yapılarak parça son haline çevrilmiş olur [5].



Resim 2.3. Katmanlı imalatlarda destek yapılar [10]

Katmanlı imalat bu prosesleri de aşarak zaman içerisinde evrimleşmiş ve geliştirilmiştir. Halen günümüzde üç boyutlu yazıcılar ile katmanlı imalat temel mantığında parçalar üretilmekte ve üretim prosesleri geliştirilmektedir. Tüm katmanlı imalat proseslerinde en genel mantık üst üste koyarak parça elde etmek yani katman katman imalat yöntemi yer almaktadır [11].

Günümüzde, katmanlı imalat ile imal edilmiş pek çok ürünün kaynak yöntemleri ve kaynak yapılabirliği hakkında araştırmalar sürdürülmektedir. Katmanlı imalatla olumlu birleştirme sonuçları elde edebilmek için imal edilen malzemelerin kaynağının, ideal parametreler belirlenerek yapılması gerektiği gözlemlenmiştir. Katmanlı imalat yöntemi ile üretilen malzemelerin yapısı incelendiğinde; yapının anizotropik yapıda olduğu ve kaynak sonrasında, kullanılan kaynak metoduna göre, yöne bağlı olarak malzemenin iç yapısında ve parça mekanik özelliklerinde farklılıklar oluştuğuna dair bulgular elde edilmiştir. Ek olarak üretilen parçalara ısıtıl işlemde uygulanarak parça mikro yapı ve mekanik özelliklerinde gelişim sağlanabilir [12].

Sürecin temel doğasından olan ve katmanlı imalatlarda mühim faktörlerden bir diğeri de, parça yüzey pürüzlülüğünün kontrol edilebilirliğidir. Yüzey pürüzlülüğü, imal edilen parçanın kalitesi, yaşam ömrü ve tasarım gereksinimleri bakımından kıymetli bir kriterdir. Bu yüzey pürüzlülüğüne katmanlı imalat yöntemlerinde merdiven etkisi adı verilmektedir. Merdiven etkisi veya başka etkiler nedeniyle oluşan yüzey pürüzlülüğü, ürün performansı olarak malzemenin birçok özelliğinde etkilerinin olduğu bilinmektedir. Bu etkiler arasında akış, sürtünme, aşınma, sertlik, yorulma, kaplanabilirlik veya kullanıcıyla etkileşim gibi özellikler örnek gösterilebilir [13, 14].

2.3. Katmanlı İmalat Yöntemleri

Katmanlı imalat yöntemlerinin geliştirilmesiyle, tasarımı sınırlayan ve imal edilebilirlik bakımından zor/kompleks yapıda parçaların üretimi de gerçekleştirilebilmektedir. Üretimi yapılacak nihai parçanın imalat süresi; boyutlarının büyüklüğüne, detay yapıların miktarına ve üretim tezgah/makinasına göre saatler veya günler olabilmektedir. Katmanlı imalat sistemleri sayesinde bu parçaların imalat süresi oldukça kısaltılmaya başlanmıştır.

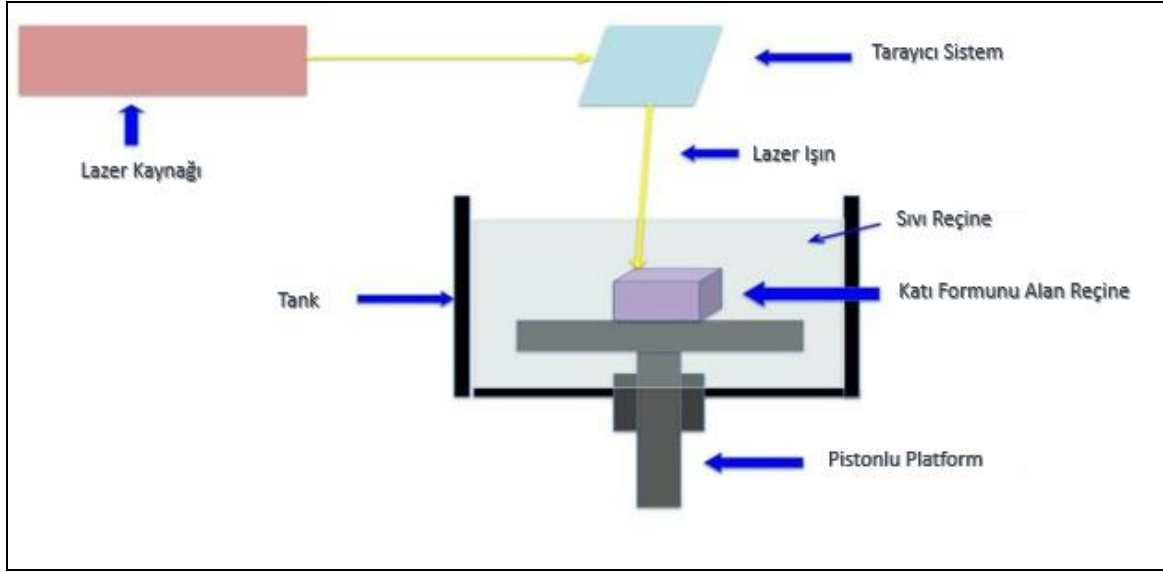
Katmanlı imalatta yöntemler arasındaki farklılıklar, kullanılan ham madde materyalleri ve katman oluşumunu gerçekleştirme yöntemlerinden dolayı birbirinden ayrılmaktadır. Örneğin, seçici lazer sinterleme (SLS) gibi yöntemlerde metal tozlar lazer gücüyle eritilmekte veya ergiyik hale yakın olarak yumuşatılmakta ve katman katman yüzeyler oluşturulmaktadır. Yani lazer gücü ve inşa için toz kullanılmaktayken öte yandan ise termal sprey ile katmanlı imalat yönteminde tozlar lazer yerine direk termal güç ile ergiyik hale getirilerek basınç yardımıyla püskürtülmesi sonucu katman katman yüzeylerin oluşumu sağlanmaktadır.

2.3.1. Fotopolimerizasyon ile katmanlı imalat

Fotopolimerizasyon yöntemleri, polimer yapıda malzemelerin ışın yardımıyla ve genellikle mor ötesi ışınları kullanılarak imal edilmesi esaslarına dayanmaktadır. Işın enerjisi sayesinde sıvı reçine ile çapraz bağlı katı polimerlere hızlı bir şekilde dönüşümünü gerçekleştirerek etkin ve oldukça düşük maliyetli bir yöntemdir. Işın enerjisiyle kürlemek amacıyla malzemeler; genellikle ultraviyole (UV) ışınlarına uygulatılınca reaktif şeklindeki türevler üreten az miktarda foto başlatıcı bulunduran birden fazla fonksiyonlu monomer yapılardan oluşur. Fotopolimerizasyon ile ışın kullanılarak yapılan imalatlar Stereolitografi Katmanlı İmalatı, Dijital Işık İşleme Katmanlı İmalatı, Sürekli Dijital Işık İşleme Katmanlı İmalat yöntemlerinden oluşmaktadır [15].

Stereolitografi (SLA) katmanlı imalatı

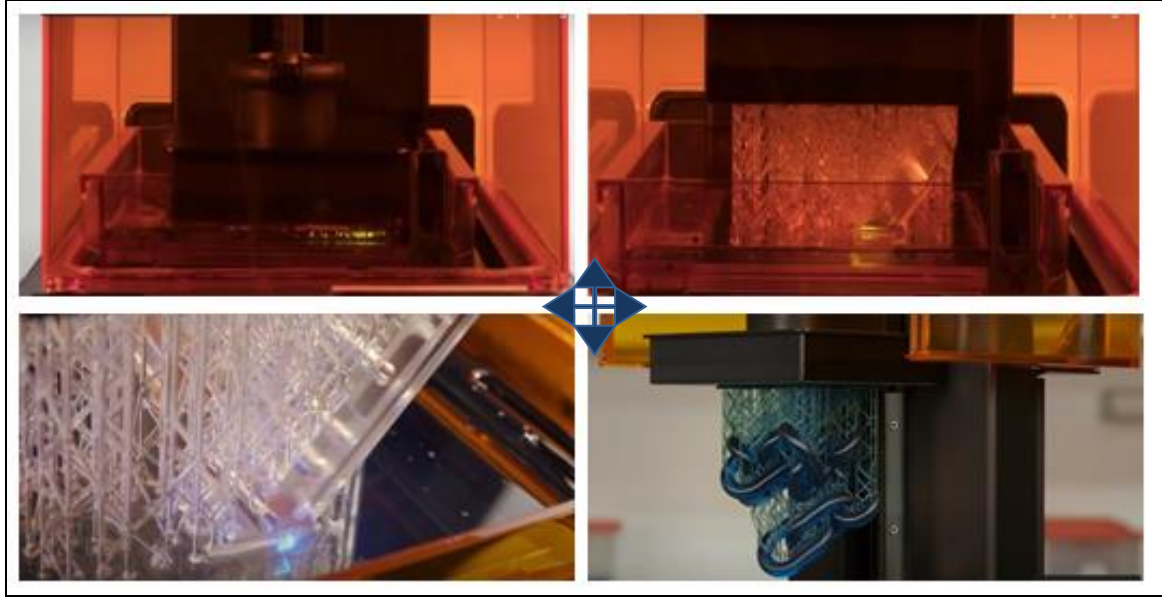
Stereolitografi (SLA) katmanlı imalatı ile mor ötesi ışınlar sayesinde katılaşabilen sıvı reçine vasıtasıyla 3 boyutlu ürünler katmanlı bir yapıda imal edilmektedir. Resim 2.4’de görüldüğü gibi; mor ötesi ışın, imal edilecek katmanın hazırlanmış kesit yapısına uygun bir şekilde cihaz içerisindeki ayna/aynalardan yansıtılarak reçine bulunan yüzeyini tarar ve temas gerçekleştirdiği her bir reçine katmanını hızlıca katılaştırır. Birinci katman katılaştırıldıktan sonra altı hareketli platform tabla, belirlenen katman derinliğinde aşağı yönde hareket eder ve sıra sonraki katmanı kürleştirilerek katılaşması işlemine başlar. Bu işlemler belirlenen katman sayısına göre tekrar tekrar yapılarak tasarlanan ürünün imal edilmesi işlemini gerçekleştirilir [16].



Resim 2.4. Stereolitografi sistemi [16]

Parça üretilirken yapıya destek amacıyla tutamaçlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu destek yapılar imal edilen parçadan mekanik bir yöntem ile ayrılır. Stereolitografi teknolojisinde hammadde olarak bu yönetime özgü foto polimer reçineler kullanılır. Bu yöntemde katman tabakaların her birinin kalınlıklarının düşük seviyede olması nedeniyle; detayları belirgin, katman tabakaların birbirinden fark edilemediği yüzeyler oluşturulabilir.

Diğer katmanlı imalat metotlarından farklı olarak, imal edilen ürün sıvı reçine içerisinden yukarı doğru şekillenerek çıkar. Bu avantajından dolayı girintili formlarda, zıt açılarda ve aynı anda birbirinden ayrı bağımsız parçalar üretilebilmektedir. Yüksek kalitede yüzey çözünürlüğü elde edilmesine karşın, Stereolitografi de üretilen ürünlerin mukavemetleri diğer katmanlı imalat yöntemlerine göre düşük kalmaktadır. Ancak, bu yöntem hızlı prototipleme yapmanın yaygın yollarından biridir. Bunun nedeni oldukça yüksek hızlı ve diğer imal yöntemlerine göre maliyeti düşük bir şekilde oldukça iyi yüzey kalitesinde ve dayanıklı nesneler üretilmesidir [17].



Resim 2.5. Stereolitografi ile imal edilen parça inşası [17]

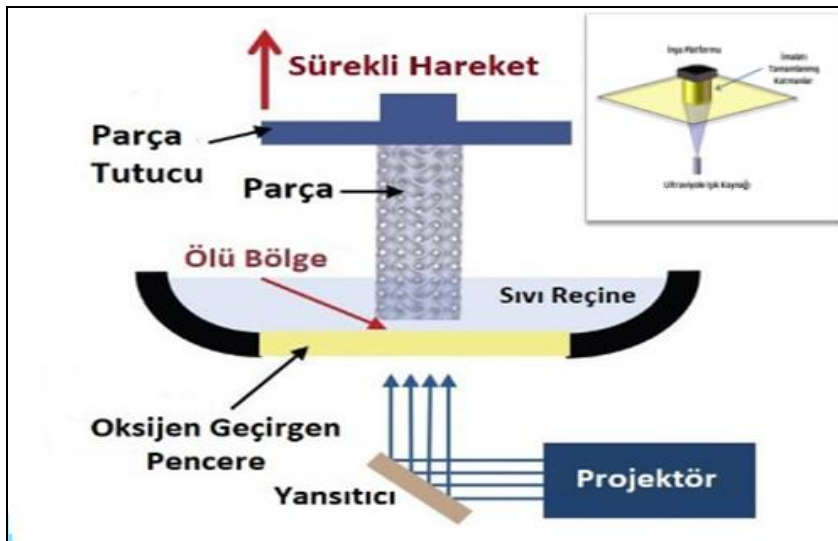
Dijital ışık işleme (Digital light processing – DLP)

Dijital ışık işleme katmanlı imalat teknolojisi ile stereolitografi katmanlı imalat yöntemi arasında çok fazla benzerlik vardır. Ancak aralarındaki en belirgin fark; Stereolitografi katmanlı imalat yönteminde lazer ışını tek tek nokta şeklinde kürleştirme ve katılaştırma işlemini gerçekleştirirken, dijital ışık işleme katmanlı imalat yönteminde bir projektör yardımıyla iki boyutlu düzlem yani katman ultraviyole ışın ile tamamen taranır ve katılaştırılır. Dijital ışık işlemede, ultraviyole projektör genellikle aşağıdan yukarı yöne doğru kürleşme ve katılaştırma gerçekleştirir. Bu nedenle tamamen bir tabaka katman katılacağından stereolitografi katmanlı imalat yöntemine kıyasla daha kısa sürede parça üretilabilmektedir. Hızlı işlem yapılmasından dolayı hızlı katılaşmasının yüzey kalitesini azaltmaktadır. Kısa sürede ancak, düşük yüzey kalitesi için dijital ışık işleme katmanlı imalat kullanılırken, daha düşük hızda ancak daha yüzey kalitesi ve iyi geometrik ürünler için ise stereolitografi katmanlı imalat yöntemine kullanılır. Ayrıca, stereolitografi katmanlı imalat yönteminde kullanılan ultraviyole lazer kaynakları, ultraviyole ışık projektörlerine göre daha maliyetlidir. Bu nedenle bu yöntem tercih edileceği zaman hesaplamaların ve parça üretim sürelerinin iyi hesaplanması gerekmektedir. Katılaşma veya kürleşme çok hızlı olduğundan maliyet ile üretim hızı birbirini dengeleyebilmektedir [18].

Sürekli dijital ışık işleme (Continuous digital light processing – CDLP)

Sürekli dijital ışık işlemede, bir ışık kaynağından çıkan ultraviyole ışınlar ile birinci katmanın tamamen taranmasıyla başlar. Lakin, sürekli dijital ışık işleme teknolojisinde, hareketli platform devamlı olarak yukarı yönde hareket ederek kürlemeyle katılaştırma duraksamadan devam etmektedir. Bu nedenle oluşturulacak programda, parametreler en iyi katılaştırma süresine göre, yazıcıya sürekli, tam anlamıyla gerçek zamanlı, iki boyutlu kesit resimleri, bir diğer deyişle katmanları gönderir. Bu yöntem ile mekanik özellikleri yüksek ve iyi çözünürlüklü imalatlar yapılabilmektedir [19].

Sürekli dijital ışık işleme katmanlı imalat yöntemi üretim hızını, oksijen kaynağından faydalanarak gerçekleştirmektedir. Resim 2.6.'da belirtildiği gibi, dijital ışık işleme yönteminden farkı oksijen yardımıyla “ölü bölge” de çok düşük ölçekli sıvı reçine platformu oluşturarak, her bir katmanın temizlenmesine gerek kalmadan ve katılaştırmanın durmadan devam etmesini sağlamasından ileri gelir [19].



Resim 2.6. Sürekli dijital ışık işleme sistemi [20]

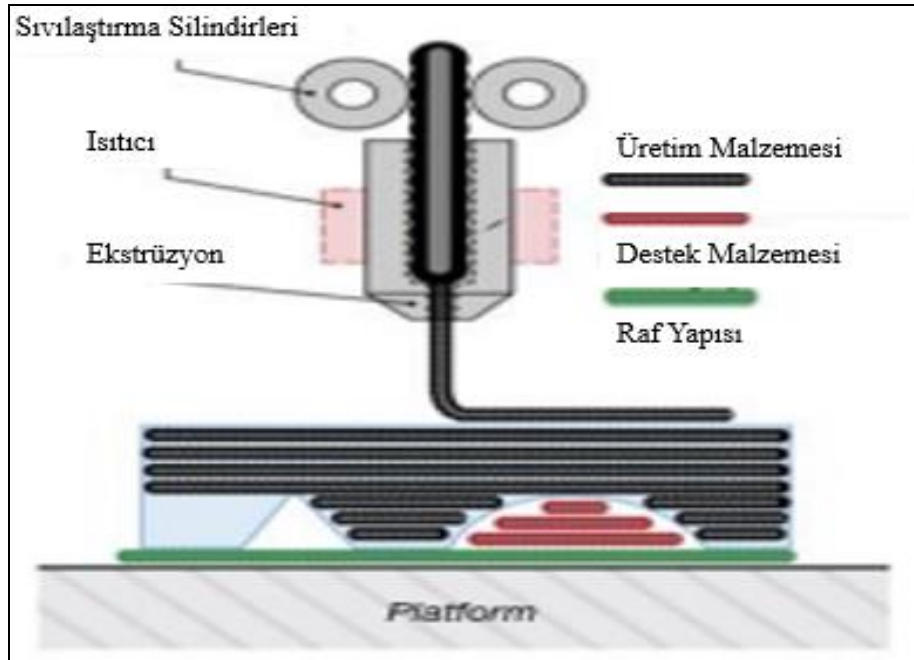
2.3.2. Malzeme ekstrüzyonuyla katmanlı imalat

Malzeme ekstrüzyonu ile yapılan katmanlı imalatlar, genellikle malzemelerin makaralar yardımıyla sıkımının ve kaynak yardımıyla ergitilip ip formunda platform yüzeyinde katmanların teker teker imal edilmesiyle ve bu işlemlerin her bir katman için tekrarlanmasıyla devam ettirilen imalat yöntemleridir.

Ergiyik yığarak modelleme (Fused deposition modelling – FDM)

Ergiyik yığma katmanlı imalat yönteminde ısı verilen bir başlık (üfleme nozulü) içerisine makaralar yardımıyla ham filamentler itilir (Resim 2.7). Nozul çıkış tarafına gelmeden, bir ısıtıcı kaynağı sayesinde filamentler ergitilerek tabla üzerinde programlanmış alanlarda katılaşmak üzere katmanlar oluşturulur [21].

FDM üç boyutlu imalat teknolojileri içerisinde geometrik ölçülerin doğruluğu ve aynı prosesin hızlıca tekrarlanıp güçlü yapıda ve dayanıklı parçalar oluşturmak için kullanılan en iyi yöntemlerdendir. Sıcaklık kontrollü bir kafanın malzeme tabakasını platform üzerinde tabaka halinde geçirilen filamentler ile işlem tekrarlanarak katmanlar halinde ürünün inşası gerçekleşir. Tasarıma göre gereken durumlarda suda çözülebilecek yapı malzemesi kullanılarak istenildiği zaman, parçanın içine ana yapıyı ayakta tutacak destek yapı da oluşturulabilir. Su veya diğer karışımlarla çözülebilen malzemeler, destek yapılarında kullanılarak, yazdırma işlemi sonunda, çözündürerek nihai imal edilen üründen ayrıştırılabilir. Destek yapılar inşa etmek ve değişik renkler elde etmek hedefiyle cihazlardaki nozul başlık sayıları artırılarak, aynı anda farklı malzeme esaslı filamentler bu nozullara itilerek daha gelişmiş bir imalat işlemi yapılabilir. Nihai ürün sonrasında boyama, parlatma ve kaplama gibi yüzey işlemleri uygulanabilmektedir [22].



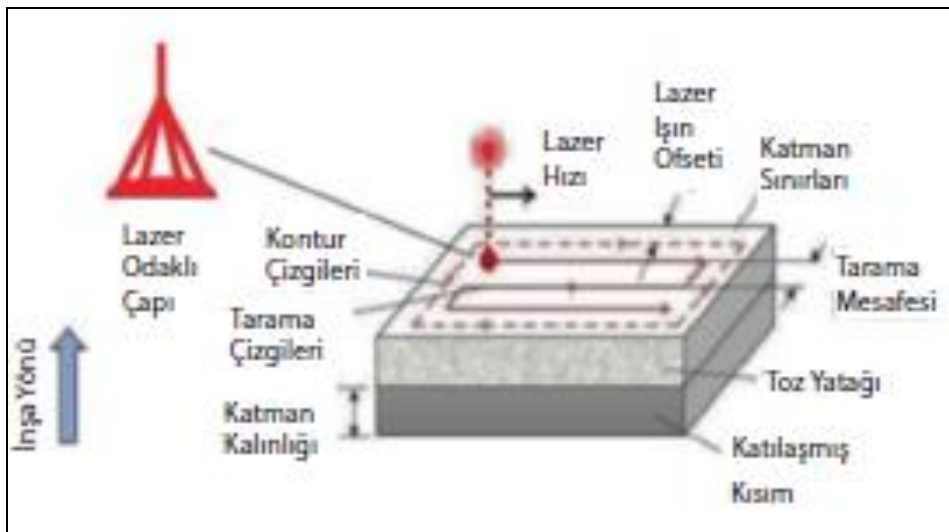
Resim 2.7. Ergiyik yığarak modelleme sistemi [22]

2.3.3. Toz zemin üzerinde lazer füzyon

Katmanlı imalat yöntemlerinden biride lazer gücünü kullanarak toz zeminde füzyon işleminin gerçekleştirilmesidir. Toz haldeki polimer, seramik, metal veya karışım malzemelerin lazer gibi bir güç kaynağından yararlanarak, ısıtılıp eritilerek toz malzemenin kaynaştırılması prensibine dayanmaktadır.

Seçici lazer sinterleme (Selective laser sintering – SLS)

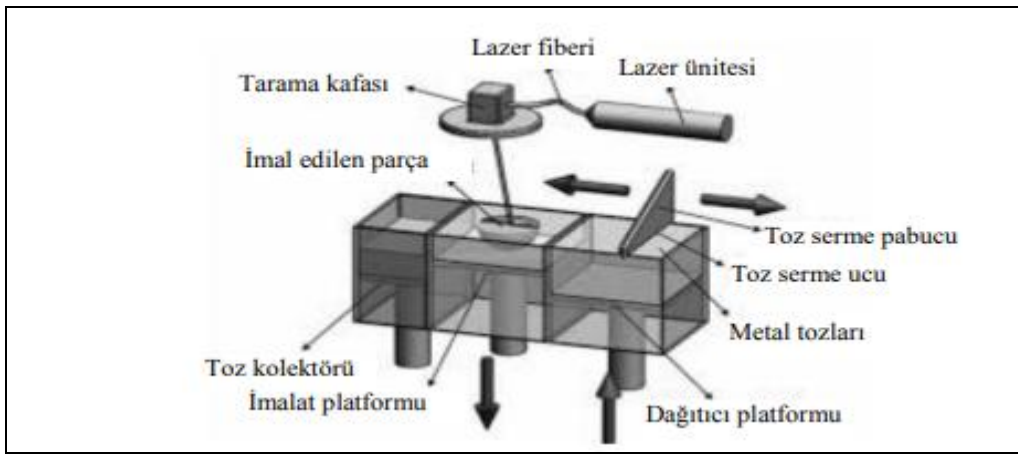
Seçici lazer sinterleme ile katmanlı imalat teknolojisi toz durumundaki malzemelerin (polimer, seramik ve metal tozlar); lazer kaynağının aynalar vasıtasıyla tablaya yansıtılarak yarattığı ısı sayesinde, ergime noktalarının hemen altındaki bir sıcaklıkta birbirlerine sinterlenerek (kaynaştırma) tabakalar halinde parça oluşturulmasıdır (Resim 2.8.). Bu katmanlı imalat yöntemi ile imal edilen parçalarda %100'e yakın yoğunluk elde edilebilir. İmal edilen parçaların mekanik özellikleri, klasik imalat yöntemleriyle imal edilen ürünlere çok benzerdir. Cihaza bağlı olarak SLS yöntemiyle aynı anda birden fazla parça üretilebilir. Bu noktada önemli olan faktör, zamanla birlikte kullanılan makinenin imalat kapasitesiyle doğru orantılıdır. İstenen parçalardan aynı anda birden fazla imal edilebilirken tezgâh başlığına göre aynı anda birden fazla yapı inşa ederek zamandan büyük kazanım sağlanır [23].



Resim 2.8. Seçici lazer sinterleme sistemi [23]

Doğrudan metal lazer sinterleme (Direct metal laser sintering – DMLS)

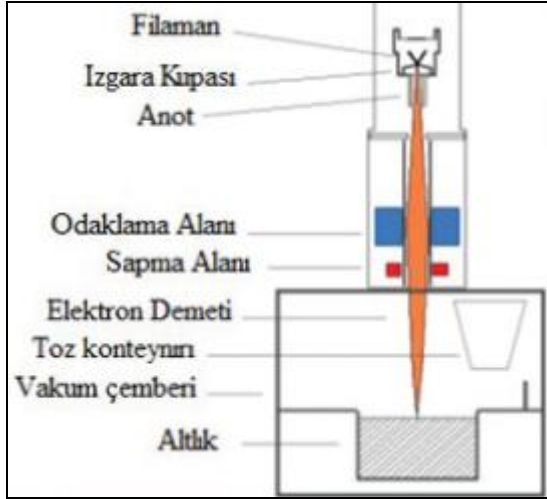
Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) katmanlı imalat yöntemi (Resim 2.9.), SLS katmanlı imalat yöntemiyle çok benzerdir. Aralarındaki en büyük ayırıcı etmen, SLS teknolojisi genellikle polimer-seramik tozlar için kullanılırken DMLS katmanlı imalat teknolojisinin çoğunlukla metal tozlarının kullanımına uygundur. İmal edilen ürünlerde yüksek hassasiyetli geometrik şekil ve toleransları isteniyorsa imalattan sonra ısıl işlemler ile iç gerilmeler giderilebilir [24].



Resim 2.9. Doğrudan metal lazer sinterleme sistemi [25]

Elektron ışınyla ergitme (Electron beam melting)

Bir elektron ışınının seçici olarak metal tozunu ergiterek tasarlanan şekilde karmaşık parça üretiminin sağlandığı bir toz yataklı füzyon katmanlı imalat işlemidir (Resim 2.10.) [26]. Lazer ve elektronun farklı doğaları nedeniyle, lazer sistemlerinden farklı olarak daha iyi mikro yapılar ve daha az kusurlar oluşmaktadır. Elektron ışınının lazer ışınından daha yüksek güç yoğunluğu nedeniyle elektron ışınyla ergitme (EBM) süreci, SLS sürecinden nispeten daha yüksek kalitede üretkenliğe sahiptir [27].



Resim 2.10. Elektron ışınıyla ergitme sistemi [28]

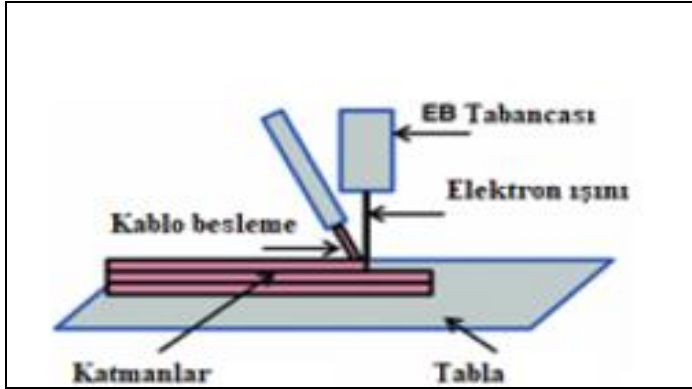
2.3.4. Tel Beslemeli Katmanlı İmalat

Bu katmanlı imalat yöntemlerinde enerji kaynağı olarak elektrik arkı, ham besleme malzemesi olarak tel formunda kat malzemeler kullanılmaktadır [29].

