

Soğuk Gaz Dinamik Sprey Teknolojisiyle Hasarlı Alüminyum Yüzeylerin
Onarımının Araştırılması

Salih Can Dayı

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık 2021

Investigation on Repair of Damaged Aluminum Surfaces with Cold Gas Dynamic Spray
Technology

Salih Can Dayı

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

December 2021

Soğuk Gaz Dinamik Sprey Teknolojisiyle Hasarlı Alüminyum Yüzeylerin Onarımının
Araştırılması

Salih Can Dayı

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon-İmalat Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Koray Kılıçay

[Bu tez ESOGÜ-BAP tarafından 201915055 no'lu proje çerçevesinde desteklenmiştir.]

Aralık 2021

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Koray Kılıçay danışmanlığında hazırlamış olduğum “Soğuk Gaz Dinamik Sprey Teknolojisiyle Hasarlı Alüminyum Yüzeylerin Onarımının Araştırılması” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 22/12/2021

Salih Can Dayı

İmza

ÖZET

Son yıllarda soğuk gaz dinamik püskürtme teknolojisi ile ilgili endüstriyel ve akademik çalışmalarda önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Geleneksel termal sprey teknolojileri ile karşılaştırıldığında çalışma sıcaklıklarının oldukça düşük olması, oksidasyon oluşumunu azaltması, faz dönüşümü olmaması ve daha düşük termal gerilme oluşumu gibi önemli avantajları vardır. Soğuk gaz dinamik sprey teknolojisi kaplama uygulamalarında oldukça fazla kullanılmaktadır. Ayrıca mühendislik malzemelerinin üretimi sırasında veya çalışma şartlarında meydana gelen hasarların, kusurların ve çatlakların onarım uygulamalarında da kullanılmaktadır. Özellikle parça maliyetlerinin çok yüksek olduğu havacılık ve otomotiv gibi sektörlerde onarım uygulamalarının önemi büyüktür.

Bu çalışmada özellikle havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan Al6061 ve Al7075 alaşımlarının hasarlı yüzeylerinin Al-Zn-Al₂O₃, Ni-Zn-Al₂O₃, Ni-Al₂O₃, Zn-Al₂O₃ ve Al-Al₂O₃ tozları kullanılarak soğuk gaz dinamik sprey yöntemi ile onarımı araştırılmıştır. Onarılan numunelerin mikroyapı, tribolojik ve mekanik özellikleri incelenmiş ve hasarsız numuneler ile karşılaştırılmıştır. Mikroyapı incelemeleri için optik mikroskop, Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) analizleri kullanılmıştır. Numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için mikrosertlik ölçümleri ve çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numunelere küre-disk aşınma deneyleri yapılarak tribolojik özellikleri belirlenmiştir. Onarılan bölgelerde yoğunluğu yüksek, boşluk ve çatlak içermeyen yapılar elde edilmiştir. Özellikle Ni-Al₂O₃ tozları kullanılarak onarılan bölgelerde mikrosertlik ve tribolojik özelliklerde önemli artışlar elde edilmiştir. Ni-Al₂O₃ ile tamir edilen bölgenin mikrosertlik değeri Al6061'den yaklaşık 2 kat ve Al7075'ten yaklaşık 1,3 kat daha yüksektir. Ayrıca Ni-Al₂O₃ ile tamir edilen bölgelerde aşınma direnci Al6061'e göre yaklaşık 9 kat ve Al7075'e göre yaklaşık 7,1 kat artmıştır. Çekme testleri sonucunda elde edilen akma dayanımı değerleri hasarsız numunelere göre yaklaşık olarak %9-13 azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Soğuk Sprey, Tamir, Al6061, Al7075, Sürtünme ve Aşınma.

SUMMARY

In recent years, significant progress has been made in industrial and academic studies on cold gas dynamic spray technology. Compared to traditional thermal spray technologies, it has significant advantages such as lower operating temperatures, reduced oxidation formation, no phase transformation and lower thermal stress formation. Cold gas dynamic spray technology is widely used in coating applications. It is also used in repair applications of damages, defects and cracks that occur during the production of engineering materials or in working conditions. Repair applications are of great importance, especially in industries such as aviation and automotive, where part costs are very high.