Tel elektron ışını katmanlı imalat (Electron beam additive manufacturing – EBAM)

Katmanlı imalat tekniklerinden biri olan elektron ışını eklemeli üretim (EBAM), yüksek yoğunluklu metal parçalar üretebilen teknolojilerden biridir. Yapısal bileşenlerin doğrudan dijital tabanlı olarak üretimini sağlayarak katmanlı imalat uygulamalarını büyük ölçüde genişletmiştir [30]. Telden eriyik havuzuna sabit bir hızda malzeme ilavesiyle kararlı bir eriyik havuzunun oluşumu için enerji girişi ve tel beslemesinin uygun parametrelerde ayarlanması prosesin iyi sonuçlar vermesi için oldukça önemlidir [31]. Bu parametreler yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluk gibi nihai ürünün kalitesinde önemli rol oynar [32].

Tel elektron ışını katmanlı imalat teknolojisiyle elektron ışın ergitme teknolojisinin birbirinden farkı ise tel elektron ışını katmanlı imalatın toz yataklı bir imalat tekniği olmayıp, toz ham malzemenin bir başlık ile püskürtülmesi veya ham malzeme olarak toz metal yerine tel ham malzemenin kullanılabilmesidir [5].

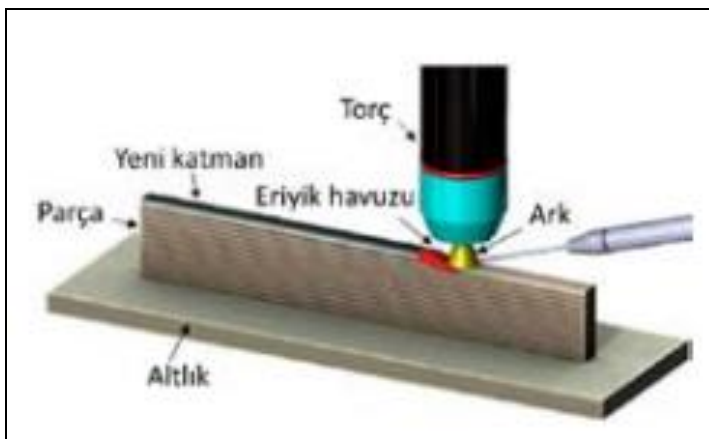


Resim 2.11. Tel elektron ışını katmanlı imalat sistemi (EBAM) [33]

Tel ark katmanlı imalat (Wire arc additive manufacturing - WAAM)

Tel ark katkılı imalat (WAAM), tel besleme stoğunu eritmek ve bir parça formunu katman katman biriktirmek için füzyon kaynağı olarak bir elektrik arkı kullanan tel tabanlı bir katmanlı imalat tekniğidir (Resim 2.12.) [34].

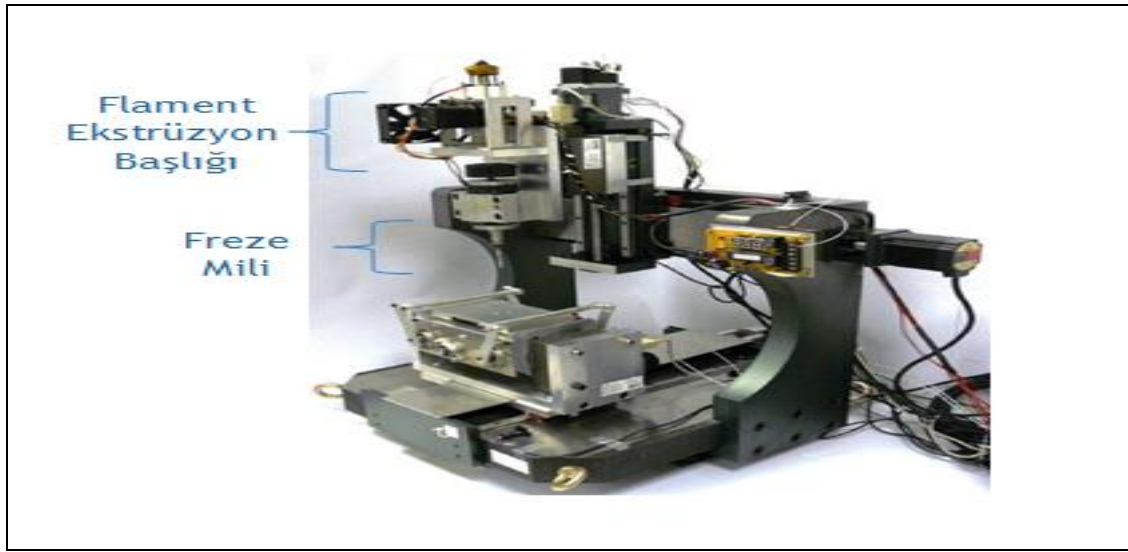
Düşük hammadde maliyeti nedeniyle diğer katmanlı imalat yöntemlerine göre ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, hammadde olarak metal telin maliyeti, toz hammadde maliyetinin genel olarak düşüktür [35]. Kullanılan telin beslemesi kontrollü bir şekilde yapılarak ergitilir ve istenen yapıda istenen miktarda katmanlar oluşturulur [36]. Büyük ölçüde ham malzeme kullanımı yani çok düşük seviyede ham malzeme atık miktarı avantajıyla çevreci bir katmanlı imalat tekniğidir. Tel ark eklemeli imalat yöntemi boyutsal olarak büyük ölçekte parçaların düşük maliyetle ve yüksek hızda üretilebilmesi potansiyeline sahiptir [37].



Resim 2.12. Tel ark katmanlı imalat sistemi (WAAM) [38]

2.3.4. Hibrit sistemli katmanlı imalat

Katmanlı imalatlarda üretim sürecinden sonra nihai ürün üzerinde, tasarlanan teknik ölçüleri ve geometrik toleransları yakalayabilmek için talaşlı imalat yöntemlerine ihtiyaç duyulabilir. Bu ihtiyaçlardan dolayı hibrit katmanlı üretim tezgâhları olan hem katmanlı imalat yapabilen hem de sonrasında yüzey işlemlerinin yapılabileceği üretimi ve üretimdeki zamanı kısaltan cihazlar geliştirilmiştir (Resim 2.13.) [39].

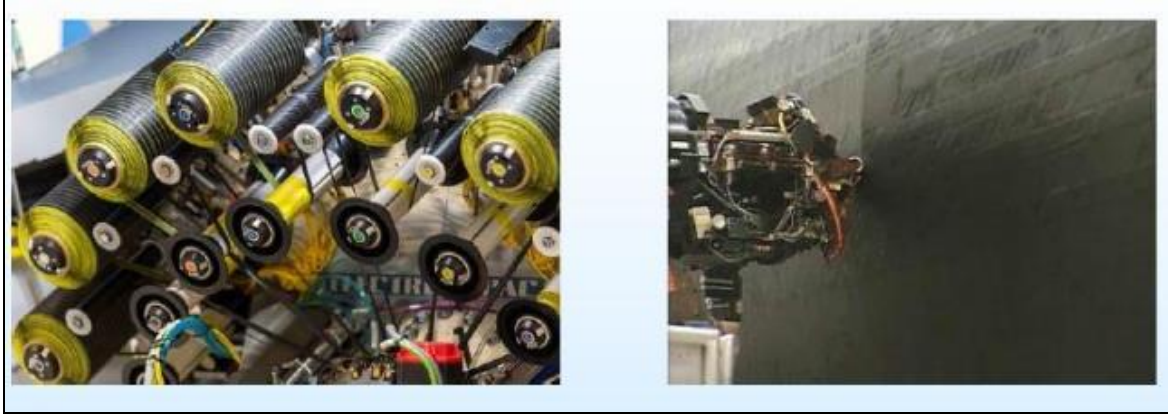


Resim 2.13. Ekstrüzyon ve freze işlemlerini birlikte yapabilen hibrit üretim tezgahı [39]

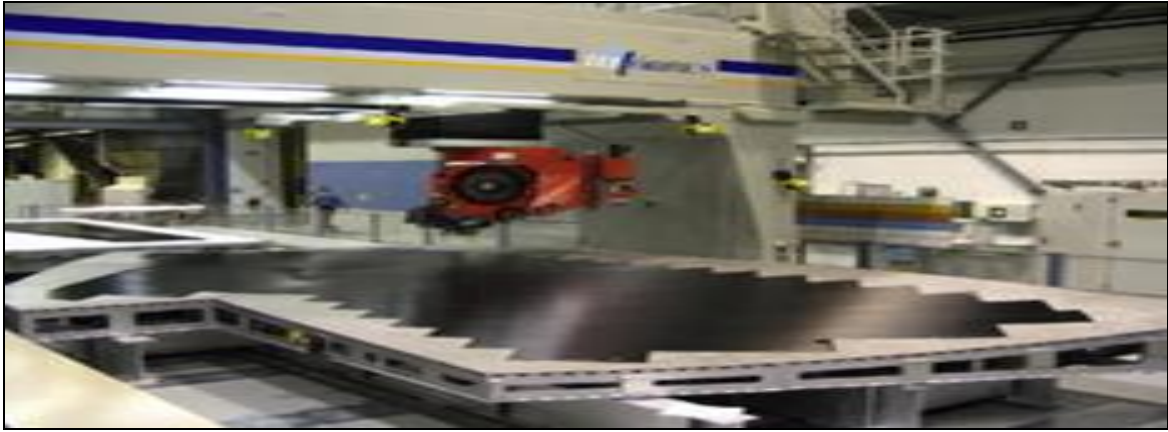
2.3.5. Kompozit otomatik bant döşeme (Composite automated tape laying)

Havacılık sektöründe yeni bir çağ başlatan özel prosesler ile üretilen kompozit malzemeler günümüz teknolojilerinde katmanlı bir şekilde imal edilebilmektedir. Kompozitler için en köklü otomatik üretim tekniklerinden biri olarak kompozit otomatik bant döşeme teknolojisi görülmektedir. Döşeme yapılacak kumaş bantlar, makaralar yardımıyla katmanlaştırılacak nozul ucuna gönderilerek burada reçine ile harmanlanarak kalıplara serimi gerçekleştirilir (Resim 2.14. ve 2.15). Bu süreç belirlenen parça kalınlığı elde edilene kadar tekrarlanan katmanlardan oluşmaktadır. Geniş tek yönlü bantlar, üretilmekte olan parçanın karmaşıklığına bağlı olarak değişen derecelerde varyasyona sahip yüklü bir silindir sistemi kullanılarak bir parça kalıbı üzerine serilir. Otomatik bant döşeme, esasen fiber kumaş bandının manuel olarak kopyalar şeklinde yerleştirilmesidir. Ancak bu işlemler daha yüksek hızlarda, daha büyük parçalara ve daha fazla işlem kontrolü sağlanarak yapılmaktadır. Bu modern sistemler, bant başlangıcı, kesimi ve oryantasyonu üzerinde

hassas bir kontrole sahiptir ve bu da laminanta (katmanlı kompozit yapı) ek katlar eklemekten daha karmaşık takviyeler eklemelerine olanak sağlamaktadır [40].



Resim 2.14. Kompozit otomatik bant döşeme makara ve serim gösterimi [41]



Resim 2.15. Kompozit otomatik bant döşeme serim gösterimi [41]

2.3.6. Termal spre y katmanlı imalat

Bu kısma kadar anlatılan katmanlı imalat yöntemleri genellikle 3 boyutlu parça üretiminde kullanılan tekniklerdir. Ancak, katmanlı imalat yöntemleri ile yüzey işlemleri de (kaplama gibi) yapmak mümkündür. Bunlar, genellikle termal spre y (püskürtme) katmanlı imalat yöntemleri olarak ifade edilmektedir.

Japonya'da kurulan yüzey geliştirme araştırma ve teknolojileri komitesi, yüzey geliştirme teknolojilerinden ince film kaplama teknolojilerini ve termal spre y kaplama gibi teknikleri günümüzde 3 boyutlu baskı veya imalat olarak görmektedir. Teknik açıdan termal spre y ve sert dolgu gibi teknolojiler, kalın kaplamaları katmanlayarak 3 boyutlu şekiller

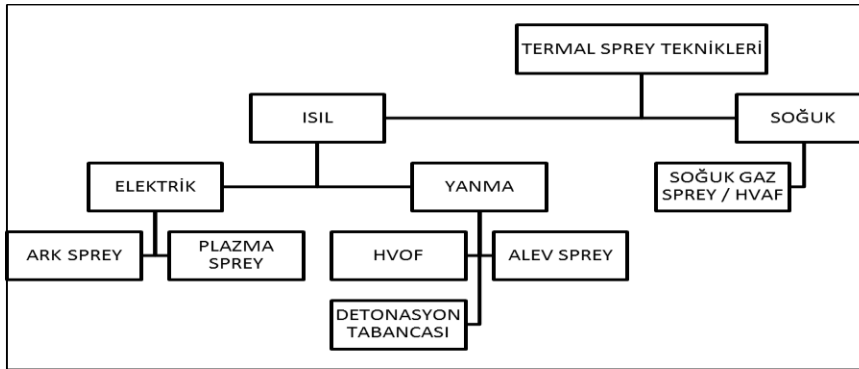
oluşturdukları için doğrudan katmanlı imalat kategorisinde sınıflandırılmaktadır [42] Termal spre, yüzey özelliklerini ve bileşenlerini tasarlayarak değiştirmek için önemli ve çevre dostu bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Taşıma, enerji, malzeme çıkarma ve işleme, biyomedikal ve elektronik uygulamalar dahil olmak üzere birçok endüstriyel sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır [43].

Havacılık sektöründe kullanılan parçalardan, daha yüksek enerji verimliliği ve daha iyi mekanik özellikler göstermesi beklenir. Daha yüksek sıcaklıklar ve hızlardaki etkiye karşı iyi bir performans verebilmesi için yüksek mukavemetli, yüksek sıcaklığa dayanımlı alaşımlar kullanılmaktadır. Ancak mukavemet sınırları ve alaşım gelişimi geline nokta beklenileri karşılayamamaktadır. Beklenen performansı gerçekleştirmek için geliştirilmiş kaplamalara ihtiyaç bulunmaktadır. Bu nedenle bu parçalarda termal spre kaplamaların kullanımı giderek daha önemli hale gelmektedir [44]. Ağırlık tasarrufunun birincil öneme sahip olduğu havacılık ve uzay endüstrisi de dahil olmak üzere çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda farklı tipte termal spre kaplamalar kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda özellikle iniş takımları, hidrolik silindirler, aktüatörler, pervane göbeği tertibatları, gaz türbini motorları vb. bölümlerde mekanik dayanımı geliştirmek için WC bazlı termal spre kaplamalar kullanılmaktadır [45]. Termal spre teknikleri, uçak gövdelerinin alüminyum kısımlarında hasarlanan ve zarar gören dış bölgelerin onarılmasında da yaygın olarak kullanılmaktadır [46].

Ergiyik püskürtmeyle biriktirme teknolojisi olan termal püskürtme (TS), bileşenlerin aşırı sıcaklığa, aşınmaya ve aşındırıcı ortamlara maruz kaldığı çeşitli uygulamalarda koruyucu kaplama amacıyla yaygın olarak kullanılır. Prosesin temel avantajları, malzeme seçimi, ölçeklenebilirlik, mikro yapıları uyarlama yeteneği ve çok sınırlı termal girdi ile küçük ve büyük bileşenler üzerine biriktirme yeteneği olarak sayılabilir [47]. Termal spre yöntemiyle püskürtülen tozlar çarpmanın ardından püskürtülen yüzeye bir bağ oluşturur ve sürecin devamında biriken partiküller kalınlık oluşturarak katmanlı bir yapı inşa eder. Bu katmanlı yapının özellikleri; yoğunluğa, püskürtülen partiküller arasındaki kaynaşma (kohezyona) ve partikülün altlık (substrat) yüzeyine yapışmasına bağlıdır. Ancak birçok malzeme için yüksek işlem sıcaklığı, çözünme ve delaminasyon nedeniyle kaplamalarda yapısal kırık ve çatlamlar olabilir [48].

Genel olarak termal sprey prosesi, ergiyik haldeki malzeme için bir gaz akışının yardımıyla gaz atomizasyon işlemine benzetilebilir. Ergiyik malzemelerin bir yüzeye katman şeklinde katı formda biriktirilmesi olarak tanımlanır [49]. Termal sprey işlemlerine bakıldığında bir malzemenin enerjiyle ergiyik olarak deformasyonu sonrasında yüzeyde katmanlaştırılarak katılaştırılması işlemi yapılmaktadır. Bu termal sprey prosesi, parametrelerine göre yüksek gözeneklilik seviyesi, oksidasyon, faz dönüşümü gibi çeşitli etmenlerden dolayı olumsuzluklar oluşturabilir. Ancak seçilen toz, altlık, basınç, ergime sıcaklığı gibi etkenler ile bu olumsuzluklar giderilebilir [46].

Üretimi yapılan ve zor koşullar altında çalışması istenen parçalara, birçok geliştirici özellik kazandırmak için gelişmiş kaplamalar gerekmektedir. Bu özellikler; aşınma, korozyon, ısı, oksidasyon ve elektrik direncinin yanında, elektriksel iletkenlik, yorulma mukavemeti, boşluk kontrolü, kendi kendini iyileştirme, kendi kendini temizleme, yapışmazlık, su iticilik, anti-mikrobiyalılık olarak sıralanabilir. Termal sprey kaplama bu beklentileri karşılayan en önemli imalat dallarından biridir [50]. Termal sprey kaplamalar temel olarak bir püskürtme tabancası yardımıyla tel ya da toz malzemelerin ergiyik halde püskürtülerek katmanların oluşması prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemleri birbirlerinden ayıran en önemli farklılık enerji kaynağı veya türüdür. Termal sprey katmanlı imalat yöntemleri aşağıda verilmiştir. Termal sprey ile katmanlı imalat yöntemleri genellikle aşınmaya, korozyona dayanım gibi parça mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır [51]. Termal sprey katmanlı imalat yöntemleri aşağıda verilmiştir (Şekil 2.2.).

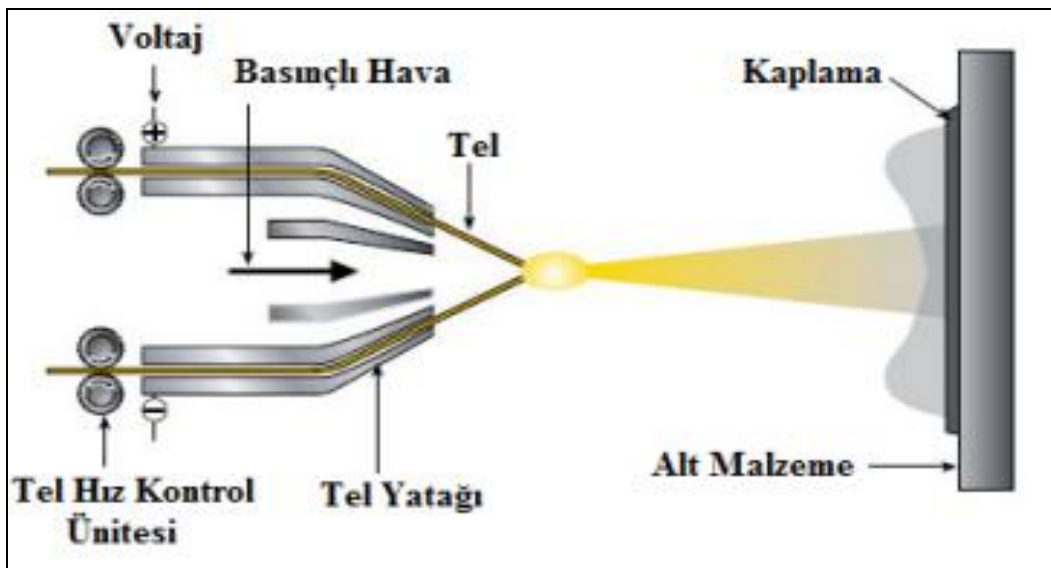


Şekil 2.2. Termal sprey tekniklerinin gösterimi [52]

Elektrik ark sprey

İyon yükü olarak ters kutuplar ile yüklenmiş, iki farklı kaplama malzemesini bulunduran teller ark oluşturularak ergimeleri sağlanır. Ergimiş metal malzeme basınç ile sıkıştırılmış gazlar (genellikle hava) vasıtasıyla atomizasyon işlemi gerçekleştirilir. Bu yöntem, yüzeyi temizlenmiş altlık plaka üzerine püskürtme işlemi yapılarak kaplama işlemi gerçekleştirilir. Elektrik ark sprey kaplama yönteminde; herhangi bir gaz ateşi ya da elektrik yardımıyla plazma benzeri ayrı bir ısı oluşturuca bulunmamaktadır (Resim 2.16.). Bu durum diğer termal sprey yöntemlerinden ayırmaktadır. Bu nedenle en ekonomik, maliyeti düşük termal sprey yöntemlerinin başında gelmektedir [53]. Isıl verim, bakım kolaylığı, malzeme ve ekipman maliyetleri, yatırım maliyetleri açısından değerlendirildiğinde öne çıkan bir termal sprey prosesidir [54].

Elektrik ark sprey yönteminin en önemli avantajları altlık olarak kullanılan plakalara düşük seviyede ısı uygulanmasından dolayı çok düşük gerilme meydana gelir. Daha büyük bağ kuvveti ve daha yüksek kaplama kalınlıkları sağlanabilmektedir. Metal olmayan plastik, cam gibi malzeme üzerlerine de uygulanarak yoğun, tamamen ergime sağlamış partiküller ile kaplama yapılabilmektedir. Diğer termal sprey kaplama yöntemlerine göre maliyetleri uygundur. En büyük dezavantajlarından birisi de püskürtülen malzemelerin katılma sürecinde okside maruz kalarak kaplama işleminin başarı durumunu etkiler [55].



Resim 2.16. Ark sprey yöntemi [56]

Plazma sprej

Bilimsel açıdan değerlendirdiğimizde plazma sprej yöntemi, enerji transferi esaslı bir işlemdir. Elektriksel iyon yükü uyarılmış yüksek potansiyel bir alandan plazma gazlarına enerji transferi yapılır ve elde edilen plazma enerjisinin kaplama tozlarına aktarımı sağlanır. Bu işlem sonrasında yüksek kinetik ve termal enerjiye sahip tozların plazma jeti içerisinde ergimesi ve elde edilen kinetik enerji ile uçuşu sonucunda altlık yüzeyinde kaplamanın yapışması ve birikmesi ile gerçekleştirilen bir kaplama işlemidir. Plazma sprej yönteminin başarısı bu üç aşamalı enerji çevriminin etkinliği ile ilişkilidir. Plazma sprej yönteminde plazma tabancası ile altlık arasındaki sprej mesafesi boyunca plazma-toz arasında enerji transferinin uygun şekilde sağlanabilmesi kaplama kalitesini ve performansını belirlemektedir [52].

Alev sprej

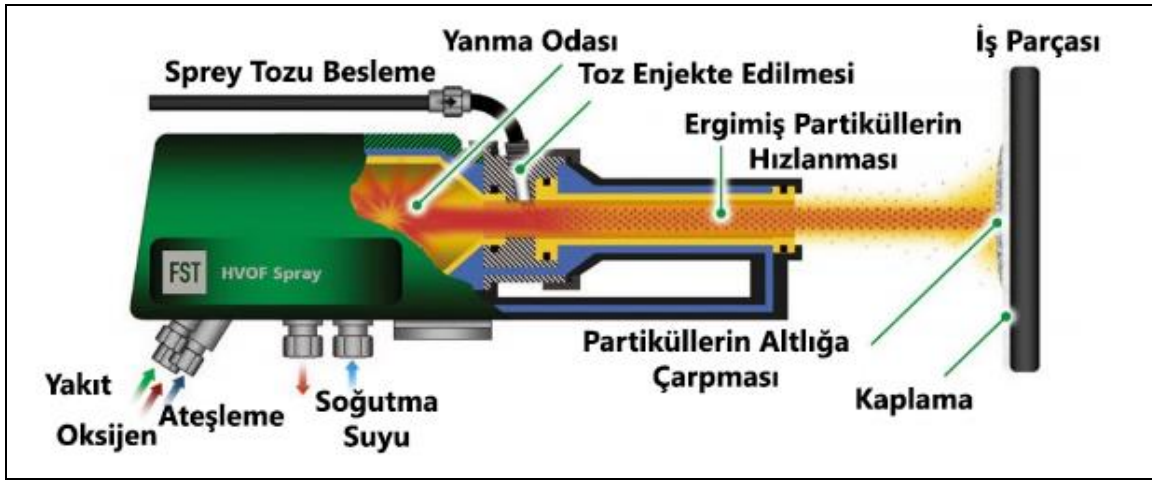
En eski termal sprej yöntemidir. Toz ve tel malzeme kullanan alev sprej yöntemleri bulunmaktadır. Alev sprej yönteminde ilk başlarda teller, asetilen ve oksijenle yakılarak elde edilen alevde kaplama işlemi yapılırken, daha sonra toz ham malzeme olarak kullanılmaya başlanmıştır. Alev sprej yönteminde asetilen, propan veya hidrojen, oksijen ile birlikte yakılarak alev elde edilir. Bu yöntem düşük basınçlı oksijen yakıt kaplama sistemi olarak kabul edilir [43].

Oksijen ve yanma tepkimesi sağlayacak gaz karıştırılıp yakılarak, taşıyıcı gaz vasıtasıyla aleve tozları götürerek ergimiş toz veya yarı eriyik hale getirilir. Gazlar nedeniyle oluşan basınçlarının da tepkimesiyle partiküller hızlanır ve hedef malzeme yüzeysel olarak kaplanır. Bu noktada önemli faktörlerden biri gazların alev sıcaklığıdır. Kaplama malzemesi olarak tozların cinsine göre kullanılacak yakıt değişiklik gösterecektir. Örnek verilirse, oksijen-asetilenin alev sıcaklığı 3100 °C iken oksijen-hidrojen yakıtın 2700 °C. Termal sprej kaplamada temel hedef toz ya da tel formdaki ham maddeyi eriyik veya yarı eriyik hale ulaştırmak olduğu için alev sıcaklığının yeterli olmadığı durumlarda bu teknik başarıyla kullanılamamaktadır. Alev püskürtme yönteminin düşük ilk yatırım maliyeti, yüksek dolgu oranı ve düşük bakım masrafı en önemli olan üstün özellikleridir. Ancak düşük bağ mukavemeti, kaplama tabakasındaki yüksek boşluk seviyesi ve düşük çalışma sıcaklığı yöntemin olumsuz olan özellikleridir [57].

Yüksek hızlı oksijen yakıtlı termal sprey kaplama (HVOF)

Termal sprey kaplama yöntemlerinin yeni keşfedilen tekniklerindendir. Oksijen ve yakıt gazı yüksek basınçlarda kullanılır. Kullanılan gazlar propan, propilen ve hidrojenidir. Yanan gaz karışımı süpersonik hızlara ulaşır. Bu sırada kaplama tozu alev bölgesine gönderilerek kaplama yapılır. HVOF, termal enerji girişini minimize ederken, kinetik enerjiyi en yüksek derecelere ulaştırır. Böylece yüksek bağ mukavemetli, yoğun, porozitesi az kaplamalar elde edilir. Jet motoru parçalarında aşınma dayanımı uygulamaları için kullanılır. HVOF kaplama yöntemiyle gaz hızı 2100 m/s hızı aşarken, partikülü 400-800 m/s hıza ulaştırır. Bu değer diğer alev sprey yöntemlerinden çok fazladır. Gaz yakıtların yanında kerosen (gaz yağı) gibi sıvı yakıtlarda kullanılabilir [57].

Düşük gözenekli ve yüksek yapışma özelliğine sahip kaplamalar üretmek için özellikle HVOF (yüksek hızlı oksiyakıt) en gelişmiş imalat tekniklerinden biridir [58]. Bu gelişmiş imalat teknikleri, parçanın kullanım ömründe bir uzatma sağlamak veya belirli bir proseste daha yüksek verimle çalışarak performans gelişimi gibi amaçlar için kullanılır [59].



Resim 2.17. HVOF tabanca gösterimi [57]

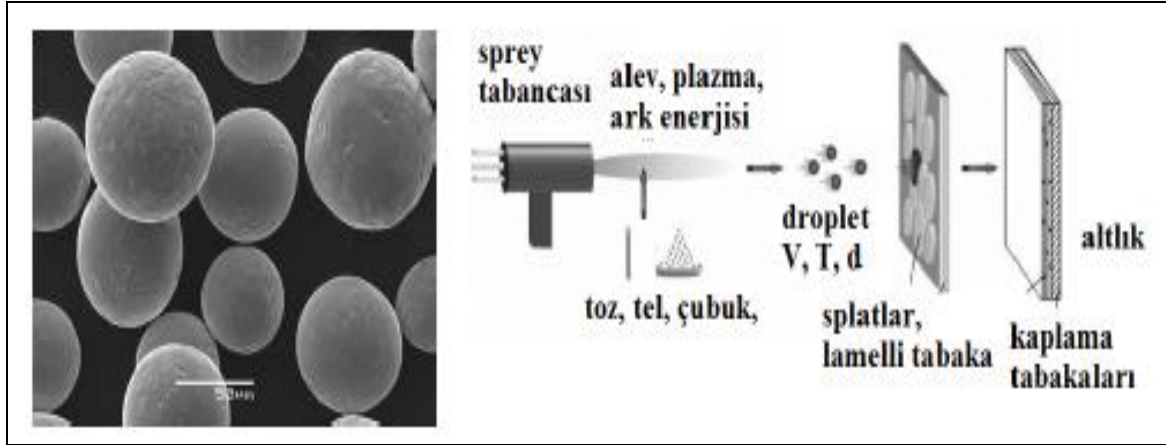
Havacılık ve uzay, petrol, petro-kimya, kağıt sektörü gibi sürtünme ve aşınma dayanımı gereksinimi olan sektörlerde sert krom kaplama HVOF ile yapılabildiği için; PVD, CVD ve nitrürleme gibi kaplama yöntemlerine alternatiftir. Yüksek kinetik enerji sayesinde düşük poroziteli kaplama üretilmektedir. Yüksek gürültü sebebiyle, işçi sağlığı ve iş güvenliği açısından bu gibi kaplamalar özel yalıtımlı kabinde yapılmalıdır. HVOF ünitesi

portatif de olabilir, bu durumda operatör kulaklık, maske, gözlük gibi iş güvenliği ekipmanları kullanmalıdır [57].

Özellikle, yüksek hızlı oksî-yakıt (HVOF) yaygın olarak birkaç faydalı özelliğinden dolayı tüm termal püskürtme teknikleri arasında tanınan tekniktir. HVOF kaplamalar tipik olarak oksidasyon içermez, alt tabaka ile güçlü bir bağ sergiler ve düşük gözenekli, yüksek sertliğe sahip yoğun kaplamalar biriktirir [60]. Yapılan kaplamalardaki gözeneklilik, parçaların korozyon direncinde önemli bir rol oynadığından, HVOF kaplamalar, düşük gözenekli kaplamalar olmasından dolayı korozyona dayanıklılığıyla ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, HVOF kaplamaların bileşimi, püskürtülen tozların yapısıyla hemen hemen aynıdır. HVOF termal sprey tekniğinde kaplamaların kalitesi önemli ölçüde, alt katman yüzeyine püskürtülerek çarpan toz parçacıklarının sahip olduğu hıza ve enerji kaynağıyla sağlanan sıcaklığa bağlıdır. Bu da sırasıyla yanma odasında gelişen gaz basıncı ile ilişkilidir. Propan, hidrojen, asetilen, metan ve etilen HVOF termal sprey prosesinde kullanılan en yaygın gazlardandır [61].

Detonasyon tabancasıyla termal sprey

Detonasyon tabancasıyla püskürtme, yüzey özelliklerini değiştirmek için bir malzemeye süpersonik hızlarda koruyucu bir kaplama uygulamak için kullanılan birçok termal püskürtme tekniğinden biridir. Bu öncelikle bir bileşenin dayanıklılığını artırmak için uygulanır. Bu işlem, aşınmaya dayanıklı kaplamalar olarak faydalı olan çok sert ve yoğun yüzey kaplamalarının uygulanmasına elverişli termal sprey yöntemidir. Tüm termal sprey ile kaplama yöntemlerinde kısmen ya da tamamen ergitilmiş olan malzeme hızla yüzeye püskürtülür ve katmanlar halinde lamelli bir kaplama tabakası oluşur. Ergitilen malzemeler toz, tel veya çubuk formunda olabilir. Bu tipteki ham malzemelerin ergitilmesinde plazma, ark veya alev gibi bir ısı kaynağı kullanılır [62].



Resim 2.18. Patlamalı termal spreyle katmanlı imalat sistemi [62]

Katmanlı imalat yöntemlerinden biri olan termal spreyle kaplama uygulamalarında oluşturulan kaplama yoğunluğunun yüksek olması, düşük gözenekler ve yüksek güçte bağ mukavemeti vardır. Bu özelliklerin oluşmasındaki temel faktörler yanma parametreleri, alev hızı ve kullanılan gaz dinamikleri yer alır [53].

Ateşlenme gerçekleştikten sonra oluşan kimyasal reaksiyon ortam ısını artırır. Sıcaklığın artmasıyla oluşan basınç, gazların yüksek hızlara çıkmasını sağlar. Böylece kimyasal reaksiyondan elde edilen ısı ve basınç, tozları eritmek ve hızlandırmak için kullanılır. Sıcaklık, basınç, gaz kompozisyonu, gaz yoğunluğu ve gazın ilerlediği ortam hızı etkileyen en önemli değişkenlerdir [63].

Soğuk spreyle

Soğuk spreyle prosesi metalik toz partiküllerinin aşırı yüksek hız ile süpersonik seviyelerde hızlandırılarak istenen tabakaya çarpmaları neticesinde parçacıkların deformasyona uğrayarak yüzeyde birikip katman oluşturmasını sağlayan bir süreçtir. Soğuk spreyle, soğuk gaz spreyle, kinetik metalizasyon, dinamik spreyle, Yüksek hızlı hava-yakıt (HVOF), yüksek hız yüzeyde toz biriktirme prosesi gibi farklı isimlendirmelerle bilinmektedir. Termal spreyle yöntemlerinden biri olan soğuk spreyle, termal spreyle tekniklerinden kaplama tozlarının eritilmesinde fazladan bir enerji kaynağına ihtiyaç duyulmaması nedeniyle farklılık göstermektedir. Kaplamada kullanılan tozlar yüksek püskürtme hızlarıyla plastik deformasyonla yüzeye biriktirilmekte olup katman katman tabakalar oluşturmaktadır [64].

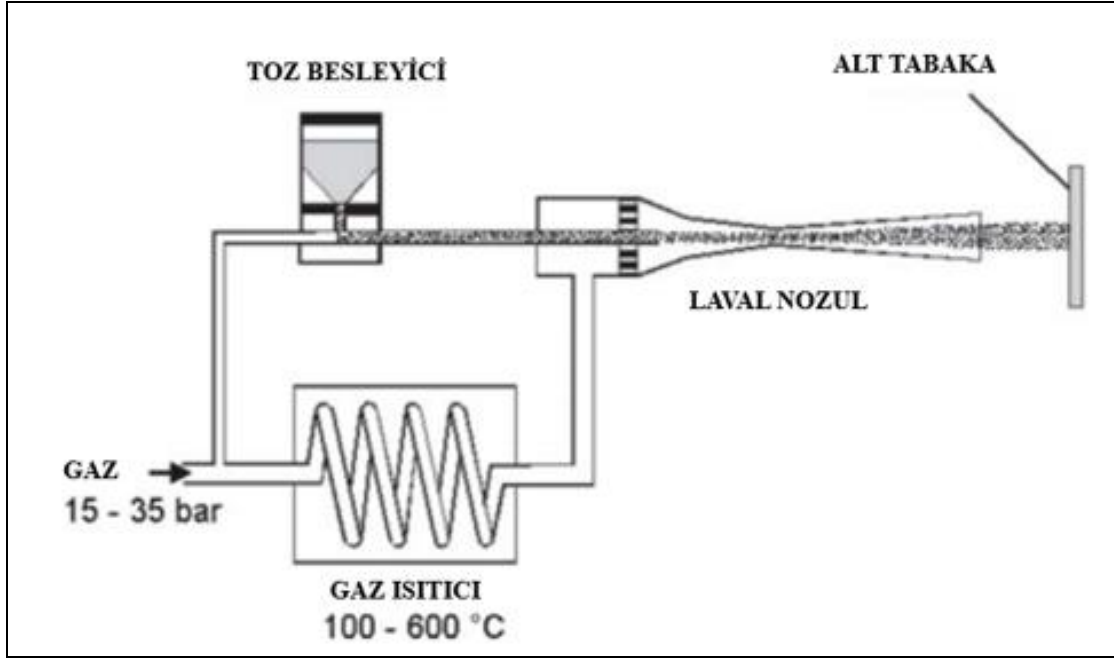
Genel olarak soğuk spreyci kaplamalar, kalın kaplamalar/katmanlar oluşturmaya el verişli yapılar içerir. Bu yönden yalnızca bir yüzey kaplaması oluşturmak için değil, aynı zamanda bir katmanlı imalat süreci olarak parçaları onarmak, yeniden inşa etmek veya yenilemek için de tercih edilen bir yöntemdir. Soğuk spreyci tekniğinde tamirler korozyon, oksidasyon, aşınma koruması sağlarken diğer açıdan boyutsal yapı oluşumunuda hedeflemiştir. Parçaya inşa edilmesi için püskürtülen metal tozu, restore edilen parça ile aynı metal olabildiği gibi farklı metallerde kullanılabilmektedir [65].

Soğuk spreyci son zamanlarda, toz yataklı katmanlı imalat proseslerini bütünleyici olarak potansiyel bir katmanlı imalat prosesi olarak ön plana çıkmıştır. Karmaşık olmayan katmanlı imalat parçaları soğuk spreyci püskürtme yöntemiyle kolaylıkla üretilmekte, ancak üretilen parçalar lsel olarak küçük boyutlarda olmuştur [66].

Soğuk spreyci bir katmanlı imalat üretim süreci bakımından potansiyeli oldukça büyüktür. Tasarım aşamasında, bilinen katmanlı imalat yapı metodolojileri, süreci modelleme, yapı stratejisi geliştirme gibi araçlar kullanılarak soğuk spreyci özelliklerine (gaz partikül akış dinamikleri ile ilişkili karakteristik nokta çözünürlüğü ve profil) uyarlanmaktadır [67].

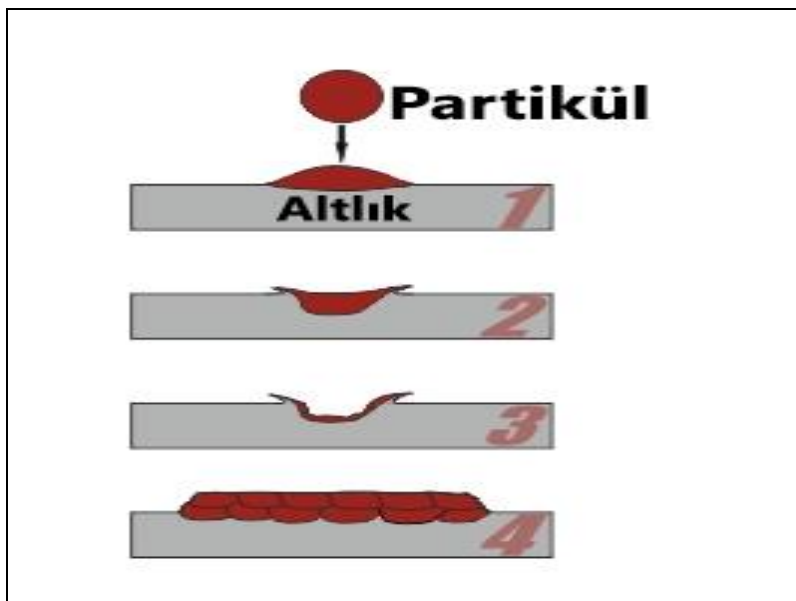
Katmanlı yapı oluşturmak için katmanlı üretim süreçleri kullanılır. Soğuk spreycide partiküller, birikme tabakasını oluşturmak için bir alt tabakaya yüksek hızlarda çarpar ve bu sayede katmanlar oluşturduğundan bir katmanlı imalat işlemi olarak kabul edilir. Püskürtme açılarının soğuk püskürtme depozitinde ve altlık ara yüzeyinde bağlanma mukavemeti üzerindeki etkisi bulunmaktadır [68].

Alev, ark ve plazma püskürtme gibi iyi bilinen termal püskürtme yöntemlerinin aksine, soğuk püskürtmede alt tabakaya çarpmadan önce partiküllerin erimesi yoktur. Bu süreçte parçacıkların yapışması, yalnızca çarpma üzerine kinetik enerjilerinden kaynaklanmaktadır [69]. Bu kritik hız, yalnızca püskürtme malzemesinin tipine değil, aynı zamanda toz kalitesine, partikül boyutuna ve partikül darbe sıcaklığına da bağlıdır [70].



Resim 2.19. Soğuk sprej sistemi [70]

Kaplama birikiminin sprej veya alt tabaka malzemesini yüksek sıcaklıklara maruz bırakmadan ve özellikle püskürtülen partikülleri eritmeden gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. Böylece oksidasyon ve diğer istenmeyen reaksiyonlar önlenir. Partiküller, sadece çarpma anında yüksek kinetik enerjileri nedeniyle alt katmana yapışır. İyi bir bağlanma için, toz parçacıklarının çarpma anında kritik bir hızı aşması gerekir [71]. Süpersonik hız, yakınsak-ayrışan bir de laval nozulu kullanılarak üretilir [72].



Resim 2.20. Soğuk sprej partikül dağılımı [73]

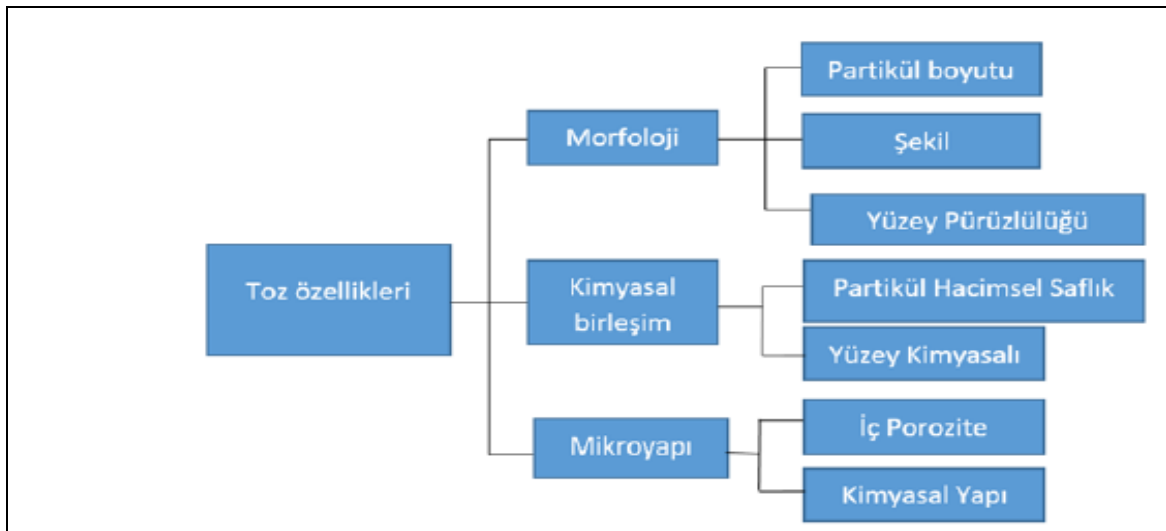
Yüksek hızlı hava-yakıt (HVAF) püskürtme tekniği çarpma anında çok yüksek parçacık hızları nedeniyle ihmal edilebilir gözenekliliğe sahip oldukça yapışkan kaplamalar sağlar [74].

3. KATMANLI İMALATTA KULLANILAN TOZLARIN ÜRETİM YÖNTEMLERİ VE KARAKTERİZASYONU

Toz metalürjisiyle (TM) üretim yapılırken farklı yöntemlerle üretilen tozlar kullanılmaktadır. Bu tozlarının üretimin yönteminde kullanılan teknikler, oluşturulan tozların pek çok özelliğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle tercih edilen toz oluşturma yöntemi oldukça önemlidir. Tozun sahip olduğu özellikler imal edilecek nihai ürün özelliklerini etkilemektedir [75].

Toz üretim teknikleri mekanik, kimyasal, elektrolitik, öğütme ve atomizasyon olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır. Bir araştırmaya göre, elektrolitik ve atomizasyon yöntemlerinin, fiziksel metot olarak nitelendirildiği görülmüştür [76].

Çizelge 3.1. Toz özelliklerinin sınıflandırılması [77]



Toz özelliklerinden parçacık morfolojisi, parçacıkların veya partiküllerin boyutunu, şeklini ve yüzey pürüzlülüğünü ifade eder. Katmanlı imalat yöntemlerinde, tüm bu özelliklerin akışkanlık ve paketleme verimliliği olmak üzere toz performansında önemli bir rol oynadığı ve dolayısıyla nihai bileşen özelliklerini etkilediği iyi bilinmektedir [77].

Mekanik yöntem ile toz oluşturulurken katı formda bulunan malzemeler üzerinden öğütme yapılarak toz elde edilmektedir. Atomizasyon yönteminde ise temel mantık ergimiş haldeki metali büyük enerjili gaz veya sıvı çarpmasıyla şok ederek daha küçük boyutlarda parçalar elde etmektir. Diğer bir üretim yöntemi ise kimyasal toz üretim metodunda katı, sıvı veya buhar fazı tepkime yardımıyla toz oluşturulabilmektedir [78].

Morfolojik yapı; tozun tanelerinin boyutu, geometrik olarak şekli ve yüzey pürüzlülüğü özellikleri olarak tanımlanmasıyla beraber katmanlı imalatta minimum katman kalınlığı ve istenen yoğunluğun oluşturulabilmesi için toz taneciklerinin morfolojisi oldukça önemli bir parametrelerdir. Toz morfolojisi ürün yoğunluğunu etkileyen en önemli parametredir [79]. Katmanlı imalat yönteminde kullanılan yapıyı inşa edecek metal tozlarının özel üretim prosesleri kullanılarak üretilir. Bu proseslerde gaz, su veya plazma atomizasyonudur. Bilindiği üzere, katmanlı imalat ile üretim yapılırken, kullanılan materyallerin (seramik veya metal tozlar) katmanlara homojen olarak yayılmasını gerçekleştirebilmek için çok güçlü akış parametrelerine ve yüksek nispi yoğunluklu bir toz katmanını elde edebilmek için paketlenme özelliklerinin de güçlü olmasına ihtiyaç duyulur. Katmanlı imalat uygulamalarında kullanılacak tozlar ve bunların özellikleri, üretimi yapılan parçanın yoğunluğunu ve gözenekliliğini önemli ölçüde değiştirir. En uygun, kolay ve az maliyetli atomizasyon uygulaması su atomizasyonudur. Katmanlı imalat yöntemlerinde kullanılan ham malzemelerin özellikleri beklenen bir sonuç olarak imal edilen nihai ürünün özelliklerini de etkilemektedir [80].

Katmanlı imalatta yöntemlerinde kullanılan tozların eriyik hale gelecek sıcaklıklarının üstüne çıkacak bir biçimde ısıtılması ve akabinde sıvılaşmış bu tozların ani olarak soğutulması ile bu işlemin devamlı olarak her katmanda tekrarlanmasıyla, tane yapılarının değişmesi, anizotropik tanecik yapıları ürünlerin imalatına yol açmaktadır. Bu bağlamda kullanılacak tozların enerjiye karşı vereceği tepki önem arz etmektedir [81].

Katmanlı imalat yöntemine göre değişkenlik gösteren ve serimi yapılmış ancak kullanılmayan tozların özellikleri de değişkenlik gösterebilir. Bir sonraki serimde kullanılacak olan bu tozların harmanlanmasıyla, içerisinde bulunan oksijen miktarının akma ve çekme dayanımlara etkisi olur. Tozların serim sayısı ve kullanım zamanı prosesin başarılı olmasında rol oynamaktadır [82].

Katmanlı imalat prosesinde kullanılan toz kalitesiyle ilgili karşılaşılan zorluklar ve yüksek kaliteli tozlar için yeni bir atomizasyon tekniğini, termal püskürtme işlemine dayalı olarak gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntemle süzgeç yardımıyla hem istenen boyutlarda hem de küresel tozlar elde edilebilmektedir [83].

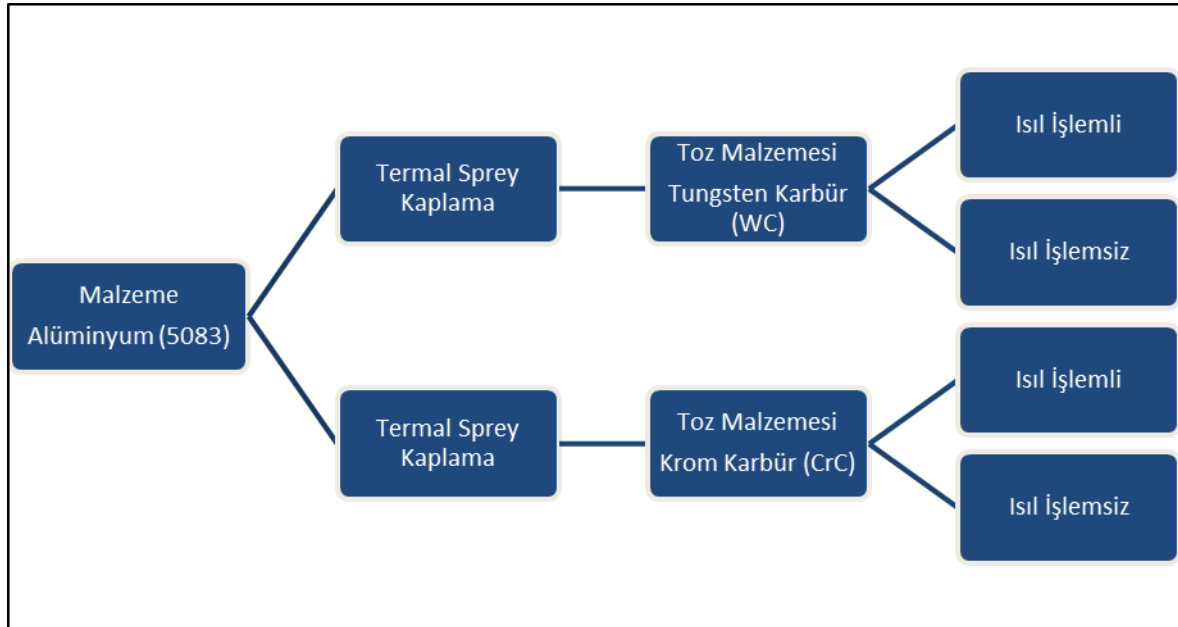
Katmanlı imalatta morfoloji; parçacıkların boyutunu, şeklini ve yüzey pürüzlülüğü ile bu özelliklerin, akışkanlık ve paketleme verimliliğini içerdiklerinden toz performansı önemli bir kriter olmaktadır. Dolayısıyla nihai bileşen özelliklerini doğrudan etkilediği de bilinen bir gerçek olmuştur [84].

Katmanlı imalat proseslerinde metalik tozlar, her üretimden sonra geri dönüştürülerek yeniden kullanılmaktadır. Bu durum katmanlı imalat sektöründe yaygın bir uygulama değildir. Bu önceki kullanım ve geri dönüşüm süreçleri; partikül boyut dağılımı ve morfolojisi gibi toz özelliklerini önemli ölçüde etkileyebildiğinden, tozun geri dönüştürülmesi ve tekrar kullanılması için toz özellikleri ve yapısının değişmemesi ana kriterdir [85]. Lazer ile yapılacak bir katmanlı imalatta kullanılan tozların boyutları, dağılımı ve serim yönü lazer ışınlarının etkilerini ve sürekli gözeneksiz bir yapıda katman oluşturulması bakımından önemlidir [86]. Toz beslemeli katmanlı imalatlarda ise; toz tanecik boyutları ve toz besleme hızının düşük olması, üretilen parçaların yüzey kalitesini ve prostedeki gözenekliliği etkilemektedir. Katmanlı imalat tekniklerinin genelinde bir enerji kaynağıyla metal tozların ergitilmesi ve katmanların oluşturulması prensibi yer almaktadır. Bu tozlarda katılma meydana geldikçe, bitişik ve komşu tabakalar arasında metalurjik bağ oluşur. Önceki kullanımlar nedeniyle oluşan bu bağlar toz özelliklerinin değişmesine ve sonraki kullanımlarda da parça veya kaplama özelliklerinin beklenenden farklı olmasına yol açar [87].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada; malzemelerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla farklı toz karışımları ile termal spreyl kaplama yapılması, kaplama kalınlığının değişimi ve sonrasında yapılan ısıtıl işlem uygulamasının etkileri incelenmiştir. Metalurjik açıdan gelişmiş tozlar kullanarak plaka şekilli Alüminyum 5083 malzemelerin kaplanması işlemleri katmanlı imalat yönteminin sağladığı faydalar ve avantajlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan numunelerin üretim işlem şeması aşağıda verilmiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Deneysel malzemelerin üretim işlemleri ve kullanılan malzemeler



4.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada alüminyum 5083 Al plaka üzerine katmanlı imalat yöntemlerinden biri olan termal spreyl kaplama yöntemiyle işlem parametreleri ayarlanarak iki farklı toz grubunda kaplama yapımı gerçekleştirilmiştir.

4.1.1. Altlık malzemesi özellikleri

Alüminyum ve alaşımları dünyada pek çok alanda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Alaşım elementleri malzemenin ısıtıl, fiziksel, elektriksel ve mekanik özelliklerini belirleyeceğinden oldukça önemlidir. 5083 alüminyum alaşımı ise magnezyum ve eser

miktarda manganez ve krom içeren bir alüminyum alaşımıdır. 5083 Al alaşımın en önemli özelliklerinden biride kaynak yapıldıktan sonra bile mekanik özelliklerini büyük ölçüde korumasıdır. Yüksek çekme ve akma dayanım değerleriyle ısıtıl işlem yapılmamış alaşımlar içerisinde en büyük mukavemete sahiptir.

Askeri zırhlı araçlarda ağırlığın oldukça önemli bir tasarım kriteri olmasından dolayı, düşük yoğunluğa (2,73 g/cm³) sahip olan alüminyum alaşımları bu sektörde zırh olarak uzun yıllardır kullanılmaktadır. Temel alaşım elementi magnezyum olan sertlik ve mukavemeti şekil değiştirme sertleşmesi ile geliştirilen alüminyum 5083 alaşımı muharebe araçlarında kullanılan ilk alaşımdır. Alüminyum hafifliği, daha sünek olmasına karşılık ani darbelere dayanım özelliği olan tokluğu (balistik özellik), dayanım - ağırlık oranının yüksek oluşu, değişik iklim ve hava şartlarında kullanılmasından dolayı korozyona karşı direncinin iyi seviyede olması, sıvı temaslarında sızdırmazlık sağlayan kaynaklı birleştirmeye uygun olması sebebiyle kullanılmaktadır.

Bu çalışmada altlık malzemesi olarak 5083 Al alaşımı kullanılmıştır. Bu malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 4.2.'de verilmiştir. Numunelerin üretilmesi amacıyla kaplama işlemi yapılan altlık plakalar 200x150x10 mm ölçülerinde hadde ürünü malzeme olarak temin edilmiştir. Bu plakaların kaplama yapılacak yüzeyleri öncelikle mekanik (zımparalama) ve daha sonra ise kimyasal olarak (alkol) temizlenmiştir. Bu temizleme ile hem kirlilikler hem de yüzey oksit filmi temizlenmiştir. Plakaları kaplama öncesi yüzey kalitesi Ra=0.2 olacak şekilde hazırlık işlemi yapılmıştır.