In this study, the repair of damaged surfaces of Al6061 and Al7075 alloys, which are widely used in the aviation industry, by using Al-Zn-Al₂O₃, Ni-Zn-Al₂O₃, Ni-Al₂O₃, Zn-Al₂O₃ and Al-Al₂O₃ powders by cold gas dynamic spray method was investigated. The microstructure, tribological and mechanical properties of the repaired samples were examined and compared with the undamaged samples. Optical microscope, Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) and Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) analyzes were used for microstructure investigations. Microhardness measurements and tensile tests were carried out to determine the mechanical properties of the samples. Tribological properties were determined by performing pin-on-disc wear tests on the samples. Structures with high density, no voids and cracks were obtained in the repaired areas. Especially in the repaired areas using Ni-Al₂O₃ powders, significant increases in microhardness and tribological properties were obtained. The microhardness value of the area repaired with Ni-Al₂O₃ is approximately 2 times higher than Al6061 and approximately 1.3 times higher than Al7075. In addition, in the areas repaired with Ni-Al₂O₃, the wear resistance increased approximately 9 times compared to Al6061 and approximately 7.1 times compared to Al7075. The yield strength values obtained as a result of the tensile tests decreased by approximately 9-13% compared to the undamaged samples.

Keywords: Cold Spray, Repair, Al6061, Al7075, Friction and Wear.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. SOĞUK GAZ DİNAMİK SPREY TEKNOLOJİSİ.....	3
2.1. Yöntemin Tanımı ve Tarihçesi	3
2.2. Soğuk Gaz Dinamik Sprey Çalışma Sistemi ve Bileşenleri.....	4
2.2.1. Düşük basınçlı ve yüksek basınçlı soğuk gaz dinamik sprej sistemleri	6
2.3. Soğuk Gaz Dinamik Sprey Fiziği	8
2.3.1. De-Laval nozul.....	10
2.4. Birikim Mekanizması.....	13
2.4.1. Parçacık darbe etkisi ve deformasyonunun fizik ve malzeme modelleri	14
2.4.2. Kritik hız ve biriktirme verimi	17
2.5. Soğuk Gaz Dinamik Sprey İşlemini Etkileyen Faktörler.....	19
2.5.1. Taşıyıcı gaz özellikleri	20
2.5.2. Toz yapısı	21
2.5.3. Nozul uygulama mesafesi ve sprej açısı	22
2.5.4. Nozul hareketleri ve yörüngesi	23
2.5.5. Nozul hareket hızı	24
2.5.6. Nozul tarama adımı	26
2.6. SGDS Teknolojisinin Diğer Termal Sprej Yöntemler ile Karşılaştırılması.....	27
2.6.1. Soğuk gaz dinamik sprej yönteminin avantajları	29
2.6.2. Soğuk gaz dinamik sprej yönteminin dezavantajları.....	31

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	32
4. MATERYAL VE YÖNTEM	53
4.1. Al6061 ve Al7075 Sac Levhalar	54
4.2. Onarım İşleminde Kullanılan Tozlar	54
4.3. Talaşlı İşlem	55
4.4. Soğuk Gaz Dinamik Sprey Tamir İşlemi	55
4.5. Yüzey Taşlama İşlemi	57
4.6. Su Jeti ile Numune Kesimi	57
4.7. Yaş Numune Kesme	58
4.8. Metalografik Numune Hazırlama	59
4.9. Mikroyapı İncelemeleri	59
4.10. Mikrosertlik Ölçümleri	61
4.11. Aşınma ve Sürtünme Deneyleri	61
4.12. Çekme Deneyleri	62
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	64
5.1. Kullanılan Tamir Tozları	64
5.2. Mikroyapı İncelemeleri	68
5.3. Mikrosertlik Sonuçları	78
5.4. Aşınma Deneyi Sonuçları	81
5.4.1. Aşınma oranları ve ortalama sürtünme katsayıları	81
5.4.2. Aşınma mekanizmaları	85
5.5. Çekme Testi Sonuçları	95
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	99
KAYNAKLAR DİZİNİ	102