Çizelge 4.2. Alüminyum 5083 alaşımının kimyasal kompozisyonu (%) [88]

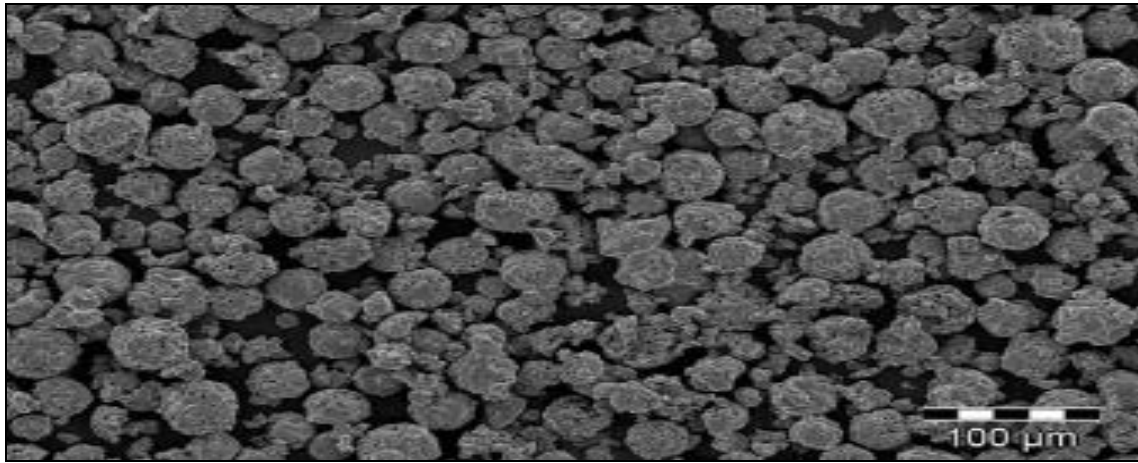
Cr	Mg	Si	Cu	Ti	Fe	Al
0.25-0.5	4.00-4.90	0.00-0.04	0.00-0.10	0.00-0.15	0.00-0.40	Kalan

4.1.2. Kaplamada kullanılan tozlar ve özellikleri

Termal sprey kaplama işlemlerinde Oerlikon Metco firmasının ürettiği Ni-CrC ve Co-WC metal ve seramik toz karışımları kullanılmıştır. Bu toz karışımlarına ait bilgiler aşağıda verilmiştir. Kaplamada kullanılacak tozların özellikleri kaplamanın iyi bir şekilde yapılabilmesi için önemli bir faktördür.

Ni-CrC (Nikel-Krom Karbür) toz karışımı

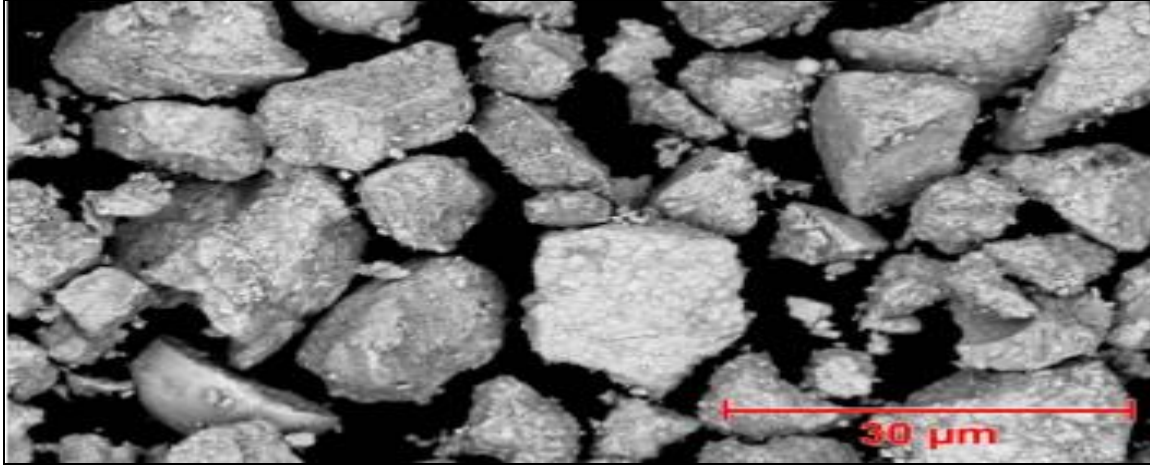
Tungsten içeren kaplama malzemeleriyle karşılaştırıldığında, CrC içeren kaplama malzemeleri 870 °C' ye kadar daha yüksek sıcaklıklara dayanabilir. Termal sprej için küresel tozlardır. Sert, aşınmaya dayanıklı bir faz olan krom karbür termal sprej yöntemlerinde bağlayıcı amaçla genellikle Ni tozları kullanılmaktadır. Kaplama işleminde bu malzemeler çok yoğun olarak reaksiyon göstermekte ve çok iyi bir bağ kurma eğilime sahiptir. Bu nedenle mukavemet değeri de oldukça yüksektir. Kullandığımız tozun tanecik boyutu 15 - 25 µm tane boyutunda ince yapılı iyi bir kaplama ve yüzey pürüzlülüğü sağlayabilecek niteliktedir [89].



Resim 4.1. Oerlikon metco krom karbür tozu mikroskop görüntüsü [89]

Co-WC (Kobalt-Tungsten Karbür) toz karışımı

Katmanlı imalat yöntemlerinde; WC (Resim 4.2.) tozlara farklı toz metal malzeme katılarak mekanik olarak ön karıştırma yapılmış toz karışımları yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu tozlar ile yapılan uygulamalarda kaplamalar oldukça yoğun olmakta ve aşınmaya karşı iyi bir performans göstermektedir. 500 °C (930 °F) gibi yüksek sıcaklıklarda kullanım için elverişlidir. Kaplamalar iyi aşınma direnci ve mükemmel korozyon koruma özelliğine sahiptir.



Resim 4.2. Oerlikon metco tungsten karbür tozu mikroskop görüntüsü [89]

Bu çalışmada metalik toz olarak Co malzemesi seçilmiştir. Bu malzeme WC ile iyi bir kombinasyon oluşturmaktadır. Üretilen katmanın içeriğindeki sert ve aşınmaya dirençli ancak kırılgan WC malzemesinin bağlayıcısı olarak görev yapmaktadır. Çok ince partikül ve uygun şekilli geometrik yapıya sahiptirler. Bu özelliklerinden dolayı püskürtme işlemi sonrasında oldukça iyi yüzey kalitesi ve yüzey pürüzlülüğü düşük kaplamalar elde edilebilir. Termal spreyci yöntemiyle yapılacak kaplamalarda tabancalardan püskürtülme ve yapışma özellikleri iyidir. Ayrıca, farklı tabancalarda kullanım için de uygundur. Uygulamada kullanılan toz taneleri 15 - 25µm boyutlara sahiptir.

4.2. Termal Sprey Kaplama İşlemleri

200x150x10 mm ölçülerindeki A5083 alüminyum alaşımı plakanın önceden hazırlanmış yüzeyine kaplama işlemi uygulanmıştır. Kaplama öncesi herhangi bir ön ısıtma yapılmamıştır. Kaplama işlemi, ultra yoğun kaplamalar üretme kabiliyetine sahip Hobart Tafa Technologies marka JP 5000 HVOF model son derece yüksek parçacık hızı üretme kapasiteli tabanca bulunan termal spreyci cihazında gerçekleştirilmiştir (Resim 4.3).



Resim 4.3. Hobart Tafa Technologies JP 5000 model termal sprey makinesi

Hobart Tafa Technologies JP 5000 model termal sprey makinesi genel özellikleri aşağıda verilmiştir. Bunlar;

- Verimli yanma ve partikül ısıtma gücü
- Yanma odası çıkışındaki yakınsayan/uzaklaşan meme süpersonik gaz hızı üretimi
- Etkili tabanca soğutma işlemi
- Birden fazla namlu uzunluğuna sahip çoklu tabanca konfigürasyonları
- Yanma odasından sonra radyal, düşük basınçlı toz enjeksiyonu
- Üstün kaplama bütünlüğü ve homojenliği
- Kalın kaplama özelliğinin bulunması
- Toz partikül boyutuna diğer HVOF sistemlerine göre daha az duyarlıdır
- Daha uzun, daha az hassas termal püskürtme mesafesi olarak sayılabilir [90].



Resim 4.4. Termal spreyl yöntemiyle Al plakaların a) Co+WC b) Ni+CrC kaplanması

Kaplama işlemi altlık malzemenin yüzeyine yaklaşık 80-90° açıyla kaplama malzemesinin püskürtülmesi suretiyle gerçekleştirilmiştir. Kaplama uygulaması tek kat olacak şekilde yapılmıştır. Kaplanmış altlık malzemenin yüzey görüntüsü Resim 4.5'te verilmiştir. Kaplama işlemi sonrası yapılan gözle inceleme (altlık ile kaplamanın renklerinin farklılığı kullanılmış, mercek kullanılarak) neticesinde altlık yüzeyinin tamamen kaplanmış olduğu görülmüştür.



Resim 4.5. Termal spreyle Al plakaların a)Co+WV ve b) Ni+CrC kaplanması sonrası yüzey görüntüleri

Gözle muayene sonrası kaplama başarısı Elektro Physik marka MiniTest 650 model kaplama kalınlığı ölçme cihazı ile yapılmıştır (Resim 4.6). Bu ölçümler sonucunda Ni-CrC tozu kullanıldığında 95-110 μm , Co-WC tozu kullanıldığında ise 105-120 μm aralığında kaplama kalınlıkları oluşturulduğu tespit edilmiştir. Kaplama kalınlıklarının oldukça homojen olduğu görülmektedir.



Resim 4.6. Kaplanmış alüminyum plakaların kaplama kalınlıklarının ölçümü

4.3. Yapısal İnceleme Çalışmaları

4.3.1. Plakalardan numune hazırlanması

Mikro yapısal analiz numuneleri Co-WC ve Ni-CrC kaplanan Al altlık plakalarından ATM marka Brillant 250 model abrasif kesici cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kesimi yapılan numuneler ATM Opal 460 model bakalite alma cihazında 220 °C sıcaklıkta bakalite alınmıştır. Her bir numunenin deforme olmuş ve olmamış bölgeleri incelenmiştir. Bakalite alınan numunelerin yüzey hazırlama işlemleri ATM SAPHIR 520 model zımparalama ve parlatma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yüzey hazırlığında 320-1200 mesh zımparalar ve 6-3 µm parlatma keçeleri kullanılmıştır. Hazırlanan yüzeyler üzerinden altlık ve kaplama yapısal özellikleri incelenmiş ve görüntüleri alınmıştır.



Resim 4.7. Bakalite gömülmüş numune görüntüsü

Mekanik testler için numune hazırlama işlemleri Bystronic marka By Jet Flex 6030 model su jeti tezgâhında yapılmıştır (Resim 4.8.). Çekme test numuneleri TS EN standardına ve 3 nokta eğme test numuneleri ise TS EN standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Her bir numune için en az 3 test tekrarı yapılacak şekilde hazırlık yapılmıştır.



Resim 4.8. Bystronic By Jet Flex 6030 su jeti kesim tezgahı



Resim 4.9. Su jetiyle kesilerek oluşturulan test numuneleri

4.3.2. Isıl işlem uygulaması

Isıl işlem sonrası yapısal ve mekanik özelliklerin değişimi için numuneler Thermnevo marka fırında işlemleri yapılmıştır. Oda sıcaklığındaki fırına numuneler yerleştirilmiş (Resim 4.10.) ve fırın 550 °C çözündürme işlem sıcaklığına çıkartılmıştır. Bu sıcaklığa ulaşıldıktan sonra 90 dakika çözündürme işlemi uygulanmıştır. Bekletme süresi sonunda numuneler fırından çıkarılmış suda soğutma uygulanarak oda sıcaklığına soğutulmuştur. Yaşlandırma işlemi ise 220 °C sıcaklık ve 90 dakika süre şartlarında yapılmıştır.



Resim 4.10. Fırın içerisinde ısıtıl işlem gören numunelerin görüntüsü

Üretilen numuneler kaplama ve ısıtıl işlem durumlarına göre kodlama yapılmış ve bunlar Çizelge 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4.3 .Uygulanan işlemlere göre numunelerin kodlaması ve açıklaması

Numune Kodu	Açıklaması
5083	Altılık
5083 I	Altılık + ısıtıl işlem
A1	Co-WC kaplama
B1	Ni-CrC kaplama
A2	Co-WC kaplama + ısıtıl işlem
B2	Ni-CrC kaplama + ısıtıl işlem

4.3.3. Çekme testlerinin uygulanması

Çekme testleri Gazi Üniversitesi, Teknoloji fakültesinde bulunan Instron marka 3369 model cihaz kullanılarak yapılmıştır. Çekme testleri 4 mm/dk hızda gerçekleştirilmiştir. 3 adet numune test edilmiş ve ortalaması sonuçlarda verilmiştir. Testler EN 6892-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

4.3.4. Üç nokta eğme testlerinin uygulanması

Eğme testleri Instron marka 3369 model cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Resim 4.11). Eğme testleri 5 mm/dk hızda gerçekleştirilmiştir. 3 adet numune test edilmiş ve ortalaması sonuçlarda verilmiştir. Testler EN 7438 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin standartlara uygun olarak %70 oranında şekil değişimine uğraması sağlanarak testler yapılmıştır.



Resim 4.11. 3 nokta eğme testlerinin yapıldığı cihaz ve testin uygulanması

4.3.5. Sertlik testlerinin uygulanması

Sertlik testleri Gazi Üniversitesi, Teknoloji fakültesinde bulunan Shimadzu marka HHMV-2l Assy model mikro sertlik cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testler 1 kg yük altında HV cinsinden yapılmıştır. Kaplama, ara yüzey ve altlık olmak üzere 3 farklı bölgeden 5 adet ölçüm yapılmış ve ortalaması sonuçlarda verilmiştir. Testler EN 6507-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

4.3.6. Optik ve SEM mikroskop inceleme işlemleri

Üretilen numuneler üzerinde Gazi Üniversitesi, Teknoloji fakültesinde bulunan Leica marka DM4000 B model optik mikroskopta altlık yapı ve kaplama özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Optik mikroskop ile altlık kaplama ara yüzeyinin sürekliliği, geçiş bölgesi oluşumu, kaplama kalınlığı, kaplama gözenek yapısı, kaplama yapısının homojenliği, altlık yüzeyinde meydana gelen deformasyonlar gibi durumlar incelenmiştir.

Üretilen numunelerin daha detaylı yapısal özellikleri olan altlık/kaplama ara yüzey morfolojisi, geçiş bölgesi kimyasal analizleri ise Jeol Marka JSM-6060 LV model tarama elektron mikroskobunda yapılmıştır.

4.3.7. Balistik test uygulaması

Kaplama ve ısıtıl işlem yapılmış 5083 Al altlık, A2 ve B2 numunelerine özel laboratuvar ortamında değişken namlulu mermi atar düzenek ile TS EN 1522/FB2 standardına uygun olarak 400 metre/saniye +/-10 toleranslı hızda 2 şer atış gerçekleştirilmiştir. Atışlar pek çok farklı boyut ve genişlikte merminin atılabilmesini sağlayan değişken namlulu atış cihazı ve raylı tabanda atış mesafesi 10 metreye ayarlanarak yapılmıştır. Atış için Sarsılmaz marka 9x19 luger 6 adet mermi her bir numuneye 2 adet olacak şekilde kullanılmıştır (Resim 4.13).

Atışlar sonrasında oluşan hasarın mermi iz derinliği ve malzeme üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla plakaların genel görüntü alınmış, mermi çekirdeğinin etkileri ise hem optik mikroskop (kesit görüntü incelemesi) ve izin üst yüzeyden analizi için stereo mikroskop görüntüleri alınmıştır. Optik mikroskop için metalografik ön hazırlıkların benzeri süreç takip edilmiştir.



Resim 4.12. Değişken namlulu mermi atış düzeneği



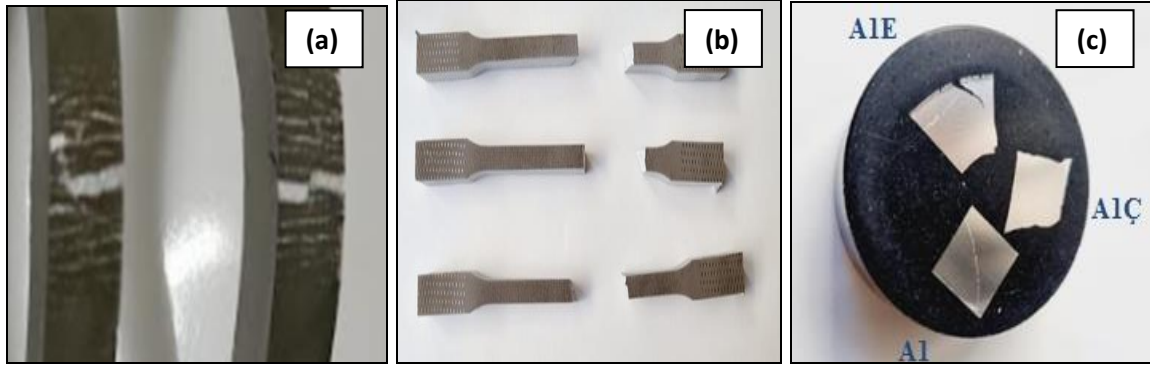
Resim 4.13. Sarsılmaz marka 9x19 luger mermisi

5. DENEYSEL BULGULAR, TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME

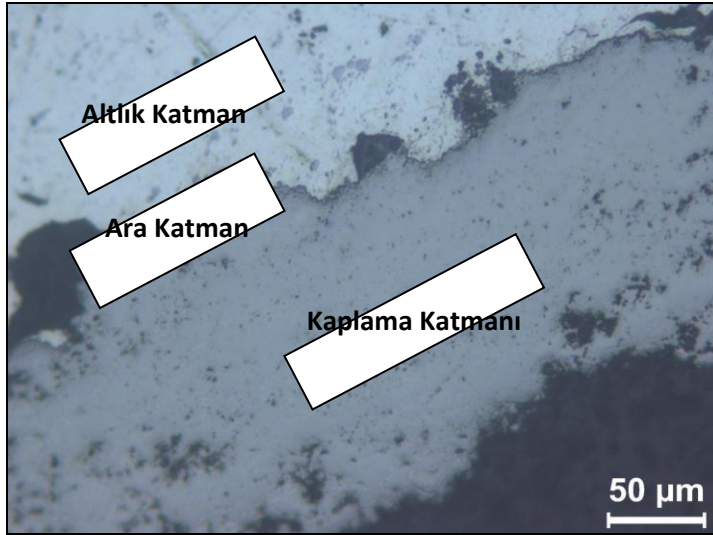
5.1. Altlık/Kaplama Geçiş Bölgelerinin Yapı İncelemesi

Üretilen numunelerin altlık (Al plaka) ile kaplama malzemesinin (Co-WC ve Ni-CrC) temas bölgesi yapısal olarak incelenmiştir. İncelemeler makro ve mikro ölçekte yapılmıştır. Altlık malzeme herhangi bir mekanik işlem uygulanmadığından özelliklerinde değişim olmamıştır. Bu nedenle altlık/kaplama geçiş bölgeleri incelenmiştir. Ayrıca çekme, 3 nokta eğme ve balistik testler sonunda oluşan deformasyona bağlı olarak yapısal ve altlık/kaplama geçiş bölgelerindeki yapı değişimleri de incelenmiştir.

İncelemeler sonunda A1 (Co-WC) kaplanmış numuneye ait üretim ve testler sonrasında elde edilen kaplamanın deformasyon ve mikro yapı görüntüleri Resim 5.1.'de verilmiştir. Resim 5.1. a ve b'de mekanik testler sonrası görüntüler incelendiğinde yüksek deformasyon yapılmasına rağmen kaplamanın altlık malzeme ile uyumlu bir şekilde davrandığı, sünek bir davranış gösterdiği, belirli bir deformasyonun ardından da çatlak oluşumu (Resim 5.1..c) ve kaplamada bölünmeler (kaplamanın altlık ile beraber parçalı bölümler halinde kalması) meydana geldiği görülmüştür. Fakat bu yüksek deformasyona bağlı olarak altlık malzemede çatlak oluşmasına rağmen, kaplamanın halen daha altlık malzeme yüzeyinde yapışık halde olduğu görülmüştür. Bu durum kaplamanın hem altlığa iyi tutunmuş hem de sünek bir davranışa sahip olduğunu göstermektedir. Bu malzemenin Co-WC ile kaplandıktan sonra da şekillendirilebileceği görülmektedir. Rodolpho ve ekibi WC-12Co (Oerlikon) ve WC-10Co4Cr (Fujimi) hammadde tozlarını aynı parametrelerde HVOF yöntemiyle karakterize etmek, aşınma direnci ve korozyon karşısında davranışlarını incelemek için benzer bir çalışma yapmıştır. Yapılan araştırma ve deneyler sonucu numunelerimize benzer şekilde iyi bir yapışma sağlayan katman elde etmiştir [91].



Resim 5.1. A1 numunesinin 3 nokta eğme ve çekme testi sonrasında oluşan deformasyonun kaplama yapısına etkisi ve metalografik kesit görüntü hazırlığı



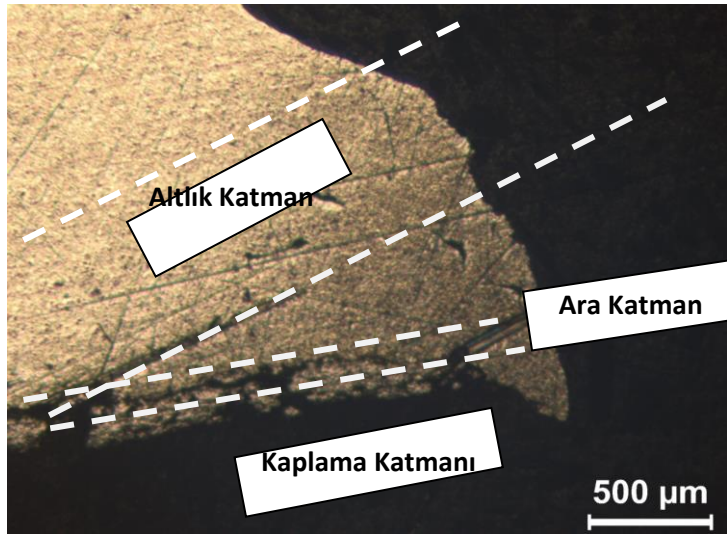
Resim 5.2. A1 numunesi kaplama bölgesinin mikroskop görüntüsü

Resim 5.2.'de ise A1 numunesine ait altlık ile kaplama ara yüzeyinin hem optik hem de SEM (Resim 5.5) görüntüsü ve kimyasal analizleri verilmiştir. Optik görüntüler incelendiğinde; altlık ile kaplamanın iyi bir ıslatma ve uyum içerisinde oldukları görülmektedir. Termal sprej kaplama işlemleri hem ısı verilmesi hem de basınçlı bir şekilde püskürtme yapılması nedeniyle iyi kaplama yapışma davranışı elde edilmektedir. Bu davranış neticesinde mekanik testler sonrasında bile kaplama altlık yüzeyi ile birlikte kalmaktadır.

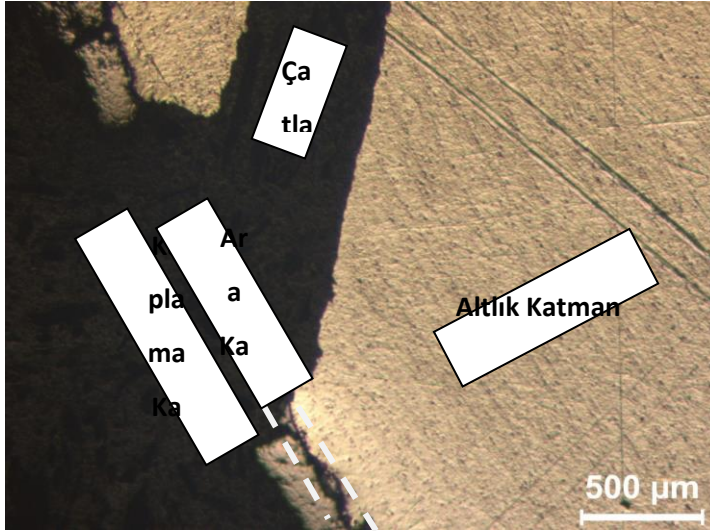
Termal sprej proseslerinin, istenen sonuçlara etki edebilecek 2 negatif yönü vardır. Bunlar taneler arası boşluklu yapı ve metal oksit safsızlıklarıdır. Elif Tekin ve ekibinin yaptığı plazma sprej ve soğuk sprej uygulamalarında kaplama katmanının yapıları incelenmiş

olup boşluklu yapının temel nedeninin, ergimiş metal maddelerinin yüzeye çarpması sonrasında da sıçraması ile yüzeyde birikmesi esnasında boşluk oluşması ve aralıkları doldurmamasıdır [92]. Numunelerimizin yapısal incelemelerinde kaplama katmanında büyük gözeneklerin oluşmaması kaplama parametrelerinin optimize edildiği ve sürekli bir kaplamanın elde edilmesi açısından öne çıkmaktadır. (Resim 5.2., Resim 5.7, Resim 5.12., Resim 5.17.).

Javed ve ekibi iki farklı termal sprej tekniği olan HVOF ve plazma sprej yöntemleriyle aynı ham malzemeyi (WC) kaplayarak bu iki yöntem arasındaki farkı gözlemledi. HVOF kaplama yapılan numunelerde yüzey pürüzlülüğünün daha iyi ve gözeneklerin daha az olduğunu kaplamanın malzemeye daha iyi birleşim sağladığını gösterdi [93]. Bu çalışmayla ortak sonuç olarak mekanik test uygulanan numunelerimizin yapı incelemelerinde kaplamanın iyi yapıştığını ve mekanik etkilere rağmen herhangi bir dökülmenin olmadığını gördük.



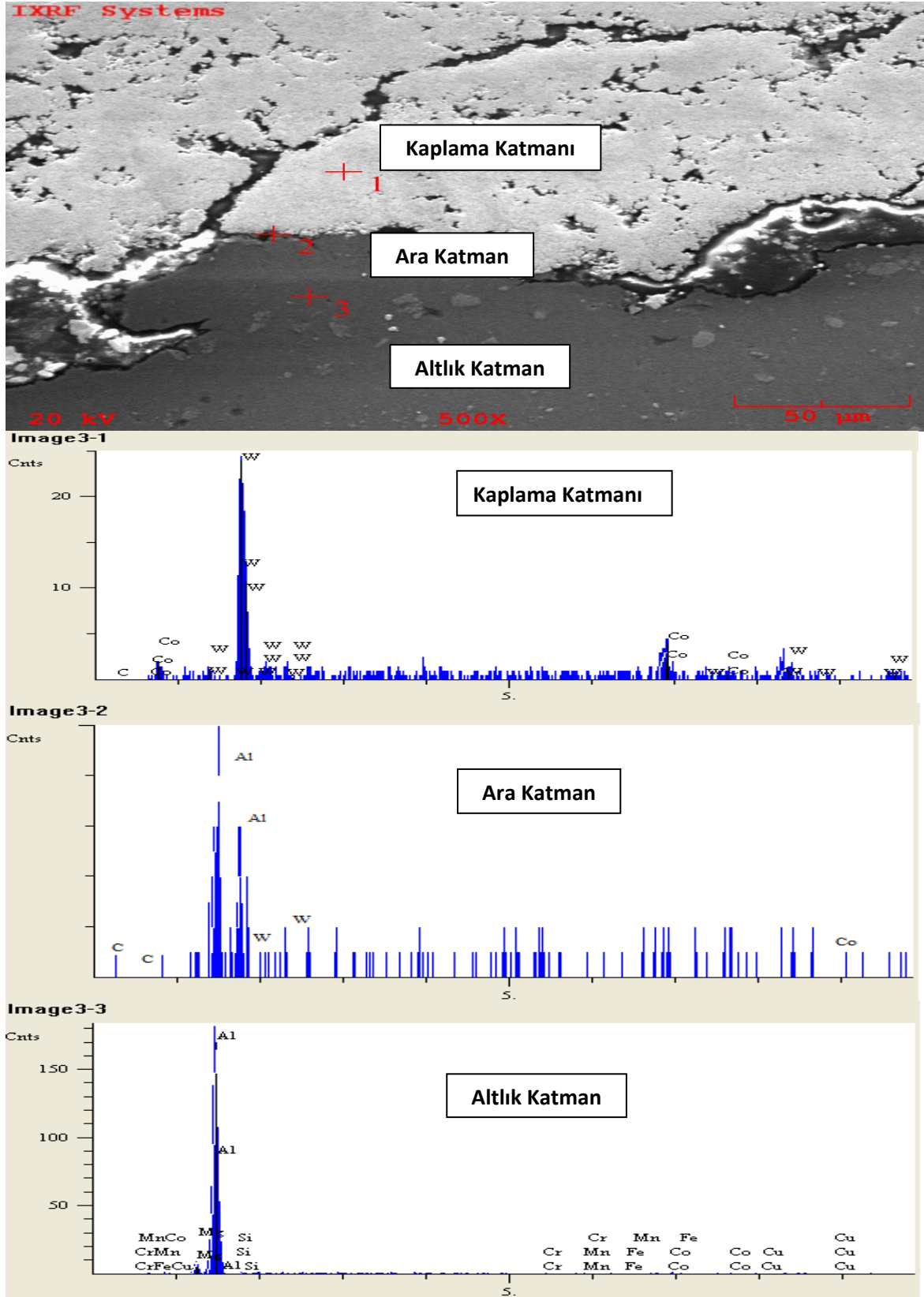
Resim 5.3. A1 numunesi çekme deformasyon bölgesi kaplama görüntüsü



Resim 5.4. A1 numunesi eğme deformasyon bölgesi kaplama görüntüsü

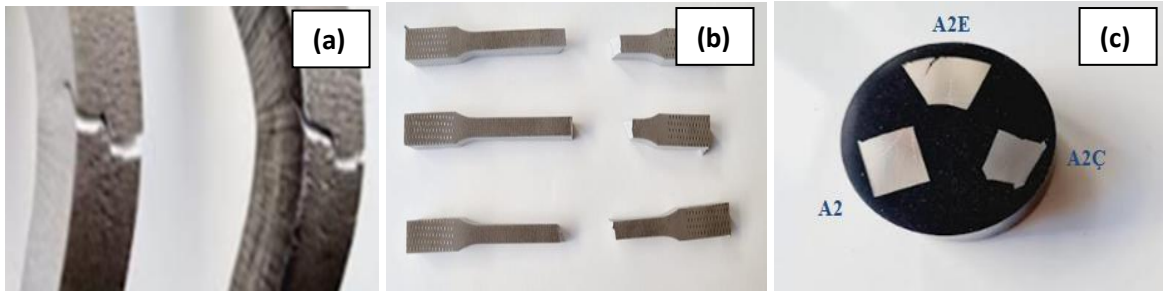
Kaplama işleminin başarısı bazen altlık ile kaplamanın birbirlerine kimyasal yönden geçişkenliği/girişkenliği ile de ifade edilebilir. Başka ifadeyle kaplama sonrasında altlık ile kaplama malzemeleri arasında kimyasal olarak bir ara geçiş bölgesi bulunması da kaplamanın başarısı bakımından bir ölçek olarak kabul edilebilir. Resim 5.5'te A1 numunesine ait SEM görüntüsü ve altlık/arayüzey/kaplama kimyasal analizler (EDS) verilmiştir. Al altlık malzemelerin termal sprej yöntemi ile başarılı bir şekilde kaplanabilmekte ve iyi sonuçlar elde edilebilmektedir. Tarama elektron mikroskobu görüntüsü incelendiğinde; iyi bir kaplama olduğu, kaplamanın içerisinde çok küçük boyutlu gözeneklerin de var olduğu görülmektedir. Kaplamanın başarısı ısı ve basınç etkilerinin yanında, bu kaplama malzemesinde bulunan metal tozlarının etkisini açıkça göstermektedir. Kaplama işlemlerinde seramik tozlarının yanında metal/alaşım tozlarının bulunması kaplama işleminin başarısı ve kalitesini artırmaktadır.

Numune üzerinden alınan 3 farklı bölge kimyasal analizleri incelendiğinde (Resim 5.5); kaplama içeriğinin Co, W ve C elementlerinden oluştuğu görülmektedir. Kaplama malzemesi bu üç elementten oluştuğu için sonuçlarda bu doğrultuda çıkmıştır. Geçiş bölgesine bakıldığında Al, C, Co ve W elementlerinin tespit edildiği görülmektedir. Altlık malzeme yüzeyine çok yakın kısımdan alınan analizde ise; hem altlık hem de kaplama malzemesini oluşturan elementlerin var olduğu görülmüştür. Termal sprej kaplamanın uygulanması sırasında verilen ısı ve uygulanan çarpma basıncı nedeniyle yüzey kısımlarında iyi bir karışımın oluştuğu görülmektedir. Bu durum kaplamanın mekanik etkiler karşısında altlık yüzeyine yapışma direncini de artırmaktadır.



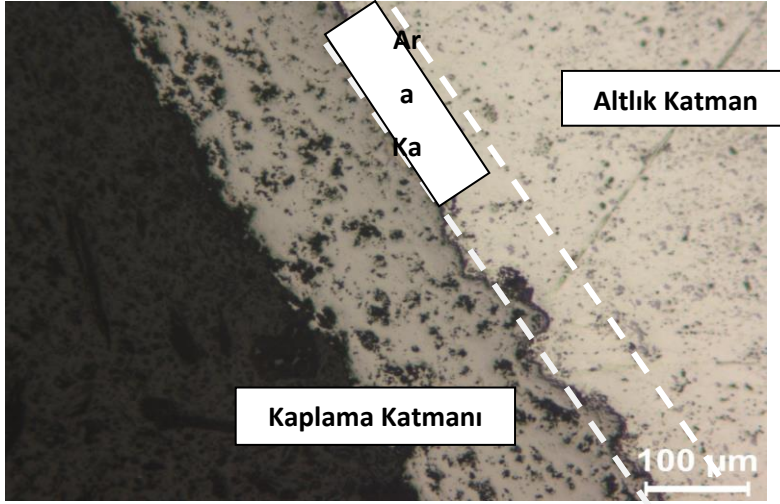
Resim 5.5. A1 numunesi SEM görüntüsü ve 3 farklı bölgeden EDS analiz sonuçları

Hem Co-WC kaplama yapılan, hem de ilave olarak ısıtıl işlem uygulanan A2 numunesi yapısal ve kimyasal olarak incelenmiştir. Resim 5.6. a ve b’de mekanik testler sonrası görüntüler incelendiğinde yüksek deformasyon yapılmasına rağmen kaplamanın altlık malzeme ile uyumlu bir şekilde davrandığı, sünek bir davranış gösterdiği, belirli bir deformasyonun ardından da çatlak oluşumu (Resim 5.6. a) ve kaplamada bölünmeler (kaplamanın altlık ile beraber bölümler halinde kalması) meydana geldiği görülmüştür. A1 numunesinde olduğu gibi; yüksek deformasyon sonucu altlık malzemede çatlak oluşmasına rağmen, kaplamanın halen daha altlık malzeme yüzeyinde yapışık halde olduğu görülmektedir. Bu durum, kaplamanın ısıtıl işlem uygulanması sonucunda hem altlığa iyi tutunmuş hem de daha sünek bir davranış kazandığını göstermektedir. Bu malzemenin Co-WC ile kaplandıktan ve ısıtıl işlem uygulandıktan sonra da başarılı bir şekilde şekillendirilebileceği görülmektedir.

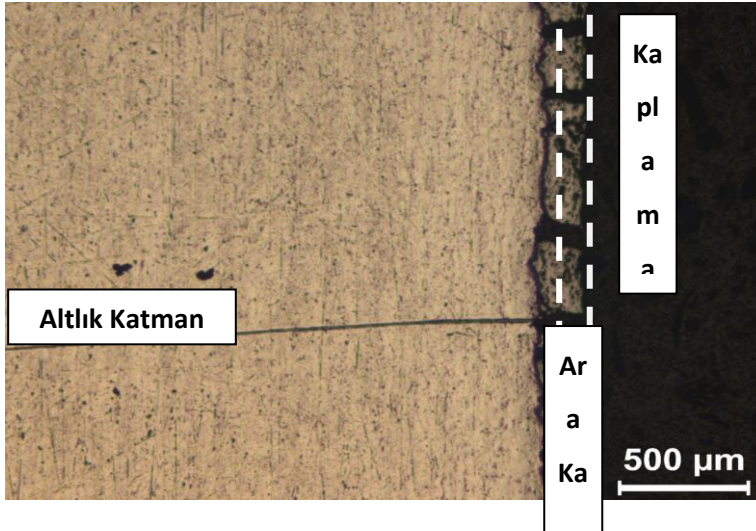


Resim 5.6. çA2 numunesinin 3 nokta eğme ve çekme testi sonrasında oluşan deformasyonun kaplama yapısına etkisi ve metalografik kesit görüntü hazırlığı

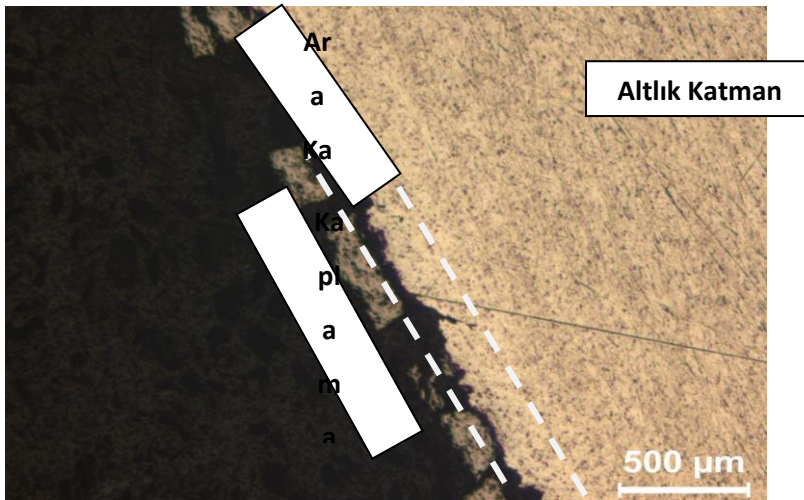
Aşağıda A2 numunesine ait altlık ile kaplama ara yüzeyinin hem optik hem de SEM görüntüsü ve kimyasal analizleri verilmiştir. Optik görüntüler incelendiğinde; altlık ile kaplamanın ısıtıl işlem nedeniyle daha da iyi bir ıslatma ve yapışma görülmektedir. Termal spreyl kaplama ile başarılı bir kaplamaya ilave olarak ısıtıl işlem yapılması altlık/kaplama ara yüzeyinde difüzyon nedeniyle yüksek kaplama dirençleri elde edilmektedir. Bu davranış neticesinde mekanik testler sonrasında dahi kaplama altlık yüzeyinde yapışık halde kalabilmektedir.



Resim 5.7. A2 numunesi kaplama bölgesinin mikroskop görüntüsü

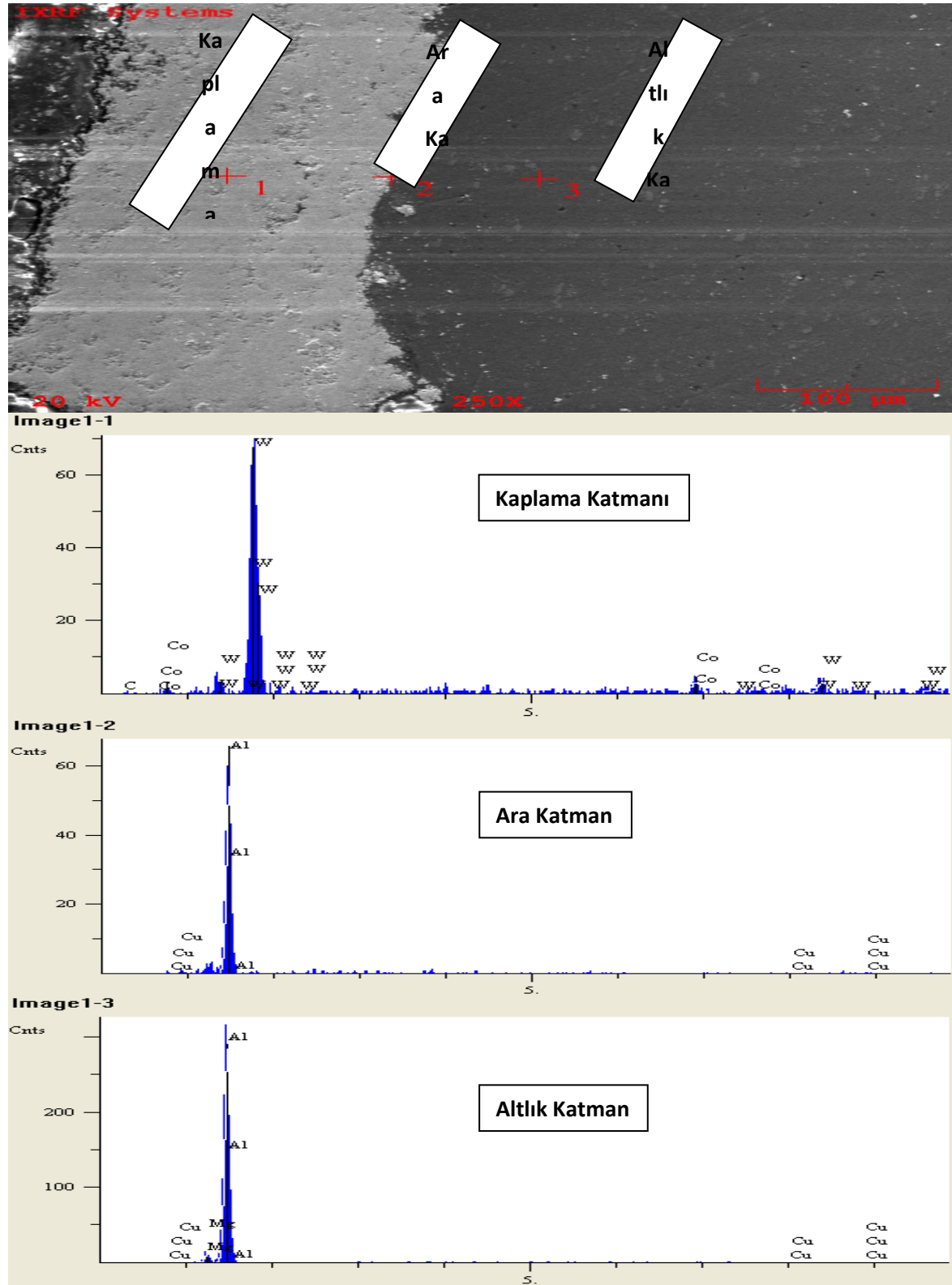


Resim 5.8. A2 numunesi çekme deformasyon bölgesi kaplama görüntüsü



Resim 5.9. A2 numunesi eğme deformasyon bölgesi kaplama görüntüsü

Resim 5.10'da A2 numunesine ait tarama elektron mikroskobu görüntüsü ve altlık/arayüzey/kaplamaya ait kimyasal analizler (EDS) verilmiştir.

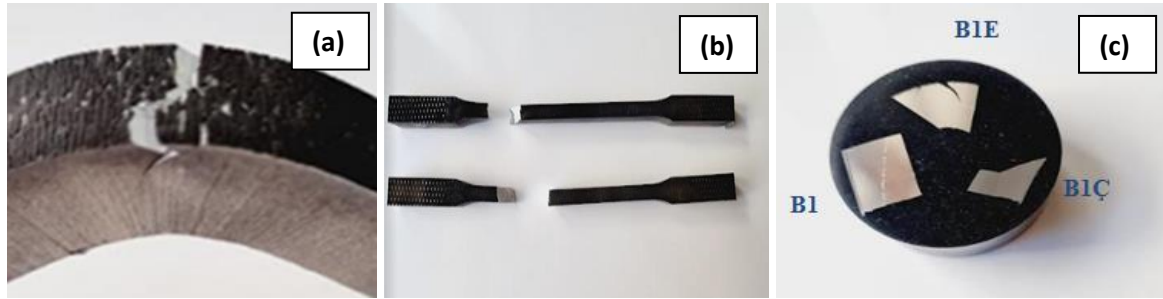


Resim 5.10. A2 numunesi kimyasal analiz sonuçları

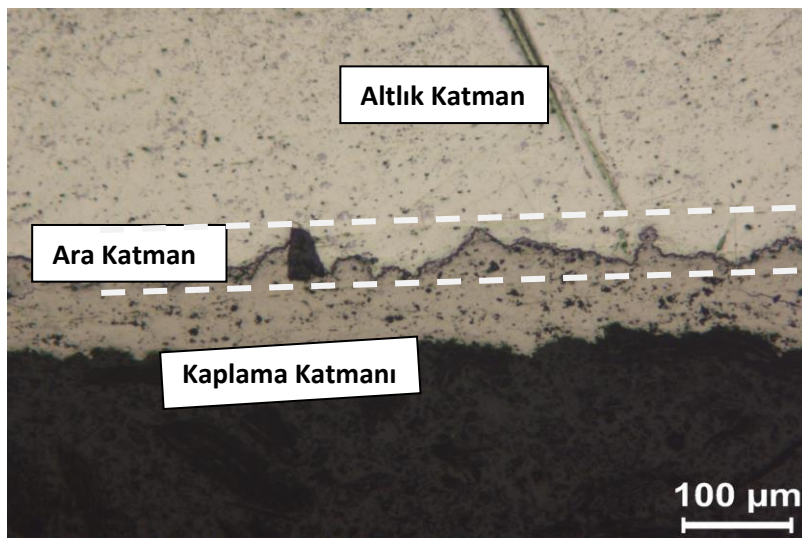
Alüminyum altlık malzemelerin neden termal spreyci yöntemi ile başarılı bir şekilde kaplanabildiği ve iyi sonuçların elde edilebildiği daha önce ifade edilmiştir. Buna ilave olarak yapılan ısıtıl işlem uygulaması neticesinde oluşan difüzyon nedeniyle kaplama özellikleri daha da gelişmektedir. Bu durum tarama elektron mikroskobu görüntüsü incelendiğinde çok daha iyi anlaşılmaktadır. A1 numunesindeki başarılı kaplamaya ısıtıl işlemin olumlu etkilerinin de eklendiği ve böylece A2 numunesinde daha iyi bir kaplama oluştuğu görülmektedir. Kaplama işlemlerinde seramik tozlarının yanında metal/alaşım tozlarının bulunması kaplama işleminin başarısı ve kalitesini artırmaktadır. Ancak bazen ısıtıl işlemler kaplamanın gevrekleşmesine de neden olabilmektedir. Numune üzerinden alınan 3 farklı bölge kimyasal analizleri incelendiğinde (Resim 5.11.); kaplama içeriğinin A1 numunesinde olduğu gibi, Co, W ve C elementlerinden oluştuğu görülmüştür. Fakat ısıtıl işlemin etkisiyle miktarları daha da artmıştır. Geçiş bölgesine bakıldığında; ısıtıl işlemin etkisiyle Al ve Cu difüzyonunun etkileri bariz olarak görülmektedir. Bu durum dar da olsa bir ara geçiş bölgesinin varlığını ortaya koymaktadır. Bu durum kaplamanın mekanik etkiler karşısında altlık yüzeyine yapışma direncini de artırmaktadır.

Ni-CrC kaplama yapılan B1 numunesi yapısal ve kimyasal olarak incelenmiştir. Resim aşağı a ve b’de mekanik testler sonrası görüntüler incelendiğinde yüksek deformasyon yapılmasına rağmen kaplamanın altlık malzeme ile uyumlu bir şekilde sünek bir davranış gösterdiği, belirli bir deformasyonun ardından da çatlak oluşumu (Resim 5.11. c) ve kaplamada bölünmeler/kaplamada kopmalar (kaplamanın altlık ile beraber bölümler halinde kalması) oluşmaktadır. Farklı kaplama malzemesi kullanılmasına rağmen A1 ve A2 numunelerinde olduğu gibi; deformasyon sonucu altlık malzemedeki çatlak oluşmasına rağmen, kaplamanın halen daha altlık malzeme yüzeyinde yapışık halde olduğu görülmektedir. Kaplamanın davranışı A1 ve A2 numuneleri ile kıyaslandığında daha fazla parçalanma oluştuğu görülecektir. Bu nedenle Ni-CrC kaplama malzemesinin Co-WC kaplamasına göre daha gevrek olduğu, ancak buna rağmen kaplama sonrasında şekil değişime uygun olduğu tespit edilmiştir.

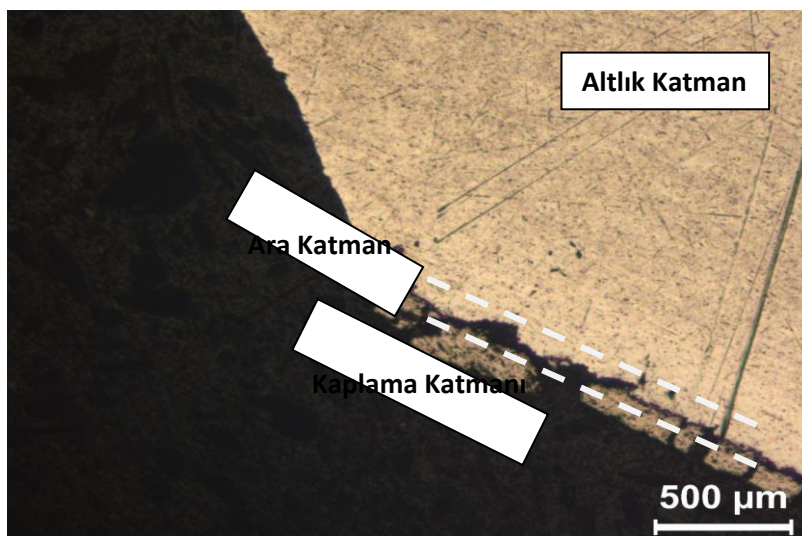
B1 numunesine ait altlık ile kaplama ara yüzeyinin hem optik hem de tarama elektron mikroskobu görüntüsü ve kimyasal analizleri verilmiştir. Optik görüntüler incelendiğinde; altlık ile kaplama ara yüzeyinin daha fazla girinti ve çıkıntıların olduğu, bu nedenle yapışma direncinin daha iyi olabileceği öngörülmektedir. Bu davranış neticesinde mekanik testler sonrasında dahi kaplama altlık yüzeyinde yapışık halde kalabilmektedir.



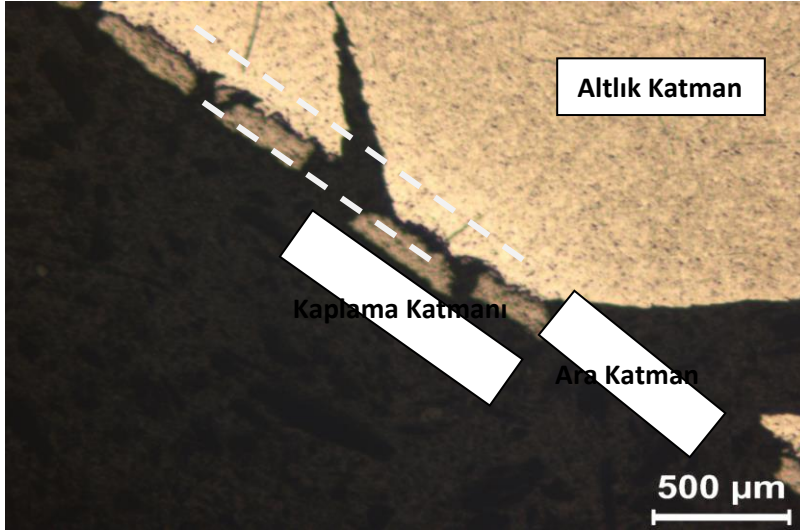
Resim 5.11. B1 numunesinin 3 nokta eğme ve çekme testi sonrasında oluşan deformasyonun kaplama yapısına etkisi ve metalografik kesit görüntü hazırlığı



Resim 5.12. B1 numunesi kaplama bölgesinin mikroskop görüntüsü



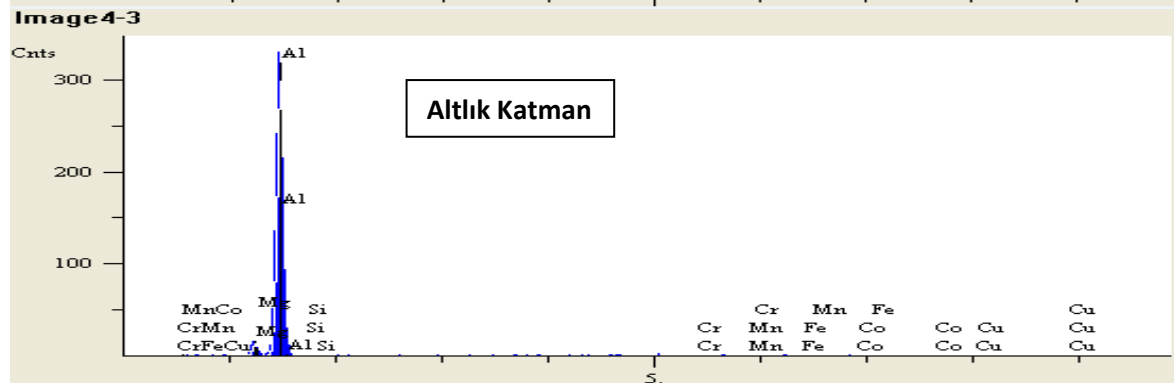
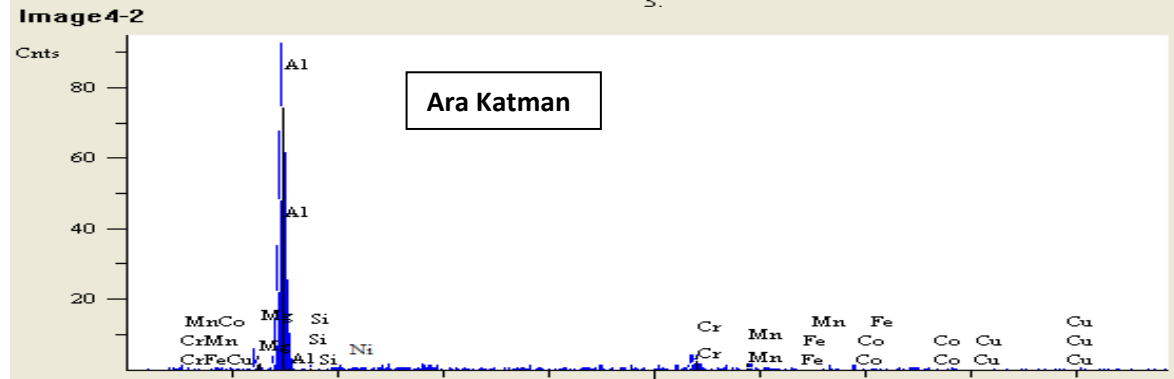
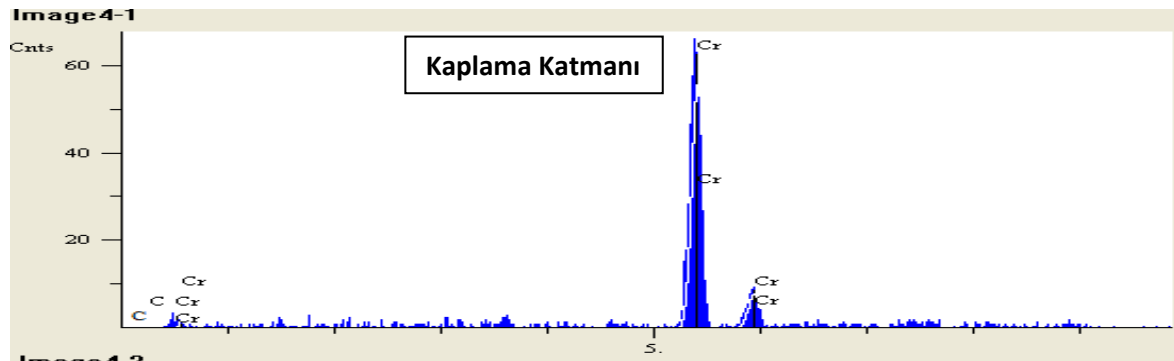
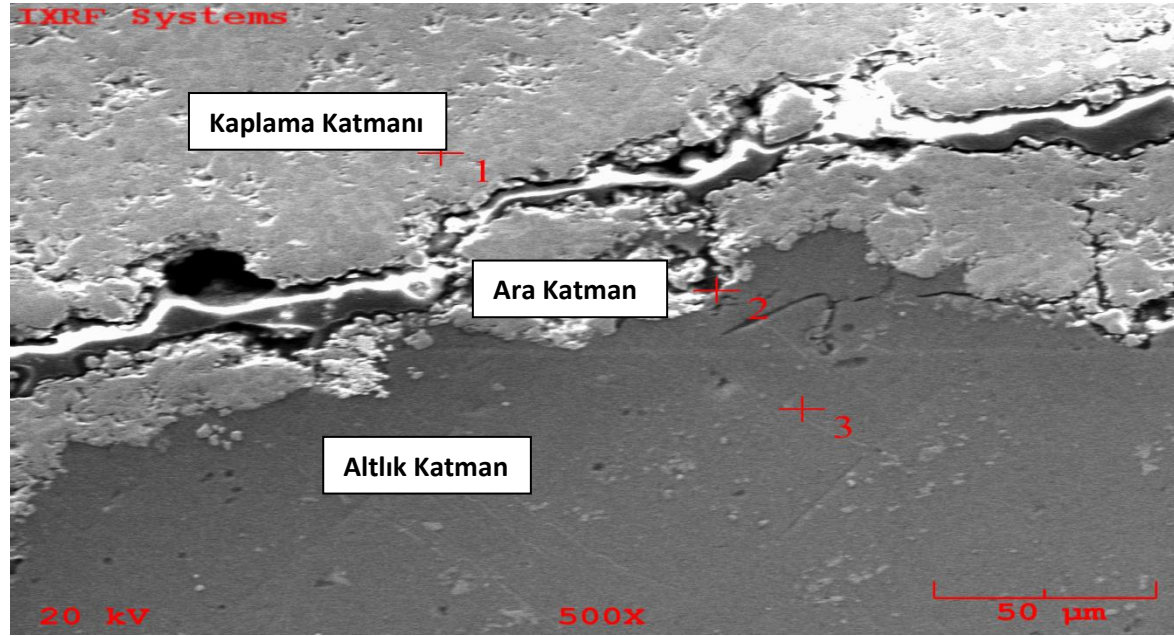
Resim 5.13. B1 numunesi çekme deformasyon bölgesi kaplama görüntüsü



Resim 5.14. B1 numunesi eğme deformasyon bölgesi kaplama görüntüsü

Resim 5.15.'te B1 numunesine ait SEM görüntüsü ve altlık/arayüzey/kaplamaya ait kimyasal analizler (EDS) verilmiştir. Alüminyum malzemenin Ni-CrC malzeme kullanılarak termal spreyle yöntemiyle kaplanması sonucunda elde edilen SEM görüntüsü incelendiğinde; başarılı bir kaplama üretildiği, kaplama yapılırken altlık malzemesinin yüzeyinin bir miktar ergimiş olduğu, bu nedenle her iki malzemenin (altlık ve kaplama) karıştığı bir geçiş bölgesinin var olduğu ve kaplamanın iyi bir tutunma sergilediği görülmektedir.