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

2.1. Soğuk gaz dinamik sprej sistemi: (a) ana bileşen şeması, (b) Helmut Schmidt Üniversitesi tarafından tasarlanmış ticari soğuk sprej tabanca/nozul sistemi, (c) Anatolii Papyrin tarafından geliştirilmiş soğuk sprej tabanca/nozul sistemi	5
2.2. (a) Yüksek basınçlı SGDS sistemi, (b) Düşük basınçlı SGDS.....	6
2.3. Mach sayısının bir fonksiyonu olarak statik özellikler.....	8
2.4. (a) Ses altı bir akışta noktasal bir pertürbasyon (bozucu etki) tarafından yayılan basınç dalgası modeli. Sağdan sola akış, (b) Sonik bir akışta noktasal bir pertürbasyon tarafından yayılan basınç dalgası modeli. Sağdan sola akış, (c) Süpersonik bir akışta noktasal bir pertürbasyon tarafından yayılan basınç dalgası modeli. Sağdan sola akış.....	10
2.5. Süpersonik de Laval nozul içerisinde basınç, sıcaklık ve hız dağılımı	10
2.6. (a) de Laval nozulun genel konfigürasyonu, (b) iki hava silindirini birbirine bağlayan bir de Laval nozul, (c) tıkanmış akım.....	11
2.7. Farklı ortam şartlarında oluşan akış rejimleri	13
2.8. Burulma deneyi sırasında tipik bir dökme metalik malzeme için gerilim-gerinim değişiminin şemaları.	17
2.9. Sabit bir darbe sıcaklığı için parçacık hızı, biriktirme verimliliği ve darbe etkileri arasındaki şematik korelasyon	18
2.10. (a) Balon balığı, (b) Püskürtülmüş Cu toz parçacıklarının mikroyapı içerisinde balon balığına benzer yassılaştırmış görüntüsü	21
2.11. (a) Bir türbin kanadının soğuk sprej kaplama için oluşturulan nozul yörüngesi, (b) elde edilen soğuk sprej MCrAlY kaplama	24
2.12. Nozul hareket hızının tek katmanlı birikim kalınlığı ve kesit profili üzerindeki etkisi	24
2.13. Ti6Al4V altlık üzerinde farklı nozul dönüş hızları ile üretilen Ti6Al4V kaplamaların kesit görüntüsü: (a) 100 mm/s, (b) 300 mm/s ve (c) 500 mm/s. Mavi oklar, kaplama-alt tabaka ara yüzeyini gösterir.....	25
2.14. Tarama adımı tanımının şematik gösterimi	27
2.15. Genel termal sprej işleminin şematik gösterimi	28
2.16. En çok kullanılan termal sprej yöntemleri ile soğuk sprejin karşılaştırması	28
2.17. Aynı malzemeden üretilen iki bakır kaplamanın karşılaştırılması: (a) plazma sprej, (b) soğuk sprej	30
3.1. Yorulma test numunesi	33

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.2. 35 kN ve R = 0,1’de test edilen Al 7075 SGDS kaplamalı numunede meydana gelen hasar	34
3.3. Alüminyum plaka üzerinde oluşturulan çukur	35
3.4. Tamir edilen numuneler: (a) LOCTITE 3478, (b) SGDS (Al-Al ₂ O ₃).....	35
3.5. Tamir edilen numunelerin kesit SEM görüntüsü: (a) LOCTITE 3478, (b) SGDS (Al-Al ₂ O ₃)	36
3.6. (a) B ₄ C/6061 Al kompozit plaka üzerindeki hata ve boşluklar, (b) hata ve boşlukların lazer büyütme görüntüsü.....	37
3.7. Soğuk sprej tamir adımları ve sıcak haddeleme	38
3.8. SGDS onarım adımları	39
3.9. Hasarlı bindirme bağlantı deliğinin onarım sonrası şematik gösterimi.....	40
3.10. Hasarlı bağlantı deliklerin soğuk sprej onarım adımları.....	41
3.11. Valf tahrik sistemi delikleri: (a) hasara uğramış delik yüzeyleri, (b) hasar sonrası soğuk sprej ile onarılmış yüzeyler.....	42
3.12. Plakanın mikroyapı görüntüsü: (a) korozyon öncesi, (b) korozyon sonrası.....	42
3.13. Korozyon aşınmasının soğuk sprej ile onarımı	43
3.14. Tamir işlemi sonrası numuneler: (a) TIG tamir yöntemi, (b) SGDS tamir yöntemi ..	44
3.15. Çentik hasarı oluşturulmuş alüminyum levhalar	45
3.16. 2198 alüminyum toz parçacıkları ile farklı işlem parametreleri kullanarak onarılan bölgelerin optik mikroyapı görüntüsü: (a) 450 °C-2,5 MPa, (b) 350 °C-1,5 MPa	46
3.17. SGDS ile onarılmış yorulma test numunesi	47
3.18. (a) SGDS yöntemi ile döküm kusurlarının onarım örneği, (b) çekme testi numunesi	48
3.19. SGDS tamir işlemi: (a) aşınmış temas yüzeyi, (b) 1, 3, 5, 7, numaralı aşınmış yüzeyler, (c) tamir işlemi sonrası elde edilen yüzeyler.....	48
3.20. Diferansiyel tarama eğrileri: (a) N3-00-02 toz karışımı, (b) A-20-01 toz karışımı....	50
3.21. Geri kazanım çalışmalarından sonra gaz kompresörü ünitesi GTK-10I’nin gaz türbini motoru MS 3142’nin yüksek basınçlı türbin rotor kanadı.....	51
3.22. Paslanmaz çelik tamir uygulamaları: (a) TIG yöntemi, (b) SGDS yöntemi	52
4.1. Talaşlı işlem adımları: (a) işlem öncesi hazırlanan ve orta noktaları tespit edilen sac levhalar, (b) frezeleme işlemi, (c) çentik hasarı oluşturulmuş levhalar	55
4.2. Dymet-423 düşük basınçlı soğuk sprej sistemi.	56