Numune üzerinden alınan 3 farklı bölge kimyasal analizleri incelendiğinde (Resim aşağı); kaplama içeriğinin Cr ve C elementlerinden oluştuğu görülmüştür. Geçiş bölgesine bakıldığında; kısmen ergime ve karışmanın etkisiyle hem altlık hem de kaplama bileşenlerinin neredeyse tamamının varlığı tespit edilmiştir. Bu durum bir geçiş bölgesi oluşumunu göstermektedir. Bu geçiş bölgelerinin varlığı bazı durumlarda mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemektedir.



Resim 5.15. B1 numunesi kimyasal analiz sonuçları

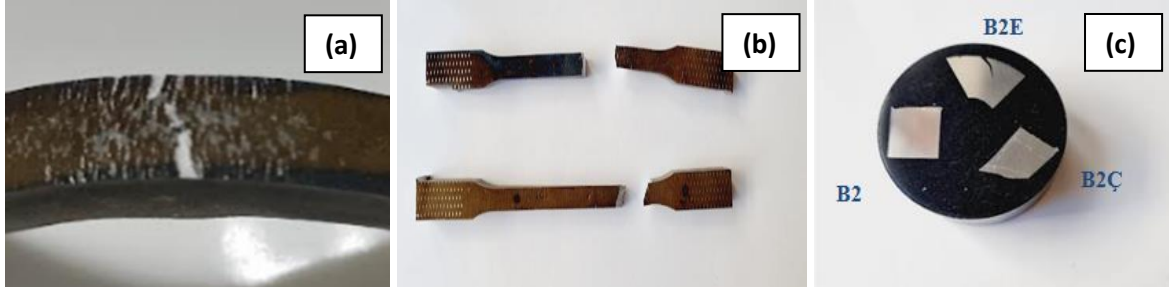
Hem Ni-CrC kaplama yapılan, hem de ilave olarak ısıtıl işlem uygulanan B2 numunesi yapısal ve kimyasal olarak incelenmiştir. Resim 5.16. a ve b’de çekme ve eğme testleri sonrasında oluşan görüntüler incelendiğinde; yüksek oranda deformasyon sırasında kaplamanın altlık malzeme ile uyumlu bir şekilde sünek şekilde davrandığı görülmektedir (Resim 5.16. c). Diğer numunelerde olduğu gibi; yüksek deformasyon sonucu altlık malzemede çatlak oluşması sırasında dahi kaplama tamamen altlıktan ayrılmamıştır. Bütünlüğü bozulan kaplama parçaları altlık üzerinde yapışık halde varlıklarını korumaktadır. Isıl işlem uygulaması kaplamanın hem bir geçiş bölgesi oluşturarak altlığa daha iyi tutunmasını hem de daha sünek bir davranış kazanmasını sağlamıştır. Bu malzemenin Ni-CrC ile kaplandıktan ve ısıtıl işlem uygulandıktan sonra da başarılı bir şekilde şekillendirilebileceği görülmektedir.

Aşağıda B2 numunesine ait altlık ile kaplama ara yüzeyinin hem optik hem de tarama elektron mikroskobu görüntüsü ve kimyasal analizleri verilmiştir. Optik görüntüler incelendiğinde; uygulanan ısıtıl işlem nedeniyle altlık ile kaplamanın birbirlerine daha da iyi yapıştığı görülmektedir. Termal spreycaplamanın başarısı üzerine ısıtıl işlemin avantajı da birleştiğinde, altlık/kaplama ara yüzeyinde oluşan difüzyona bağlı olarak yüksek kaplama dirençleri elde edilmektedir. Bu davranış neticesinde mekanik testler sonrasında dahi kaplama altlık yüzeyinde yapışık halde kalabilmektedir.

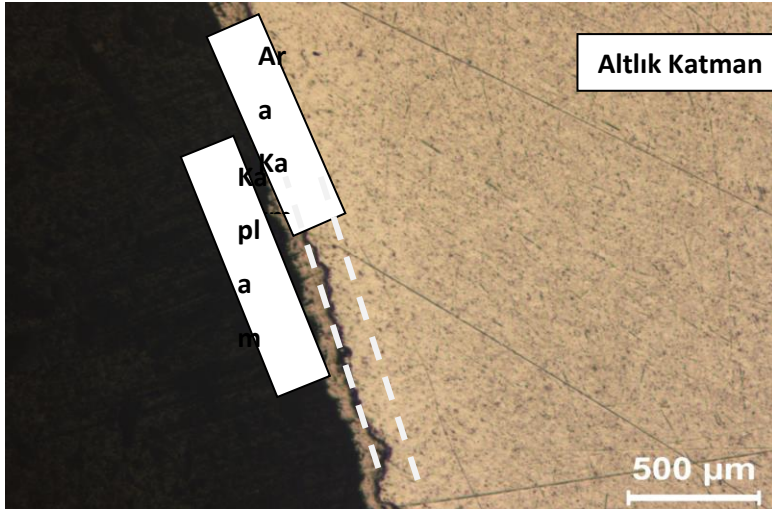
Aşağıdaki B2 numunesine ait tarama elektron mikroskobu görüntüsü ve altlık/arayüzey/kaplamaya ait kimyasal analizler (EDS) verilmiştir. Alüminyum altlık malzemelerin neden termal spreycaplamaya başarılı bir şekilde kaplanabildiği ve iyi sonuçların elde edilebildiği daha önce ifade edilmiştir. Buna ilave olarak yapılan ısıtıl işlem uygulaması neticesinde oluşan difüzyon nedeniyle kaplama özellikleri daha da gelişmektedir. Bu durum tarama elektron mikroskobu görüntüsü incelendiğinde çok daha iyi anlaşılmaktadır. B1 numunesi (sadece Ni-CrC ile kaplanmış) ile karşılaştırıldığında çok daha iyi bir kaplama oluştuğu görülmektedir. Kaplama işlemlerinde seramik tozlarının yanında metal/alaşım tozlarının bulunması kaplama işleminin başarısı ve kalitesini artırmaktadır.

Numune üzerinden alınan 3 farklı bölge kimyasal analizleri incelendiğinde (Resim 5.16); kaplama içeriğinin A1 numunesinde olduğu gibi, Cr, Ni ve C elementlerinden oluştuğu görülmüştür. Geçiş bölgesine bakıldığında; ısıtıl işlemin etkisiyle altlık ve kaplama

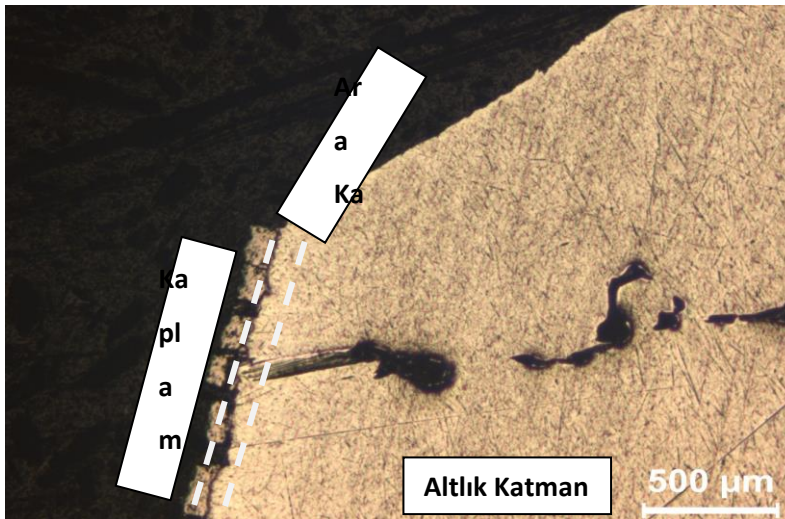
arasındaki difüzyonun etkilerini bariz olarak göstermiştir. Bu durum kaplamanın mekanik etkiler karşısında altlık yüzeyine yapışma direncini de artırmaktadır.



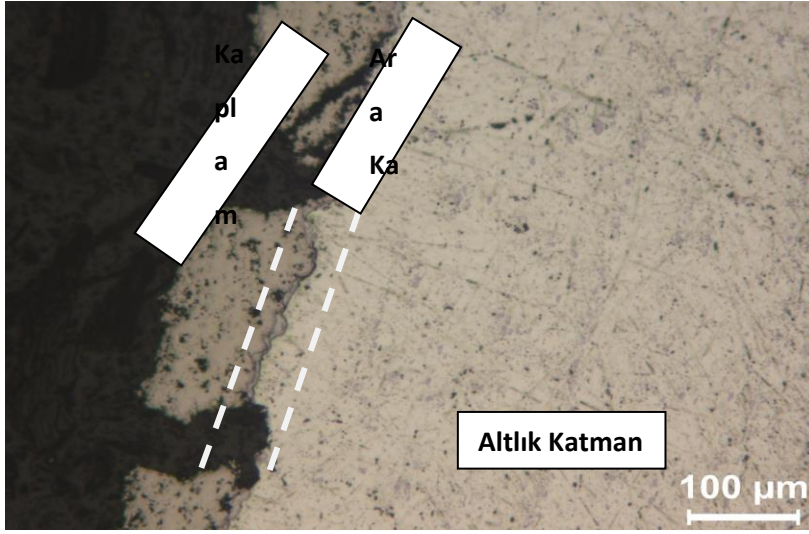
Resim 5.16. B2 numunesinin 3 nokta eğme ve çekme testi sonrasında oluşan deformasyonun kaplama yapısına etkisi ve metalografik kesit görüntü hazırlığı



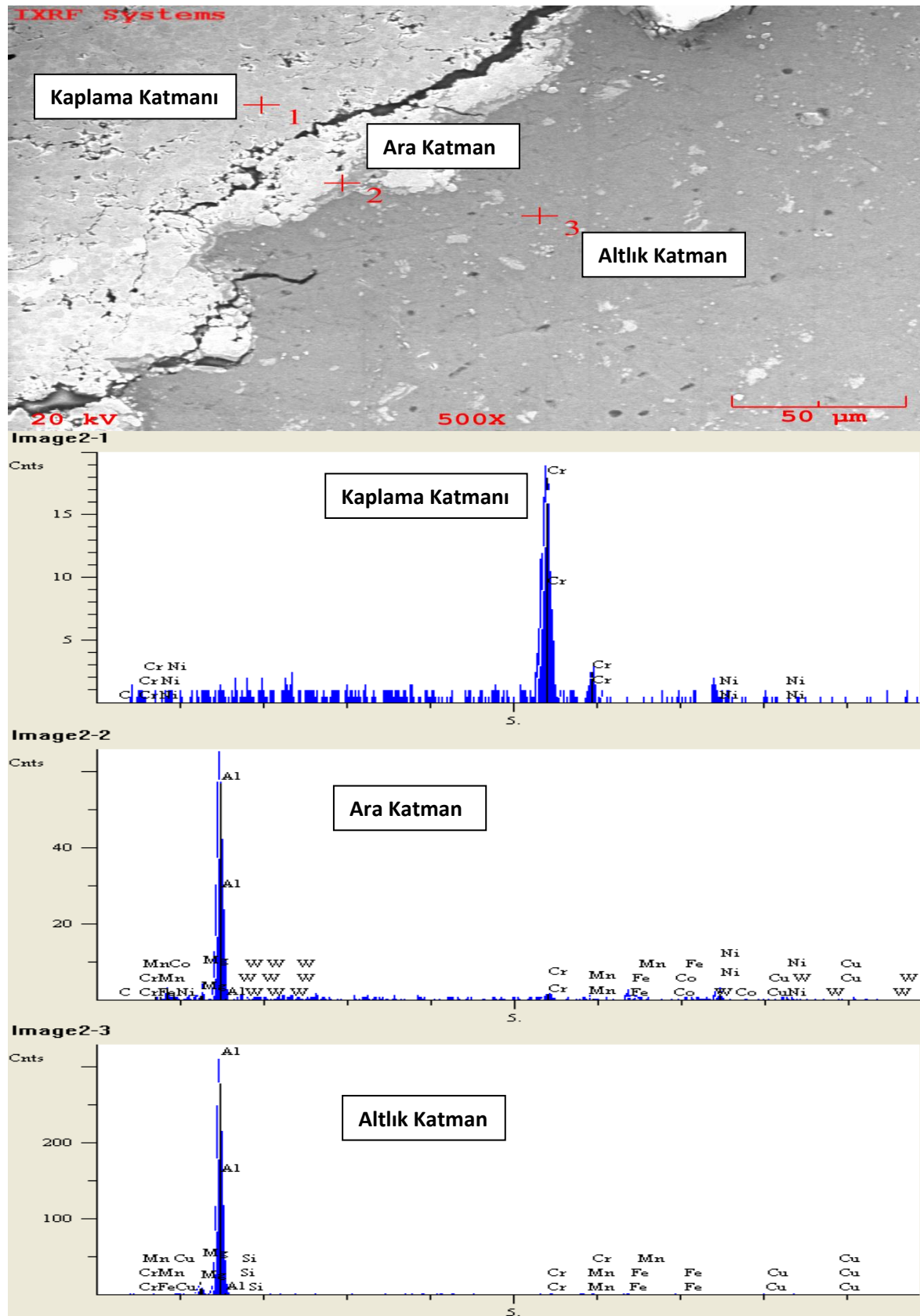
Resim 5.17. B2 numunesi kaplama bölgesinin mikroskop görüntüsü



Resim 5.18. B2 numunesi çekme deformasyon bölgesi kaplama görüntüsü



Resim 5.19. B1 numunesi eğme deformasyon bölgesi kaplama görüntüsü



Resim 5.20. B2 numunesi EDS analiz sonuçları

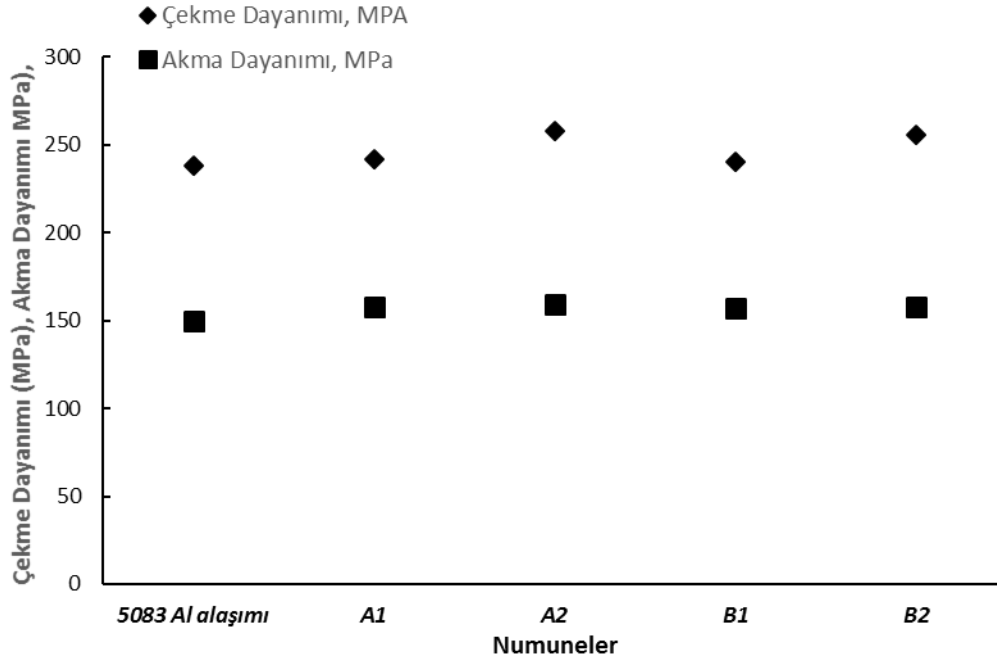
5.2. Mekanik Test Sonuçları

Üretilen numunelere; çekme, 3 nokta eğme ve sertlik testleri uygulanmış ve sonuçlar sırasıyla aşağıda verilmiştir. Uygulanan çekme testi sonucunda çekme ve akma dayanımı ile uzama ve kopma enerjisi ölçümleri yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde; genel olarak kaplama ve kaplama+ısıl işlem uygulaması sonunda malzeme çekme ve akma dayanımlarının altlık malzemeye göre geliştiği tespit edilmiştir. Özellikle kaplamadan sonra ısıl işlem uygulanması çekme özelliklerini daha da artırmıştır. Kaplama ve ısıl işlem uygulamasının etkileri kopma enerjisi ve uzama değerlerinde çok daha belirgin olmuştur. Sadece kaplama yapılan A1 ve B1 numunelerinde çok az değişim olmuştur. Ancak kaplama sonrası ısıl işlem uygulanan A2 ve B2 numunelerinde % 90-200 oranında uzama ve kopma enerjilerinde artış meydana gelmiştir. Kaplama için kullanılan malzeme sadece seramik esaslı olmayıp sermet (metal+seramik) malzeme olması nedeniyle ısıl işlem sonrasında kaplama ile altlığın birbirlerine yapışma özellikleri ve süneklikleri artmıştır. Uygulanan ısıl işlemin sıcaklığının düzeyi kaplama malzemesi termal karakteristiği bakımından, ancak gerilim giderme sıcaklığı düzeylerindedir. Bu sıcaklık düzeyi kaplamada yapısal bir dönüşüme olanak sağlamasa da, kaplamada var olan gerilimlerin azaltılmasına neden olabilir. Bu ısıl işlemde yapısal dönüşüm mümkün olmadığından dayanımda çok fazla değişim olmamakta, gerilimlerin azalmasına bağlı olarak süneklik ve kopma enerjisi özellikleri büyük oranda gelişmiştir.

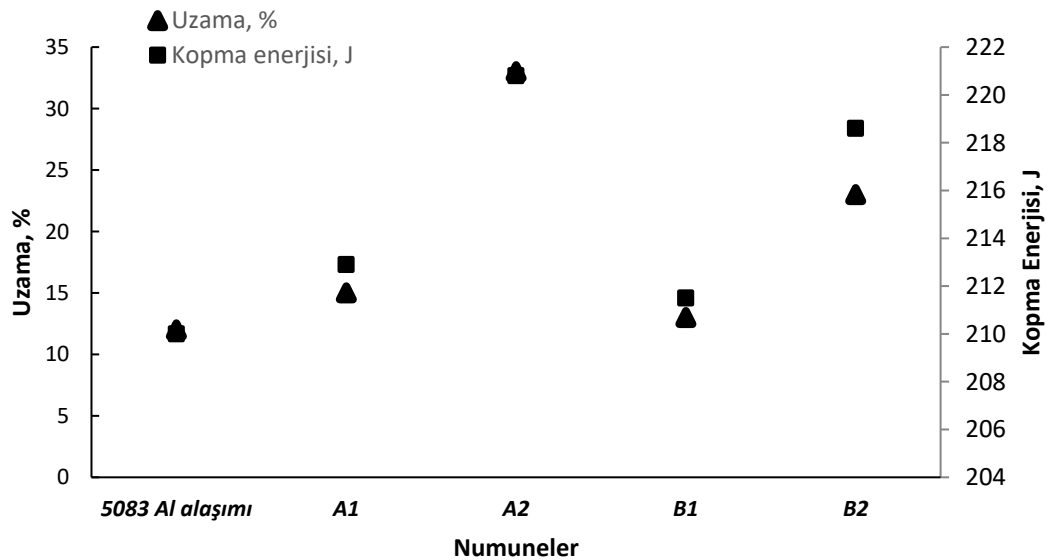
WC-Co sermet tozların geleneksel olarak aşınmaya dayanıklı tozlar olduğu birçok çalışmada ispatlanmıştır. Stewart ve ekibinin yaptıkları bir çalışmada, WC-Co tozlarını yüksek hızlı oksit-yakıt (HVOF) termal püskürtme yöntemiyle kaplanmış nano yapıları oluşturarak bu kaplama katmanlarının performansını incelemişlerdir. Mekanik testler sırasında WC-Co kaplanmış malzeme yüzeylerinin deformasyona ve uygulanan yüklere karşı gösterdiği direnci ortaya koymaktadır [94].

Bu tez çalışmasında da mekanik özellik sonuçları incelendiğinde; kaplama sonrasında malzemelerin çekme, eğme dayanımı ve kopma enerjilerindeki artışın (Şekil 5.1. ve Şekil 5.3.) benzer şekilde olduğu görülmektedir. Mekanik özellikler kaplama malzemesi türüne göre değerlendirildiğinde ise, Co+WC kaplamanın Ni+CrC kaplamadan çok az da olsa daha iyi özelliklerin oluşmasını sağladığı tespit edilmiştir. Kullanılan kaplama malzemesini oluşturan Co ve W elementlerinin mekanik özellikleri, genel olarak Ni ve Cr'dan daha iyi

olduğundan kaplama malzemesi olarak da bir miktar daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Diğer yandan WC' ün yüksek dirence sahip olması ve Co ile birlikte altlık ile çok daha kuvvetli bağ oluşturması neticesinde mekanik özellikler daha yüksek olmuştur..

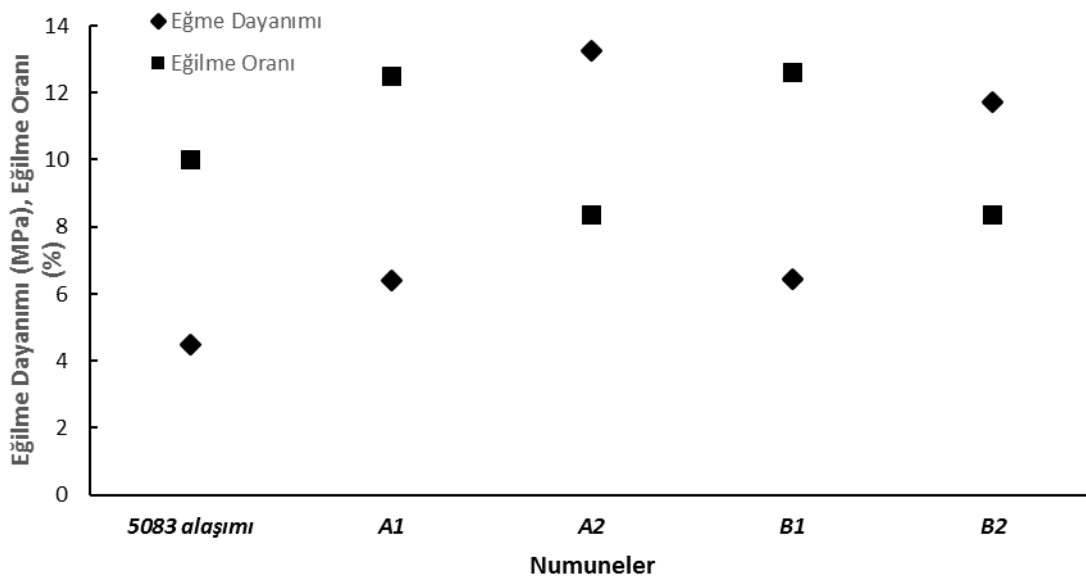


Şekil 5.1. Çekme ve akma dayanımlarının üretim şartlarına göre değişimi



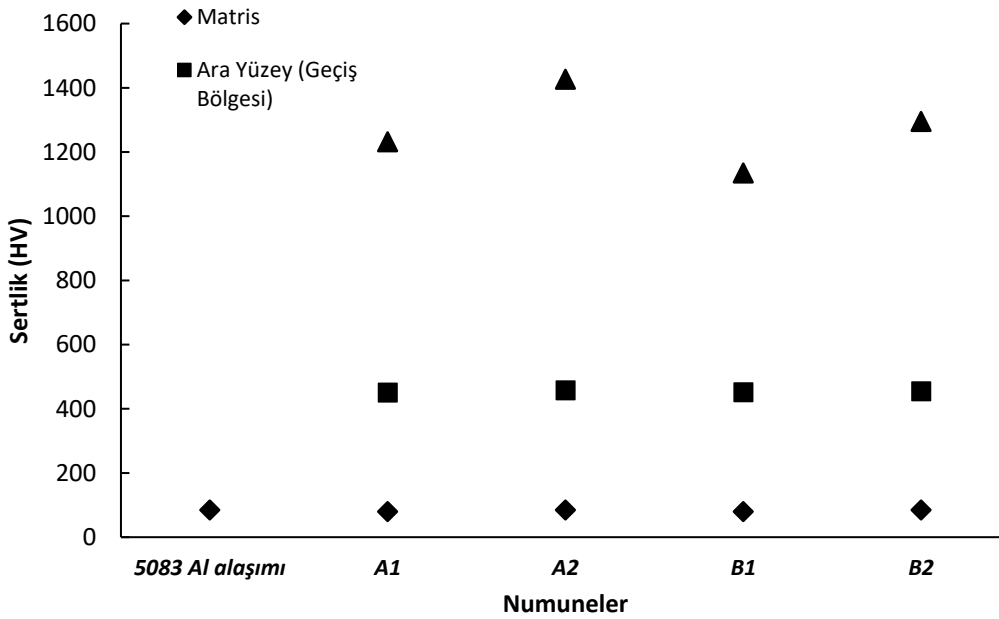
Şekil 5.2. Uzama ve kopma enerjilerinin üretim şartlarına göre değişimi

Eğilme özelliği malzemelerin şekillendirilebilme kabiliyetlerinin bir göstergesidir. Bu nedenle önemli malzeme özelliklerindendir. Alüminyum altlığına uygulanan kaplama ve kaplama+ısıtıl işlem uygulaması sonucunda eğilme dayanımı ve eğilme oranlarının değişimi Şekil 5.3.'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; kaplama işlemi sonunda A1 ve B1 numunelerinde eğilme dayanımı sınırlı miktarda, eğilme oranının ise büyük oranda arttığı görülmektedir. Termal spreyci kaplama ısı ve mekanik etkilerin birlikte yapıldığı bir uygulamadır. Özellikle sadece kaplanmış A1 ve B1 numunelerinde altlık malzemesinin yapısal özellikleri üretim sırasında hiç değişmediğinden bu sonuçlar elde edilmektedir. Buna karşın, kaplama ve ısıtıl işlem uygulanmış numuneler incelendiğinde ise; özellikle eğilme dayanımında A2 ve B2 numunelerinde büyük oranda artışlar meydana gelmiştir. Ancak A2 numunesinde daha fazla artış olmuştur. Çünkü Co ve WC malzemeler, Ni ve CrC'den daha yüksek dayanıma sahiptir. Bu nedenle oluşturulan kaplamalar arasında da farklılık oluşmakta ve Co+WC kaplama yapılan numunelerin eğilme dirençleri daha yüksek olmaktadır. Diğer yandan ısıtıl işlem görmüş numunelerde (A2 ve B2) eğilme dayanımı artarken, eğilme oranı ise azalmıştır. Isıtıl işlem uygulanması kaplamanın altlık üzerine yapışmasını da artırmaktadır. Bu nedenle kaplama ve ısıtıl işlem uygulanmış malzemelerde dayanımı artıran kaplamanın altlık ile birleşme kalitesinin artması, deformasyon sırasında kaplanmış malzemenin eğilmesine karşı direnci de artıracaktır. Bu nedenle daha iyi bağlanmış haldeki kaplama eğilmeye direnci zorlaştırarak altlık malzeme ne kadar sünek olsa da azalma sağlayacaktır.



Şekil 5.3. Eğilme dayanımı ve eğilme oranının üretim şartlarına göre değişimi

Üretilen numunelerin mikro sertlikleri ölçülmüş ve sonuçlar Şekil 5.4.'de verilmiştir. Kaplanmış ve kaplama+ısıtıl işlem görmüş malzemelerde kaplama/arayüzey/altlık olmak üzere üç bölgeden ölçüm alınarak farklar ortaya konulmuştur. Bu sonuçlara göre altlık malzemesinde sertlik hemen hemen değişmezken, geçiş bölgesinde (ara yüzey) ve kaplamada çok daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Geçiş bölgesi tek hat üzerinden ölçüm yapılarak değerlendirilmiştir. Çünkü bu kaplama ve ardından yapılan ısıtıl işlem şartları çok büyük oranda difüzyona yol açmadığından bir geçiş ara bölge oluşmamaktadır. Geçiş bölgesi sertlikleri ölçülen tüm numunelerde çok yakındır. Diğer yandan kaplamalardan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde C-WC kaplamanın daha yüksek sertlik değerine sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni WC' ün CrC' den daha sert olmasıdır. Bu nedenle kaplama sertliği bu kaplama malzemesinde daha fazladır. İlave olarak ısıtıl işlem uygulaması kaplama sertliğini bir miktar artırmıştır. Bu durum dayanım ile ilgili tüm özelliklerde olduğu şekildedir. Isıtıl işlem hem kaplamayı hem de altlık/kaplama ara yüzey bağını güçlendirmektedir. Bu nedenle sertlik te artış olmaktadır.



Şekil 5.4. Sertliğin üretim şartlarına göre değişimi

Jacops ve ekibinin yaptığı çalışmada HVOF tekniğini farklı iki yakıt ile WC sermet tozlarını püskürtmüş ve farklılıkları incelemiştir. W elementinin etkileriyle yapılan mekanik deney sonuçlarında sertlik değerlerinin yükseldiğini ve aşınma dayanımının

arttığını ortaya koymuştur[95]. Yaptığımız mekanik deneylere ve elde edilen değerlere göre numunelerin mekanik dayanım değerlerinde artış sağlayarak benzer doğrultuda sonuçlar elde edilmiştir.

Fang ve ekibinin yaptığı benzer bir çalışmada; WC–CrC–Ni kaplamanın HVOF yöntemiyle parametrelerin geliştirilerek mikro yapısı, kristal fazı, sertliği ve gözenekliliği gibi yüzey özellikleri araştırılmıştır. Oksijen akış hızının en çok sertliği etkilediği ve değişik sonuçlar elde edildiğini göstermiştir. Gözeneklerin azaltıldığı ve elde edilen sertlik değerlerinin yükseltilerek daha dayanıklı malzemeler elde edilmesini sağlamıştır [96]. Aynı kaplama yöntemi ve WC, CrC tozlarıyla yaptığımız deneylerde sertlik mukavemetinin artırıldığı sonucuna ulaştık. (Şekil 5.4.)

5.3. Balistik Test Sonuçları

Üretilen numunelere; uygulanan balistik testlerden elde edilen sonuçlar Resim 5.21-5.29 ve Şekil 5.5'te verilmiştir. Balistik testler, daha anlamlı sonuçların elde edilmesi bakımından mekanik özelliklerin daha iyi olduğu ısıtılmış numunelere uygulanmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde; genel olarak test yapılan Al altlık ve kaplanmış numunelerin tamamında mermi belirli bir derinliğe ulaşmış, ancak malzemeleri tamamen delip geçememiştir. Bu şartlardaki balistik testleri, düşük seviye veya ikincil seviye balistik malzemeler için kullanılmaktadır. Bu malzeme özellikle yakıt ve mühimmat depo muhafazalarında kullanılmakta ve kıvılcım üretmeyen bir malzeme olduğundan dolayı tercih edilmektedir. Bu çalışmada; kaplama ve ısıtılmış uygulamaları ile zırhlı araçlarda yakıt deposu malzemesi olarak kullanılan 5083 alaşımının geliştirilerek düşük seviye balistik özellikler kazandırılmaya çalışılmaktadır. Balistik testlerin seviyesi buna göre belirlenmiştir. Bu nedenle daha düşük özelliklerdeki ısıtılmamış malzemelere balistik test uygulaması yapılmamıştır.

Sonuçlar incelendiğinde; kaplama+ısıtılmış işlem uygulaması ile üretilen malzemelerin (A2 ve B2 numuneleri) balistik dayanımlarının altlık malzemeye göre % 8-32 oranında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kaplama yapılan malzemelerin mekanik özelliklerinin arttığı daha önceden belirtilmiştir. Isıtılmış işlem uygulaması sonunda ise bu özellikler daha

fazla gelişmiştir. Bu gelişmeye bağlı olarak balistik testler sırasında atılan mermi çekirdeğinin delme, deformasyon ve aşındırma etkilerine karşı daha dayanıklı olması beklemiştir. Elde edilen sonuçlar da bu beklentiyi karşılamıştır. Çünkü kaplama işlemi uygulanan A2 ve B2 numunelerin yüzeyinde ince (95-120 μm) de olsa çok sert bir tabaka oluşmaktadır. Uygulanan ısıtma işlemi sonucunda altlık ile kaplama arasında daha yüksek yapışma/bağlanma oluşması nedeniyle, bu tabaka aynı zamanda deformasyonun olumsuz etkilerine de dayanıklı hale gelmiştir. Özellikle kaplamadan sonra ısıtma işlemi uygulanması balistik özellikleri artırmıştır. Kaplama ve ısıtma işlemi uygulaması neticesinde altlık malzeme üzerindeki kaplama, çarpan mermi çekirdeğinden kaynaklanan darbeyi karşılayan sert ve daha dirençli bir katman olarak görev yapmaktadır.



Resim 5.21. 5083 numunesi atış sonrası plaka üzerinde mermi çekirdeğinin oluşturduğu deformasyon

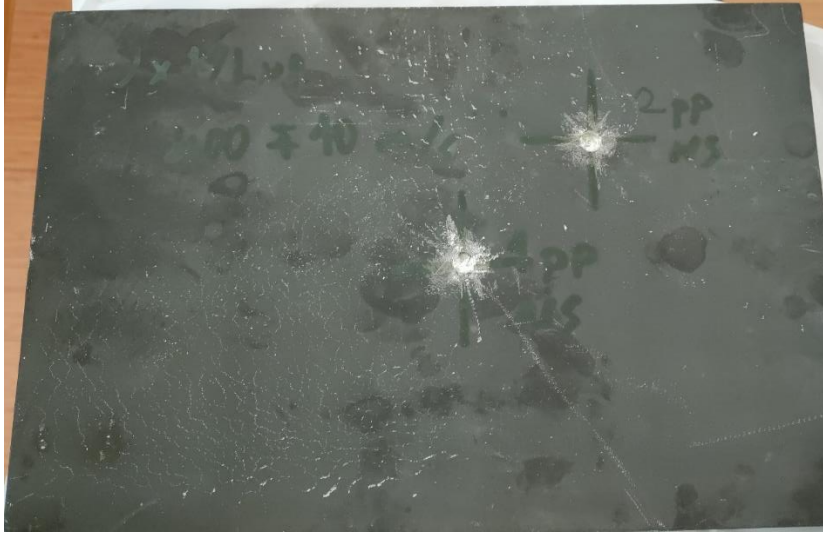
Mermi çekirdeği bu tabakayı geçebilmek için daha fazla enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Ancak, sadece seramik malzemeler ile yapılan kaplama çalışmalarında benzer şekilde uygulanan balistik testlerde seramik kısmın kolaylıkla parçalandığı görülmektedir. Bu kaplama türü daha yüksek deformasyon kabiliyetine sahiptir. Özellikle daha önceden gösterildiği gibi, eğme testi sonrasında meydana gelen yüksek miktardaki şekil değişimine rağmen kaplama altlık malzeme üzerinde yapışık halde kalmaya devam etmiştir. Bu nedenle de altlık ve kaplama daha fazla deformasyon direncine sahip olmakta, mermi izinin çevresinde kaplamada parçalanma görüntüleri oluşmamaktadır. Mermi çekirdeği altlık içerisine doğru kaplama parçalarını iterken, oluşan kompozit tabaka merminin malzemeyi delmesine karşı direnci artırmaktadır.

Alüminyum plakalar; hafif zırh sistemlerinde, uçak yapılarında ve köprü güvertelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kinetik enerjili mermilere maruz kalan tek veya çok katmanlı yüksek mukavemetli metallerin ve kumaşların balistik tepkisi deneysel, teorik ve sayısal çalışmalarda incelenmiştir[97]. İnce alüminyum levhalar oldukça zayıf bir balistik performansa sahip olduğundan, genellikle çok katmanlı veya aralıklı yapılarda, veya diğer malzemelerle kombinasyon kullanılırlar. Bir hedefin deformasyon direncini, farklı özelliklere sahip malzemelerle katmanlayarak geliştirme metotları uzun zamandır bilinmektedir. Örneğin; merminin kinetik enerjisini emmek için sert bir dış tabaka ve sünek bir iç tabaka tarafından desteklenen, mermi girişine direnecek yüzey tabakası katmanının delinmesini desteklemek için etkili bir kombinasyon olduğu gösterilmiştir [98]. Zırh ağırlığı belirli bir sınırın geçtiğinde, tasarıma yeni ve gelişmiş ihtiyacı duyulmaktadır. Alüminyum genellikle bu tür yapılarda ön tabaka ve destek plakası olarak kullanılır [99].

Katmanlı zırhların yapıları ön katman ile destek katmanı olarak oluşturulur. Ön katman yapısı atılan mühimmatın burun yapı ve biçimini deformasyona uğratarak balistik açıdan etkisini düşürmeyi sağlar. İkinci yapı olan destek katmanı ise atılan merminin kalan kinetik enerjisini düşürerek durdurmayı sağlar. Destek tabakası metal veya kompozit malzemeler kullanılır [100].



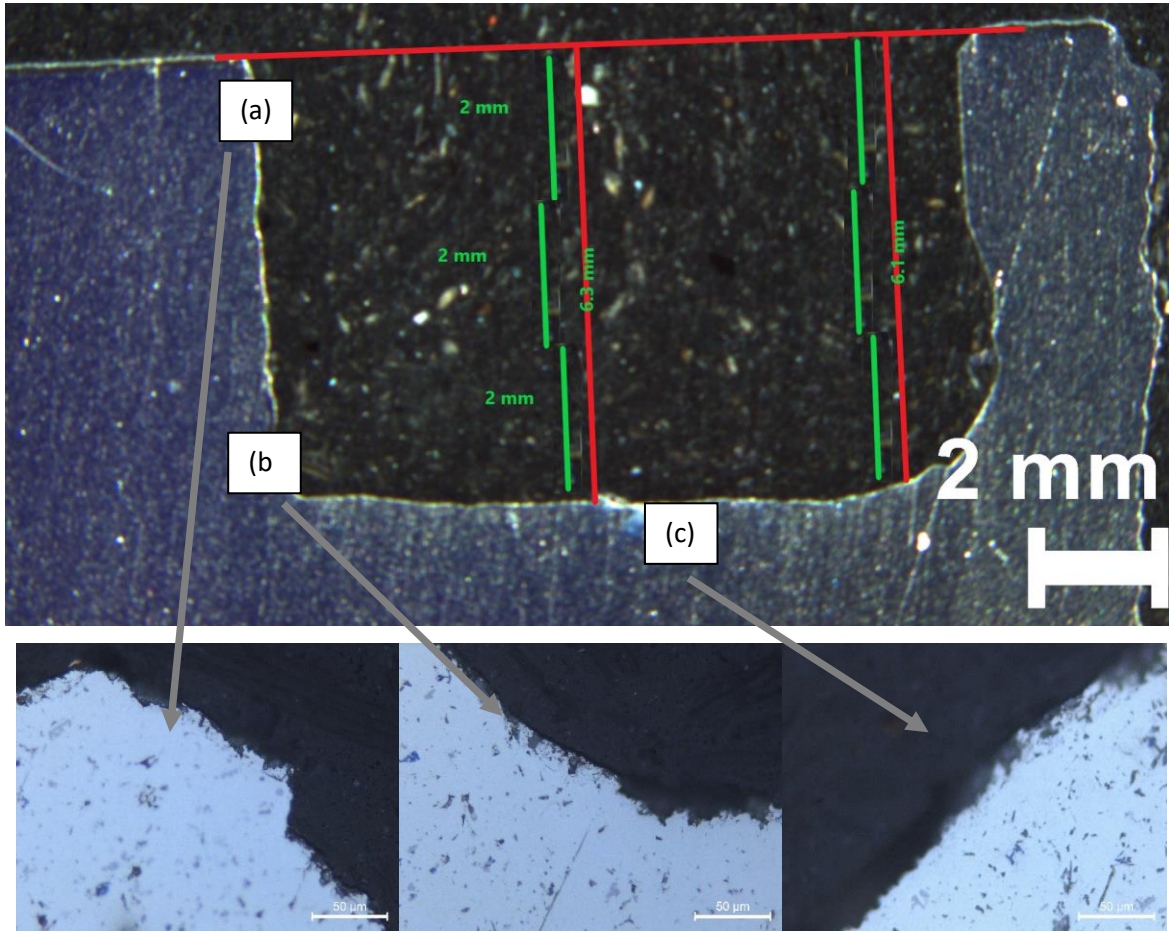
Resim 5.22. A2 numunesi atış sonrası plaka üzerinde mermi çekirdeğinin oluşturduğu



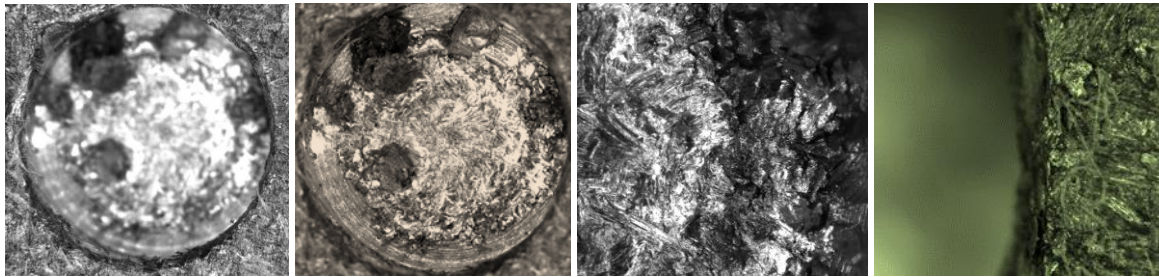
Resim 5.23. B2 numunesi atış sonrası plaka üzerinde mermi çekirdeğinin oluşturduğu

Bu hususların gösterilmesi amacıyla atış yapılan numunelerin deformasyona uğrayan bölgeleri kesit olarak mikroskop altında incelenmiş ve elde edilen görüntüler aşağıda verilmiştir. Mermi çekirdeğinin; 5083 Al numunesinde çarpma bölgesinde oluşturduğu oyukun boyutları ve mikroskop görüntüleri Resim 5.24-25'te, A2 numunesinin görüntüleri Resim 5.26-27'de ve B2 numunesine ait görüntüler ise Resim 5.28-29'da detaylı olarak gösterilmiştir. Ayrıca test sonuçlarında elde edilen iz derinlikleri Şekil 5.5'te verilmiştir.

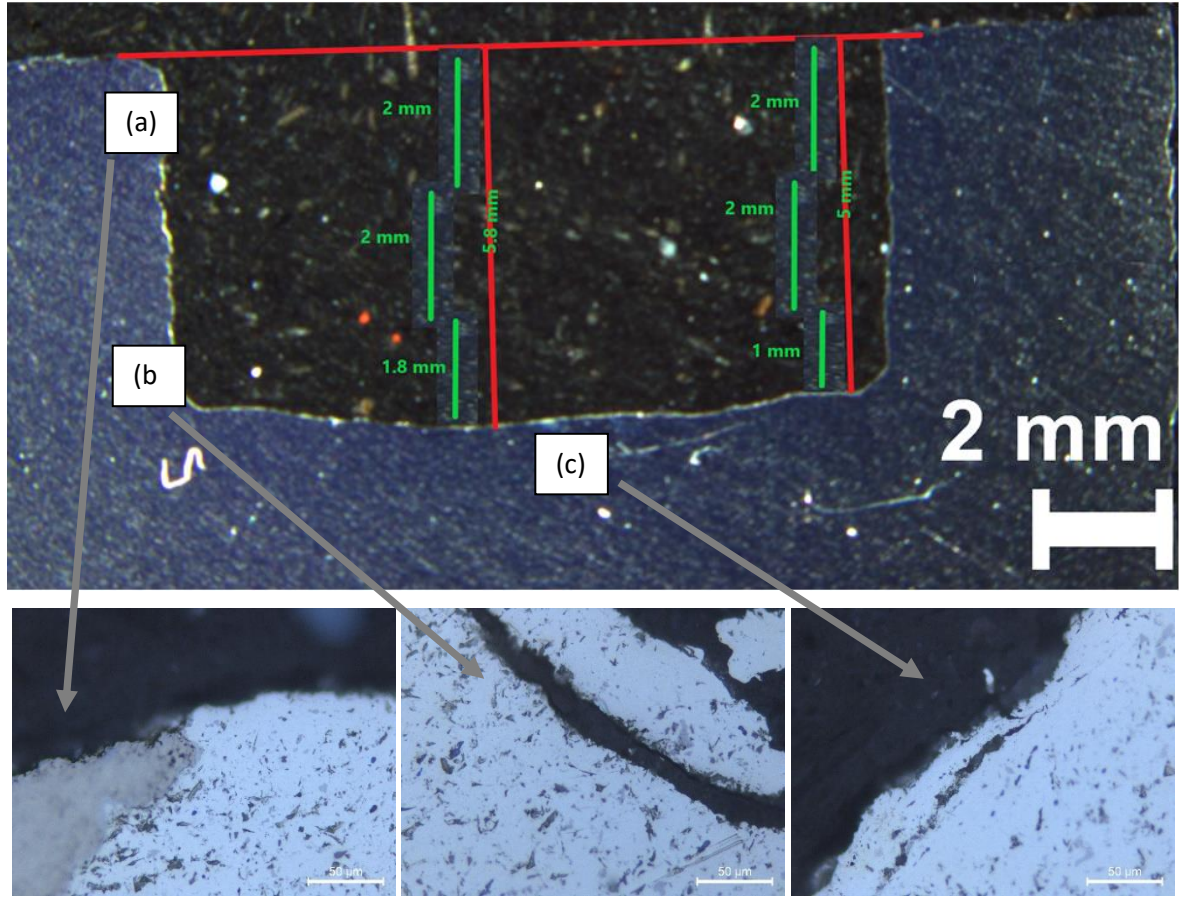
Görüntü ve sonuçlar incelendiğinde (Resim 5.24, 5.25 ve Şekil 5.5); 5083 Al malzemede çekirdek temas bölgesinde yüksek oranda deformasyon meydana geldiği, çekirdeğin deforme ettiği yüzeylerde ayrışma meydana gelmediği, ezilen altlık malzemesinin diğer kısımlara tam olarak sıkıştırıldığı/ezilerek karıştığı görülmektedir. 5083 Al malzemesi % 10-12 yüksek şekil değişimi özelliğine sahiptir. Isıl işlem uygulaması bu özelliği daha da geliştirerek % 18-20 düzeyine çıkarmaktadır. Bu durum şekil değişimi ve deformasyon özelliklerini de geliştirmektedir. İz taban görüntüleri de bu durumu teyit etmektedir. Taban yüzeyinde yüksek oranda deformasyon izleri görülmektedir.



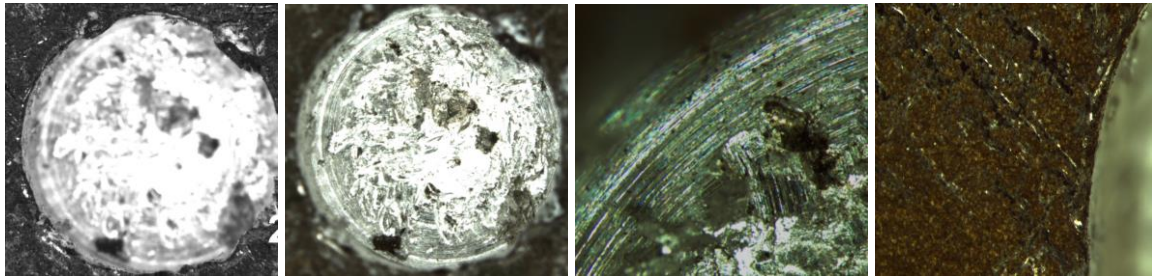
Resim 5.24. 5083 Al alaşıımı numunesi tahribata uğramış atış bölgesinin kesit görüntüleri



Resim 5.25. 5083 Al alaşıımı numunesi tahribata uğramış atış bölgesinin stereo mikroskop görüntüleri



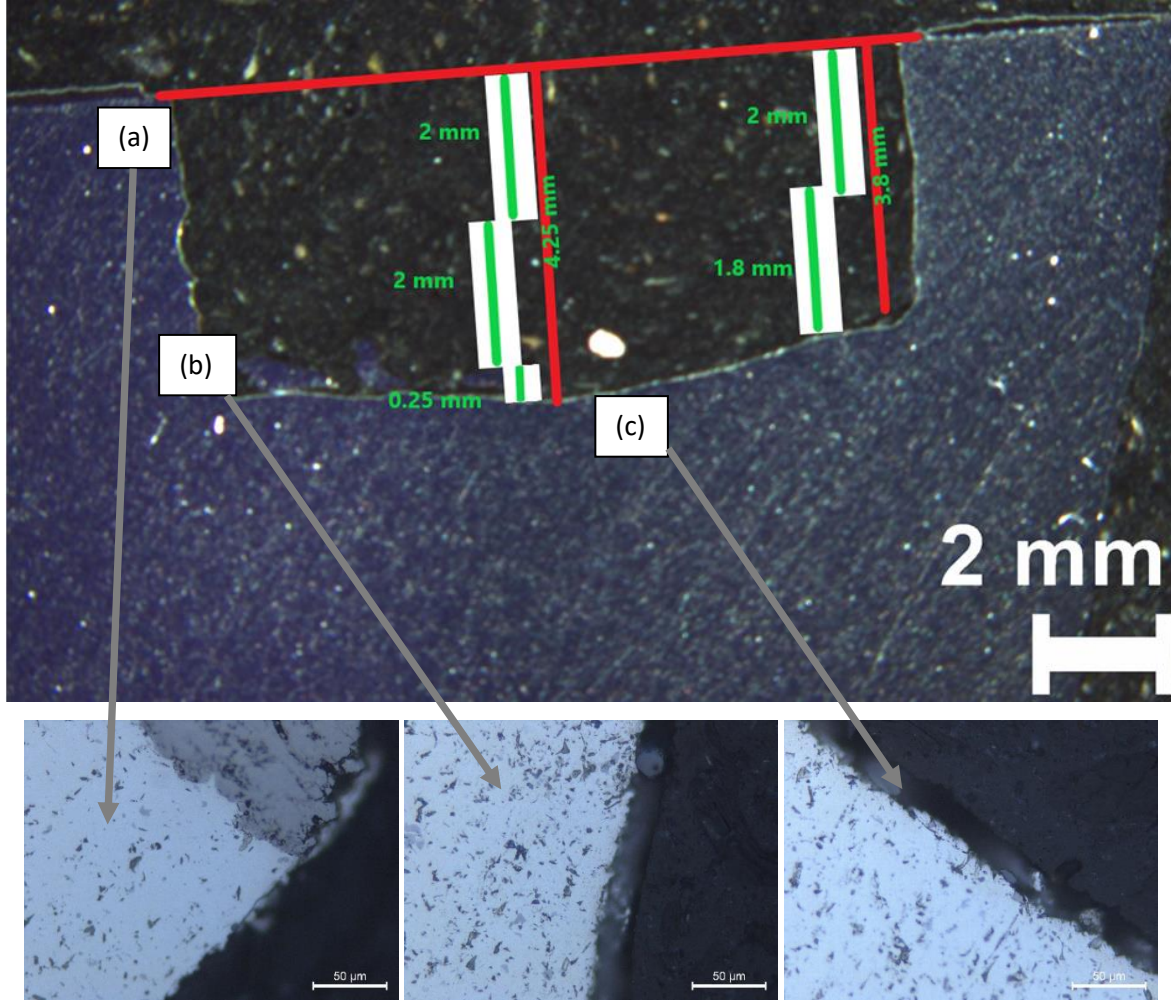
Resim 5.26. A2 numunesi (ısııl işlemlı Ni-CrC) tahribata uğramış atış bölgesinin kesit görüntüleri



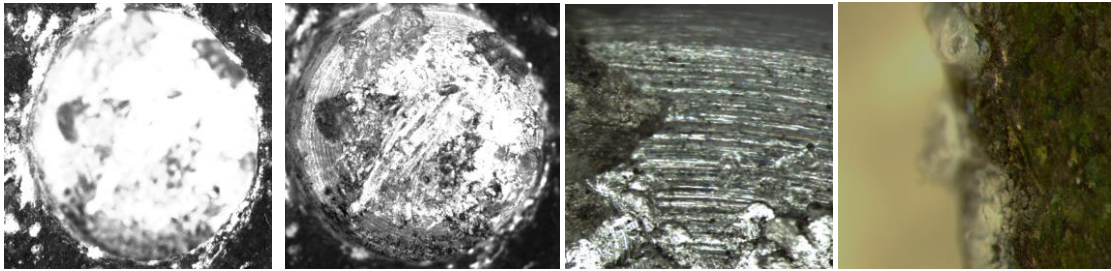
Resim 5.27. A2 numunesi (ısııl işlemlı Ni-CrC) tahribata uğramış atış bölgesinin stereo mikroskop görüntüleri

Diğer yandan hem Ni-CrC hem de Co-WC kaplanmış malzemelerde de bu durum aynı şekilde görülmektedir (Resim 5.26-27 ve Resim 5.28-29). Ancak kaplanma sonrasında malzeme görüntüsünde bir fark bulunmaktadır. Yüzeydeki kaplama tabakası deforme olan ve aşağıya doru ezilmeye/batmaya zorlanan altlık malzemesi ile birlikte yol alırken mermi uç kısmına gelen kısımda kaplama ve altlık malzemesinde kısmi kompozit bölgesi oluşmaktadır. Kompozit malzemelerin şekil değiştirme/deformasyon kabiliyeti metal

malzemelerden daha azdır. Bu durum 2 sonucu meydana getirir. Birincisi oluşan kompozit tabaka delinmeye karşı direnci artırırken, ikinci olarak fazla miktarda deforme edilen kompozit bölgelerde matris ile ayrışmalar (delaminasyon) meydana gelebilmektedir.



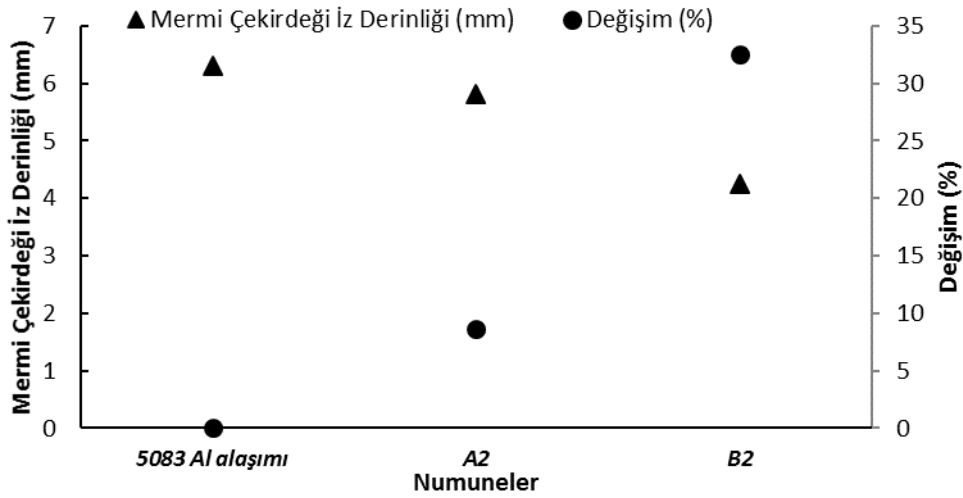
Resim 5.28. B2 numunesi (ısıtılmış Co-WC) tahribata uğramış atış bölgesinin kesit görüntüleri



Resim 5.29. B2 numunesi (ısıtılmış Co-WC) tahribata uğramış atış bölgesinin stereo mikroskop görüntüleri

Bu durum her iki kaplama uygulamasında da görülmektedir. Her iki malzemede özellikle iz tabanında ayrışan (kalkmış/ayrışmış parçalar şeklinde) kısımların oluştuğu görülmektedir. Bu ayrışmalar; oluşan kompozit kısımda meydana gelen aşırı deformasyona bağlı olarak önce çatlak oluşumu, çatlağın zamanla ilerlemesi ve ardından ise tabakalar şeklinde kopmalar nedeniyle meydana gelmektedir.