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.3. Onarılan sac levhalar: (a) Al6061 levhalar, (b) Al7075 levhalar, (c) yakın çekim görüntüler.	56
4.4. Yüzey düzeltme işlemi: (a) Satış taşlama yöntemiyle levha yüzeyinde biriken fazla soğuk sprey dolgu malzemesinin yüzeyden uzaklaştırılması, (b) taşlama işlemi sonrası ilk ölçüsüne getirilen sac levhalar.	57
4.5. Su jeti ile numune kesme: (a) Su jeti kesim işlemi için numune ölçüleri, (b) 3 boyutlu geometri, (c) su jeti ile kesim işlemi sonrası sac levha.	58
4.6. Struers Discotom 5 marka metalografik numune kesme cihazı.	58
4.7. Struers TegraPol 21 metalografik numune zımparalama ve parlatma cihazı.	59
4.8. Nikon Eclipse L150 Optik Mikroskop ve Clemex Görüntü Analiz Sistemi.	60
4.9. Hitachi Regulus 8230 marka FESEM cihazı.	60
4.10. Future-Tech FM-700 mikrosertlik cihazı.	61
4.11. (a) CSM Tribometer aşınma test cihazı, (b) Mitutoyo SJ-400 yüzey profil ölçüm cihazı.	62
4.12. Çekme deney numuneleri: (a) onarılmış Al6061 numuneler, (b) onarılmış Al7075 numuneler, (c) işlemsiz numuneler.	63
4.13. Alşa-742 model çekme cihazı.	63
5.1. Tamir işleminde kullanılan toz partiküllerin SEM-EDS analizleri: (a) Al-Zn-Al ₂ O ₃ toz partikülleri (1000X), (b) Ni-Zn-Al ₂ O ₃ toz partikülleri (1000X), (c) Ni-Al ₂ O ₃ toz partikülleri (1000X), (d) Ni-Al ₂ O ₃ toz partikülleri (500X).	65
5.2. Tamir tozlarının XRD analizi.	67
5.3. Al6061 alt malzemesinde onarılan bölgelerin dik kesit optik mikroyapı görüntüleri: (a) Al-Zn-Al ₂ O ₃ (50X), (b) Al-Zn-Al ₂ O ₃ (200X), (c) Ni-Zn-Al ₂ O ₃ (50X), (d) Ni-Zn-Al ₂ O ₃ (200X), (e) Ni-Al ₂ O ₃ (50X), (f) Ni-Al ₂ O ₃ (200X), (g) Zn-Al ₂ O ₃ (50X), (h) Zn-Al ₂ O ₃ (200X), (i) Al-Al ₂ O ₃ (50X) ve (j) Al-Al ₂ O ₃ (200X).	68
5.4. Al7075 alt malzemesinde onarılan bölgelerin dik kesit optik mikroyapı görüntüleri: (a) Al-Zn-Al ₂ O ₃ (50X), (b) Al-Zn-Al ₂ O ₃ (200X), (c) Ni-Zn-Al ₂ O ₃ (50X), (d) Ni-Zn-Al ₂ O ₃ (200X), (e) Ni-Al ₂ O ₃ (50X), (f) Ni-Al ₂ O ₃ (200X), (g) Zn-Al ₂ O ₃ (50X), (h) Zn-Al ₂ O ₃ (200X), (i) Al-Al ₂ O ₃ (50X), (j) Al-Al ₂ O ₃ (200X).	69
5.5. Al-Zn-Al ₂ O ₃ tozları ile tamir edilen Al6061 numunelerin SEM-EDS analizleri.	73
5.6. Al-Zn-Al ₂ O ₃ tozları ile tamir edilen Al7075 numunelerin SEM-EDS analizleri.	73
5.7. Ni-Zn-Al ₂ O ₃ tozları ile tamir edilen Al6061 numunelerin SEM-EDS analizleri.	74
5.8. Ni-Zn-Al ₂ O ₃ tozları ile tamir edilen Al7075 numunelerin SEM-EDS analizleri.	74

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

5.9. Ni-Al ₂ O ₃ tozları ile tamir edilen Al6061 numunelerin SEM-EDS analizleri.	75
5.10. Ni-Al ₂ O ₃ tozları ile tamir edilen Al7075 numunelerin SEM-EDS analizleri.	75
5.11. Zn-Al ₂ O ₃ tozları ile tamir edilen Al6061 numunelerin SEM-EDS analizleri.....	76
5.12. Zn-Al ₂ O ₃ tozları ile tamir edilen Al7075 numunelerin SEM-EDS analizleri.....	76
5.13. Al-Al ₂ O ₃ tozları ile tamir edilen Al6061 numunelerin SEM-EDS analizleri.	77
5.14. Al-Al ₂ O ₃ tozları ile tamir edilen Al7075 numunelerin SEM-EDS analizleri.	77
5.15. Al6061 alt malzemesinde tamir edilmiş bölgelerin sertlik dağılımları.	80
5.16. Al7075 alt malzemesinde tamir edilmiş bölgelerin sertlik dağılımları.	80
5.17. Aşınma deneyi sırasında Al6061 alt malzemesinin farklı tozlar ile tamir edilmiş yüzeyleri üzerinde ve Al6061 yüzeyinde ölçülen sürtünme katsayısı değerleri: (a) Al-Zn-Al ₂ O ₃ , (b) Ni-Zn-Al ₂ O ₃ , (c) Ni-Al ₂ O ₃ , (d) Zn-Al ₂ O ₃ ve (e) Al-Al ₂ O ₃ tozları ile onarılan bölge.....	82
5.18. Aşınma deneyi sırasında Al7075 alt malzemesinin farklı tozlar ile tamir edilmiş yüzeyleri üzerinde ve Al7075 yüzeyinde ölçülen sürtünme katsayısı değerleri: (a) Al-Zn-Al ₂ O ₃ , (b) Ni-Zn-Al ₂ O ₃ , (c) Ni-Al ₂ O ₃ , (d) Zn-Al ₂ O ₃ ve (e) Al-Al ₂ O ₃ tozları ile onarılan bölge.	83
5.19. Al6061 alt malzemenin ve farklı tozlar ile onarılan bölgelerin aşınma oranları ve ortalama sürtünme katsayıları.	84
5.20. Al6061 alt malzemenin ve farklı tozlar ile onarılan bölgelerin aşınma oranları ve ortalama sürtünme katsayıları.	84
5.21. Al6061 ve Al7075 alt malzemelerinin aşınma deneyi sonrası aşınma kanallarının ve aşındırıcı kürelerin FESEM-EDS analizi.	89
5.22. Al6061 ve Al7075 alt malzemelerinin Al-Zn-Al ₂ O ₃ tozları ile onarılmış yüzeyleri üzerinde gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonrası aşınma kanallarının ve aşındırıcı kürelerin FESEM-EDS analizi.	90
5.23. Al6061 ve Al7075 alt malzemelerinin Ni-Zn-Al ₂ O ₃ tozları ile onarılmış yüzeyleri üzerinde gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonrası aşınma kanallarının ve aşındırıcı kürelerin FESEM-EDS analizi.	91
5.24. Al6061 ve Al7075 alt malzemelerinin Ni-Al ₂ O ₃ tozları ile onarılmış yüzeyleri üzerinde gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonrası aşınma kanallarının ve aşındırıcı kürelerin FESEM-EDS analizi.	92
5.25. Al6061 ve Al7075 alt malzemelerinin Zn-Al ₂ O ₃ tozları ile onarılmış yüzeyleri üzerinde gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonrası aşınma kanallarının ve aşındırıcı kürelerin FESEM-EDS analizi.	93

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**Sekil****Sayfa**

- 5.26. Al6061 ve Al7075 alt malzemelerinin Al-Al₂O₃ tozları ile onarılmış yüzeyleri üzerinde gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonrası aşınma kanallarının ve aşındırıcı kürelerin FESEM-EDS analizi 94
- 5.27. Farklı tozlar ile onarılan Al6061 çekme numunelerinin gerilme-birim şekil değiştirme diyagramları. 97
- 5.28. Farklı tozlar ile onarılan Al7075 çekme numunelerinin gerilme-birim şekil değiştirme diyagramları. 98