Diğer yandan bu oluşumun faydası da bulunmaktadır. Bu durum Şekil 5.5'te verilen iz derinlik ve değışimi sonuçlarında açıkça görülmektedir. 5083 Al altlık malzemede oluşan iz derinliği (en derin kısım baz alınarak) 6.3 mm olurken, Ni-CrC kaplanmış malzemede 5.8 mm ve Co-WC kaplanmış malzemede ise 3.25 mm'ye kadar azalmıştır. Bu iz derinlik sonuçları ve iz tabaka görüntüleri incelendiğinde daha iyi anlaşılmaktadır. Kaplanmış malzemelerde iz tabanında kaplamaya ait parçacıklar bulunmaktadır. Bu malzemelerde aynı zamanda bu kaplamalar ile altlık malzemesinin kompozit tabaka oluşturdıkları ve aşırı deformasyona bağlı olarak bu kısım ile altlık malzemenin birbirlerinden ayrıştığı açıkça görülmektedir. Kaplanmış malzemelerde 10 mm kalınlık 4.25 ve 5.8 mm'ye incelirken darbe alan kısımlarda % 40-58 deformasyon meydana gelmektedir. Bu durum kaplama yapılmasına rağmen bu malzemelerin şekillendirilme, süneklik ve darbe dayanımı gibi deformasyon kabiliyetini artıran özelliklerinin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu deformasyon özelliğine kaplamanın sermet malzeme olmasının da katkısı vardır. Sermet malzeme ile kaplamada var olan metal kısımlar deformasyon kabiliyetini geliştirmektedir. Kaplanmış malzemeler kendi aralarında değerlendirildiğinde ise, sertliği daha yüksek olan Co-WC kaplanmış malzemenin daha az deforme olduğu, ancak aynı zamanda mermi iz derinliğinin de daha az olan malzeme olduğu görülmektedir. Bu nedenle; mevcut malzemeler arasında en iyi balistik özellikleri Co-WC kaplanmış+ısıtıl işlem görmüş B2 malzemesinde elde edilmiştir.



Şekil 5.5. Üretim şartlarına bağlı olarak mermi çekirdeğinin oluşturduğu iz derinliklerinin değişimi

Stewart ve ekibinin WC–Co tozlarını yüksek hızlı oksit-yakıt (HVOF) termal püskürtme yöntemiyle kaplanmış numunelerle yaptığı deneylerde benzer sonuçlar elde etmiştir [94].

Özşahin ve ekibinin yaptığı plazma sprej yüzey kaplamanın üç farklı al alaşımında balistik dirence etkisini belirlemek için yürütülen deneysel bir çalışmada; hem kaplama yapılmamış hem de Co–Mo–Cr ve ZrO₂ kaplanmış plakaların 9,00 mm Parabellum mermilerinin yüksek hızlı darbeye karşı balistik performansları incelenmişlerdir. Bu çalışmada da kaplanmış plakaların deformasyon derinlik ve şişkinliklerinin kaplanmamış plakalara göre daha az olduğu yapılan ölçümlerde açıkça gösterilmiştir [101]. Test yapılan numunelerde balistik deformasyon sonrası plaka arkalarında herhangi bir şişlik oluşmamış ve mermiler plakaların iç kısmında belirli bir mesafe ilerleyebilmiştir (Resim 5.24, Resim 5.25, Resim 5.26). Kaplama malzemesine göre değişen bu ilerleme değerleri parçaların farklı oranlarda balistik dayanıma sahip olduklarını göstermektedir (Şekil 5.5).

A5083 alaşımı, mekanik özellikler bakımından hafif zırh olarak tercih edilmektedir. Börvik ve ekibi; kalınlıkları 15 ile 30 mm arasında değişen A5083-H116 Al levhalar üzerinde, 20 mm çapında, 98 mm uzunluğunda, HRC 53 konik burunlu sertleştirilmiş çelik mermilerle darbeleri delme deneyleri yapmıştır. Çalışma sonuçları, alüminyum levhaların delinme direncinin, aynı darbe koşulları altında çelik ve beton levhalarla oldukça rekabetçi olduğunu göstermektedir [102].

Bu tez çalışması sonuçları; özellikle kaplama ve ardından ısıtıl işlem uygulanması neticesinde A5083 malzemesinin ilk etapta hafif ve/veya ikincil zırh olarak, daha fazla çalışma neticesinde ise ana zırh yapı elemanı olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuç

Bu tez çalışmasında; A5083 al alaşımı Co-WC ve Ni-CrC malzemeleri ile kaplanmış, bir kısmına ısıtıl işlem uygulanmıştır. Üretilen malzemeler yapısal, mekanik ve balistik özellikler bakımından incelenmiştir. İncelemeler sonucunda;

- Termal spreyl katmanlı imalat ve kaplama yöntemi kullanılarak A5083 alüminyum alaşımının Co+WC ve Ni+CrC malzemeleri 95-120 µm kalınlıkta, yüzey boyunca sürekli ve homojen yapıda başarıyla kaplanabildiği,
- Termal spreyl ile kaplanmış plakalarda ısıtıl işlem yapılmış veya yapılmamış olsun hem karbür kesici hem de su jeti ile başarılı bir şekilde kaplama deformasyonu, kalkması veya dökülmesi oluşmadan işlemlerin yapılabildiği,
- Bu nedenle kaplama işlemleri sonrasında ilave imalat işlemlerinin uygun şekilde başarıyla yapılabileceği,
- Mekanik deneyler sırasında uygulanan etkiler neticesinde; kaplama ile altlık arasında herhangi bir ayrışmaya sebep oluşturmadığı ve kaplamanın sermet (metal+seramik) malzeme olması nedeniyle altlık ile birlikte % 50 düzeyinde deformasyona uğratarak şekillendirilebildiği,
- Kaplama yapılması sonucunda A5083 malzemenin çekme dayanımı % 10-15, eğme dayanımı % 45-50, uzaması % 95-100 ve darbe tokluğu ise % 10-15 oranında arttığı,
- Kaplama+ısıtıl işlem uygulaması neticesinde A5083 malzemenin çekme dayanımı % 15-25, eğme dayanımı % 100-200, uzaması % 85-120 ve darbe tokluğu ise % 15-25 oranında arttığı,
- Kaplama ve ısıtıl işlemler sonrasında mekanik özelliklerdeki artışın Co+WC kaplanmış malzemede meydana geldiği,

- Hem A5083 hem de kaplanmış malzemelerin balistik test sonucunda atılan mermiyi durdurarak delinmediği, plakaların arka kısmında şişme oluşumunun meydana gelmediği, bu nedenle bu balistik şartlar için daha ince ve hafif plakaların kullanılabileceği,
- Merminin oluşturduğu krater (çukur) derinliği bakımından Ni+CrC kaplama ile %8,6 ve Co+WC kaplama sonucunda ise %33 oranında azaltıldığı, tespit edilmiştir.

6.2. Öneriler

Yapılan çalışmalarla elde edilen tecrübeler neticesinde ileride yapılabilecek çalışma önerileri aşağıdaki şekildedir;

- Kaplama kalınlıkları kademeli olarak artırılarak plaka malzemelerdeki mekanik özelliklerin daha da geliştirilmesi durumu incelenebilir.
- Isıl işlem süresi değiştirilerek malzemelerin mekanik özelliklerindeki değişim araştırılabilir.
- Termal sprej katmanlı imalat yönteminde püskürtme işleminin daha kararlı bir yapıda ve ilerleme hızının belirlenmesiyle kaplama sürecinin geliştirilmesi denenebilir.
- Daha gelişmiş özelliklerdeki seramik ve metal karışımli tozlar termal sprej yöntemiyle parametreler denenerek kaplama işleminin geliştirilmesi analiz edilebilir.
- Bağlayıcı olarak kullanılan tozlar yerine farklı kimyasal kompozisyonda yapışmayı engellemeyecek seramik ve metal toz karışımlarıyla proses geliştirilebilir.
- Termal sprej kaplamada katmanların dizilim yönleri değiştirilerek kaplama başarısına olan etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Emmelmann, C., Kranz, J., Herzog, D. and Wycisk, E. (2013). Laser additive manufacturing of metals. in: V. Schmidt, M.R. Belegatis (Eds.), *Laser Technology in Biomimetics*, Springer, Heidelberg, pp., 143-161.
2. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. and Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metal. *Acta Materialia*, 117, 371-392.
3. ASTM F2792-12a, Standard terminology for additive manufacturing Technologies. *ASTM International*, 2012.
4. Turker, M., Godlinski, D. and Petzoldt, F. (2008). Effect of production parameters on the properties of in 718 superalloy by three-dimensional printing, *Materials Characterization*, 59(12), 1728-1735.
5. Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli imalat (3b baskı): Teknolojiler ve uygulamalar. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering* , 24(2) , 373-392.
6. Zhang, C., Wang, W., Xing, W. and Liu, L. (2020). Understanding on toughening mechanism of bioinspired bulk metallic glassy composites by thermal spray additive manufacturing. *Scripta Materialia*, (177), 112-117.
7. Radin, J. and Goldsmith. W. (1988) Normal projectile penetration and perforation of layered targets. *International Journal of Impact Engineering*, 229-259.
8. İnternet: Eklemeli İmalat Teknolojilerine Giriş. (2019). URL: <http://eklemeliimalat.info.tr/> Son Erişim Tarihi 10.12.2021.
9. İnternet: Katmanlı İmalat Üretim Yöntemleri. (2018). URL: <http://katmanliimalat.info.tr/2-eklemeli-imalat-teknolojileri/%20> Son Erişim Tarihi 20.12.2021.
10. Çelebi, A. ve Seziş, Ü. (2019). Katmanlı imalatta destek yapısının ve konumlandırmanın çarpılma üzerine etkisinin simufact additive yazılımı ile simülasyonu. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3(2), 182-188.
11. Chua, C. and Leong, K., (1998). *Rapid prototyping: Principles and applications in manufacturing*. Wiley, New York. 211-212.
12. Aydın, K. ve Karamolla, M. (2019). Katmanlı imalat ile üretilen metal malzemelerin kaynak kabiliyeti. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi BEU Journal of Science*, 8(4), 1610-1620.
13. Subramanian, K. (1994). Surface engineering. *ASM Handbook*. 5, 81-83, Ohio, ABD.
14. Poyraz, Ö., Yasa, E. ve Pilatin, S. (2015). *Katmanlı imalat ve talaşlı imalatın birlikte uygulandığı melez üretim sistemleri üzerine*. 6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, İstanbul.

15. Gibson, I., Rosen, D. ve Stucker, B. (2015). *Vat photopolymerization processes, in additive manufacturing technologies, 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. (2nd ed.), New York, USA: Springer, 63-103.
16. Ayalasomayajula, L. U., Pathivada, K. & Earle, R.R., Bhavani, A.V.S.. (2021). Novel Approach for Producing Pharmaceuticals in Layer by Layer Fashion: Additive Manufacturing. *Indo Global Journal of Pharmaceutical Sciences*. 11(1). 70-75.
17. İnternet: Additive Manufacturing URL: <https://formlabs.com/> Son Erişim Tarihi 26.03.2022.
18. Hornbeck, L. J. (1989). Deformable-mirror spatial light modulators (invited paper), spatial light modulators and applications III, *SPIE Critical Reviews*, 1150, 86- 102.
19. Dean, D., Wallace, J., Siblani, A., Wang, M. O., Kim, K., Mikos, A. G. and Fisher, J. P. (2012). Continuous digital light processing (cDLP): Highly accurate additive manufacturing of tissue engineered bone scaffolds. *Virtual Phys. Prototyp.*, 7(1), 13-24.
20. İnternet: Resul, İ. (2020). *Eklemeli imalat ve eklemeli imalat yöntemleri*. URL: <https://www.otonomfabrika.com/katmanli-imalat-uretim-nedir/> Son Erişim Tarihi 11.12.2021.
21. Anitha, R. (2001). Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. *Journal of Materials Processing Technology*, 118, 385-388.
22. Başçı, Ü. G. and Yamanoğlu, R. (2021). Yeni nesil üretim teknolojisi: FDM ile eklemeli imalat. *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 5(2), 339-352.
23. Çiçek, Ö. (2019). *Eriyik yığma modelleme ile üretilen ABS ve PLA parçaların mekanik özelliklerinin değişken dolgu oranlarında karakterizasyonu ve sayısal modellemesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 62.
24. Gibson, I., Rosen, D. and Stucker, B. (2015). *Development of additive manufacturing technology, in additive manufacturing technologies, 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. (2nd ed.), USA: Springer, New York, 19-41.
25. Longhitanoa, G. A., Larosaa, M. A., Munhoza, A. L. J., Zavagliaa, C. A. C. and Ierardia, M. C. F. (2015). Surface finishes for Ti-6Al-4V alloy produced by direct metal laser sintering. *Materials Research*, 18(4), 838-842.
26. Donyong, D., Moverare, J., Peng, R. L. and Söderberg, H. (2017). Microstructure and anisotropic mechanical properties of EBM manufactured inconel 718 and effects of post heat treatments. *Materials Science And Engineering*, 693, 151-163.
27. Raghavan, N., Dehoff, R., Pannala, S., Simunovic, S., Kirka, M., Turner, J., Carlson, N. and Sudarsanam, S. B. (2016). Numerical modeling of heat-transfer and the influence of process parameters on tailoring the grain morphology of IN718 in electron beam additive manufacturing, *Acta Materialia*, 112, 303-314.

28. Wooten, J. and Dennies, P. D. (2008). Electron Beam Melting Manufacturing For Production Hardware. SAE International. 8-61.
29. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D. and Li, H., (2015). Wire-feed additive manufacturing of metal components: Technologies, developments and future interests. *Additive Manufacturing Technology*, 81, 465.
30. Murr, L. E., Gaytan, S. M., Ramirez, D. A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K. N., Shindo, P. W., Medina, F. R. and Wicker, R. B. (2012). Metal fabrication by additive manufacturing 1-14 using laser and electron beam melting technologies. *Journal Of Materials Science & Technology*, 28(1), 1-14.
31. Zhao, J., Zhang, B., Li, X. and Li, R. (2015). Effects of metal-vapor jet force on the physical behavior of melting wire transfer in electron beam additive manufacturing. *Mater Process Technology*, 220, 243–250.
32. Taminger, K., (2008, 22 Mayıs). *Electron beam freeform fabrication: A fabrication process that revolutionizes aircraft structural designs and spacecraft supportability*. ARMD Technical Seminar, Washington.
33. Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering And Performance*, 23(6), 10-11.
34. Cunningham, C. R., Flynn, J. M., Shokrani, A., Dhokia, V. and Newman, S. T. (2018). Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 22, 672-686.
35. Lee, S. H. (2020). Optimization of cold metal transfer-based wire arc additive manufacturing processes using gaussian process regression, *Metals*, 10(4), 461.
36. Yang, J., Yang, H., Yu, H., Wang, Z. and Zeng, X. (2017). Corrosion behavior of additive manufactured Ti-6Al-4V alloy in NaCl solution, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48(7), 3583–3593.
37. Williams, S.W., Martina, F., Addison, A.C. (2016). Wire Arc Additive Manufacturing, *Material Science Technology*, 32 (7), 641-647.
38. Mcandrew, A. R. (2018). Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire arc additively manufactured features for microstructural refinement. *Additive Manufacturing*, 21, 340-349.
39. Lee, W. C., Wei, C. C. and Chung, S. C. (2014). Development of a hybrid rapid prototyping system using lowcost fused deposition modeling and five-axis machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11), 2366-2374
40. Olsen, H. B. and Craig, J. J. (1993). *Automated composite tape lay-up using robotic devices*. Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, 291-297.
41. İnternet: Katman Gösterimi URL: <http://www.mtorres.es/pdf/torreslayup.pdf> Son Erişim Tarihi 12.03.2022.

42. Kirihera, S. and Nakata, K. (2021). *Multi-dimensional additive manufacturing*. Osaka University Osaka. Springer Singapore, 175.
43. Robert, C. and Tucker, E. (2013). *Thermal spray technology*. ASM Handbook, 5, 497-509.
44. Sahoo, P., Carr, T. and Martin, R. (1998). Thermal spray manufacturing issues in coating IGT hot section components. *Thermal Spray Technology*, 7, 481–483.
45. Machio, C. N., Akdogan, G., Witcomb, M. J. and Luyckx, S. (2005). Performance of WC–VC–Co thermal spray coatings in abrasion and slurry erosion tests, *Wear*, 258, 434-442.
46. Boeing Standards. (2006). *Thermal spray repair of exterior clad aluminum*. D6-51343, USA, 1-42.
47. Vackel, A., Dwivedi, G. and Sampath, S. (2015). Structurally integrated, damage-tolerant, thermal spray coatings. *JOM*, 67, 1540–1553.
48. Fauchais, P., Montavon, G., Bertrand, G. (2010). From Powders To Thermally Sprayed Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 19, 56–80.
49. DIN, E. (2005). *Thermisches spritzen: Begriffe, einteilung*. Berlin, Norm Zurückgezogen, 657.
50. Davis, J. R. (2004). *Handbook of thermal spray technology*; ASM international materials park. USA, 29–55.
51. Özel, S. (2013). Yüzey kaplama işlemlerinde kullanılan ısıl püskürtme yöntemleri. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 88-97.
52. Pawlowski, L. (2008). *The science and engineering of thermal spray coatings*. (2nd Edition), John Wiley, Sons Ltd, Chichester.
53. Minisker, M. A. (2009). *Termal sprej yöntemiyle oluşturulan kaplamaların mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 26.
54. Boronenkov, V. and Korobov, Y. (2016). *Fundamentals of arc spraying physical and chemical regularities*. (1st Edition). Springer International Publishing: Imprint: Springer, 1928-1929.
55. Alpay, A. (2000). *Plazma sprej ZrO₂ termal bariyer kaplamasına silisyum karbür ilavesinin kaplama özellikleri üzerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 89.
56. Clare M. J. H. and Crawmer, D. E. 1982. Thermal spray coatings, metals handbook. *American Society for Metal*, 5, 361-375.
57. İnternet: Termal Sprey Yöntemi URL:
<https://teslab.sakarya.edu.tr/tr/icerik/10729/42142/termal-sprey-nedir>, Son Erişim
Tarihi 26.02.2022.

58. Fauchais, P., Fukumoto, M., Vardelle, A., Vardelle, M. (2004). Knowledge Concerning Splat Formation: An Invited Review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 13, 337–360.
59. Asgari, H., Saha, G.C., Mohammadi, M. (2017). Tribological Behavior Of Nanostructured HVOF Thermal Sprayed WC-17NiCR Coatings. *Ceramics International*, 43, 2123–2135.
60. Kempasiddaiah, S., Sridhar, K., Sethuram, D., Murthy, K., Koppad, P., and Ramesh, C. (2019). HVOF sprayed inconel 718/cubic boron nitride composite coatings: Microstructure, microhardness and slurry erosive behaviour. *Materials Research Express*. 6(12), 15-16.
61. Sidhu, T. S., Prakash, S. and Agrawal, R. D. (2005). State of the art of HVOF coating investigations-a review. *Marine Technology Society Journal*. 39, 53-64.
62. Altuncu, E. (2021). Katmanlı imalat teknolojisinde termal sprej teknolojisi ile üretim kabiliyeti. *Metallurji ve Malzeme Dergisi*, 1, 9.
63. Joseph, S. (2003). *Production of coated and free-standing engineering componenets using the HVOF process*. Doktora Tezi, Dublin City University.
64. Tapağ, M., Elbüken, O., Toy, C. ve Akbulut, H. (2021). Soğuk toz püskürtme yöntemi ile katı parça üretimi tasarımı. *Katmanlı İmalat Enstitüsü*, 8(2), 98-99.
65. Villafuerte, J. (2015). Modern cold spray: Materials, process, and applications. Ontario, Canada, Modern Cold Spray. 435.
66. Cormier, Y., Dupuis, P., Farjam A. (2014). Additive Manufacturing of Pyramidal Pin Fins: Height and Fin Density Effects Under Forced Convection, *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 75, 235-244.
67. Pattison, J., Celotto, S., Morgan, R., Bray, M., and Oneill, W. (2007). Cold gas dynamic manufacturing: A non-thermal approach to freeform fabrication. *International Journal Machine Tools Manufacture*, 47(3–4), 627-634.
68. Wang, X., Feng, F., Klecka, M. A., Mordasky, M. D., Garofano, J. K., El-Wardany, T., Nardi, A. and Champagne, V. K. (2015). Characterization and modeling of the bonding process in cold spray additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 8, 149-162.
69. Assadi, H., Gärtner, F., Stoltenhoff, T. and Kreye, H. (2013). Bonding mechanism in cold gas spraying. *Acta Materialia*, 51(15), 2003.
70. Schmidt, T., Gärtner, F., Assadi, H. and Kreye, H. (2006). Development of a generalized parameter window for cold spray deposition, *Acta Materialia*. 54(3), 729-742.
71. Gärtner, F., Stoltenhoff, T. and Schmidt, T. et al. (2006). The cold spray process and its potential for industrial applications. *Journal Thermal Spray Technology*, 15, 223–232.
72. Dykhuizen, R. C. and Smith, M. F. (1998). Gas dynamic principles of cold spray. *Journal Thermal Spray Technology*, 7, 205-212.

73. İnternet: Soğuk Sprey Teknolojisi URL: <https://teslab.sakarya.edu.tr/tr/icerik/16634/85704/soguk-sprey>. Son Erişim Tarihi: 01.04. 2022
74. Milanti, A., Matikainen, V., Koivuluoto, H., Bolelle, G., Lusvarghi, L. and Vuoristo, P. (2015). Effect of spraying parameters on the microstructural and corrosion properties of HVOF-sprayed Fe–Cr–Ni–B–C coatings. *Surface Coating Technology*, 277, 81–90.
75. German, R. M. (1998). *Powder metallurgy of iron and steel*. Jhon Willey, Sons, U.S.A. 496.
76. Upadhyaya, G. S. (1996). *Powder metallurgy technology*. UK: Cambridge International Science Publishing.
77. Austin, T., Sutton, C., Kriewall, S., Ming C. Leu, and Newkirk, J. W. (2016). *Powders for additive manufacturing processes characterization techniques and effects on part properties, solid freeform fabrication*. 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference Reviewed Paper, 1004-1030.
78. Höganäs, A. B. (1996). *Production of iron and steel powders*. Höganäs PM School, 3-21.
79. Simchi, A. (2004). The role of particle size on the laser sintering of iron powder. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 35, 937–948.
80. Nandan, R., DebRoy, T. and Bhadeshia, H. K. D. H. (2008). Recent advances in friction-stir welding- process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*, 53(6), 980–1023.
81. Yu, J., Lin, X., Ma, L., Wang, J., Fu, X., and Chen, J. (2011). Influence of laser deposition patterns on part distortion, Interior quality and mechanical properties by laser solid forming (LSF), *Material Science and Engineering A*, 1094-1104.
82. Tang, H. P., Qian, M., Liu, N., Zhang, X. Z., Yang, G. Y. and Wang, J., (2015) Effect of powder reuse times on additive manufacturing of Ti–6Al–4V by selective electron beam melting. *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 67(3), 1-9.
83. Dietrich, S. & Wunderer, M. & Huissel, A. and Zaeh, M. F. (2016). A new approach for a flexible powder production for additive manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 6. 88-95.
84. Strondl, A., Lyckfeldt, O. and Brodin, H. (2015). Characterization and control of powder properties for additive manufacturing. *JOM*, 67, 549–554.
85. Tehrani, S., Arash, Shamsaei, N., Surya, A., Mallory, J. and Ramesh, R. (2021). *Powder reuse effects on the tensile behavior of additively manufactured inconel 718 Parts*.
86. Ge, P., Zhang, Z., Tan, Z. J., Hu, C. P., Zhao, G. Z., Guo, X. (2019). An integrated modeling of process-structure-property relationship in laser additive manufacturing of duplex titanium alloy. *International Journal of Thermal Sciences*, 140, 329-343.

87. Li, Y. and Gu, D. (2014). Parametric analysis of thermal behavior during selective laser melting additive manufacturing of aluminum alloy powder. *Materials & Design*, 63, 856-867.
88. İnternet: Alüminyum 5083 Özellikleri. URL: <https://seykoc.com.tr/icerik/5083?dil=tr>: Son Erişim Tarihi 29.12.2021.
89. İnternet: Metalurjik Toz Özellikleri. URL: <https://www.oerlikon.com/metco/en/media-resources/safety-data-sheets-sds/> Son Erişim Tarihi 21.12.2021.
90. İnternet: Termal Sprey Teknikleri URL: <https://www.praxairsurfacetechologies.com/en/materials-and-equipment/coating-equipment/thermal-spray-coating-systems/high-velocity-oxygen-fuel-hvof> Son Erişim Tarihi 21.12.2021
91. Vaz, R. F., Silvello A, Albaladejo V., Sanchez J, and Cano I. G. (2021). Improving the wear and corrosion resistance of maraging part obtained by cold gas spray additive manufacturing. *Metals*, 11(7), 1092.
92. Tekin, E., Uyum, S., Karahan, B., Tekin, K. C. ve Malayoğlu U. (2021). Soğuk püskürtme teknolojisi ve uygulamaları. *Mühendis ve Makine*, 62(702), 106-150.
93. Javed, M. A., Ang, A. S. M, Bhadra, C. M., Piola R., Neil, W. C., Berndt, C. C., Leigh, M., Howse, H., Wade, S. A. (2021). Corrosion and mechanical performance of HVOF WC-based coatings with alloyed nickel binder for use in marine hydraulic applications. *Surface and Coatings Technology*, 418,
94. Stewart, D. A., Shipway, P. H. and McCartney, D. G. (1999). Abrasive wear behaviour of conventional and nanocomposite HVOF-sprayed WC–Co coatings, *Wear*, , Part 2, 225–229.
95. Jacobs, L., Hyland, M. M. and De Bonte, M. (1998). Comparative study of WC-cermet coatings sprayed via the HVOF and the HVOF Process. *Journal Therm Spray Technology*, 7, 213–218.
96. Fang, W., Cho, T. Y., Yoon, J. H., Song, K. O., Hur, S. K., Youn, S. J. and Chun, H. G. (2009). Processing optimization, surface properties and wear behavior of HVOF spraying WC–Cr–Ni coating. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(7,) 3561-3567.
97. Børvik, T. Ç., Clausen, A. H., Eriksson, M., Berstad, T., Hopperstad, O. S. and Langseth, M, (2005). Experimental and numerical study on the perforation of AA6005-T6 panels. *International Journal of Impact Engineering*, 32, 1–4.
98. Johnson, W. (1972). *Impact strength of materials*. London: Edward Arnold. 361.
99. Roeder, B. A. and Sun, C. T. (2001). Dynamic penetration of alumina/aluminium laminates: Experiments and modeling. *International Journal of Impact Engineering*, 25, 169–85.
100. Özşahin, E. and Tolun, S. (2009). Influence of layer sequencing on ballistic resistance of polyethylene supported AA 7075 T651 plates. *J Istanbul Tech Univ/d*, 8(2), 72–80.

101. Özşahin, E. and Tolun, S. (2010). On the comparison of the ballistic response of coated aluminum plates. *Materials & Design*, 31(7), 3188–3193.
102. Börvik, T. and Clausen, A. H. (2004). Odd sture hopperstad, magnus langseth, “Perforation of AA5083-H116 aluminium plates with conical-nose steel projectiles” study. *International Journal of Impact Engineering*, 30(4), 367-384.



GAZİ GELECEKTİR...