ÇİZELGELER DİZİNİ

Cizelge

Sayfa

2.1. Yüksek basınçlı ve düşük basınçlı SGDS sistemlerinde parametreler	7
2.2. 20 µm parçacık boyutu bağlanma şartı için kritik hız değerleri	19
3.1. Kullanılan alaşımların kimyasal bileşimi (%)	44
4.1. Al6061 ve Al7075 alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimi.	54
5.1. Kullanılan onarım tozlarının hacim oranları.	64
5.2. Tamir edilen Al6061 yüzeylerinden ölçülen sertlik değerleri.	78
5.3. Tamir edilen Al7075 yüzeylerinden ölçülen sertlik değerleri.	78
5.4. Onarılan Al6061 numunelerinin çekme deneyi sonuçları.	95
5.5. Onarılan Al7075 numunelerinin çekme deneyi sonuçları.	96

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
ε	Şekil değişimi
$\dot{\varepsilon}^*$	Eşdeğer plastik şekil değiştirme hızı
$\dot{\varepsilon}$	Şekil değiştirme hızı
C_p	Sabit basınçtaki özgül ısı
dh	Entalpi değişimi
d_p	Parçacık çapı
dT	Sıcaklık değişimi
h	Gazın yerel entalpisi
K	Kelvin
M	Mach sayısı
$^{\circ}C$	Celcius
R_a	Yüzey pürüzlülüğü
T	Sıcaklık
T_m	Ergime sıcaklığı
T_p	Darbe sıcaklığı
T_{ref}	Oda sıcaklığı
WC	Walfram karbür
x	Karakteristik sistem boyutu
α	Termal yayılım
β	Adyabatiklik derecesi
γ_{cr}	Kritik gerilme
θ	Normalleştirilmiş sıcaklık değeri
v	Gazın yerel hızı
v_{kritik}	Kritik partikül hızı
v_p	Partikül hızı
σ	Akış gerilmeleri
σ_{ak}	Akma gerilmesi
σ_{ζ}	Çekme gerilmesi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
µm	Mikrometre
EBSD	Elektron geri saçılım kırınımı
FESEM	Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
gf	Gram kuvvet
HV	Vickers Sertliği
HVOF	Yüksek hızlı oksit-yakıt
kW	Kilowatt
MPa	Megapascal
ns	Nanosaniye
RT	Oda sıcaklığı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SGDS	Soğuk Gaz Dinamik Sprey
TIG	Tungsten İnert Gaz
XRD	X-Işını Kırınım

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Mühendislik malzemelerinin aşınmaya, korozyona, oksitlenmeye veya yüksek sıcaklığa karşı dayanımlarını artırmak, elektriksel ve fiziksel özelliklerini geliştirmek için çeşitli termal sprey uygulamaları endüstriyel alanlarda sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde, tel veya toz olarak kullanılan kaplama malzemeleri elektrik arkı, plazma veya yanmış bir gazın sağladığı ısı girdisi ile ergir ve bir gaz akımı yardımıyla altlık malzemenin üzerinde biriktirilerek katılaşması sağlanır. Yüzey özelliklerinin geliştirilmesinin yanı sıra çeşitli onarım ve geri dönüşüm uygulamalarında da kullanılan geleneksel termal sprey yöntemlerinin en büyük dezavantajı, yüksek ısı girdisi nedeniyle altlık malzemenin metalürjik ve mekanik özelliklerinde değişiklikler meydana getirmesidir. Ayrıca malzeme özelliklerinin geri kazandırılması için ilave ısı işlem uygulamaları gerekir. Uygulanması gereken ek işlemler üretim süresini uzatırken, işçilik ve üretim maliyetlerini de artırmaktadır.

Soğuk Gaz Dinamik Sprey (SGDS) teknolojisi son yıllarda kullanımı oldukça artan alternatif bir termal sprey işlemi olarak değerlendirilmektedir. Literatürde soğuk spreyleme ve süpersonik parçacık biriktirme gibi isimlerle de yer almaktadır. Çalışma sıcaklıkları diğer termal yöntemlerde olduğu gibi yüksek olmadığı için soğuk tanımlaması yapılmıştır. Genellikle mikron mertebesinde kullanılan kaplama tozları işlem boyunca katı halde kalır ve ergimez. Özel tasarlanmış nozul ve partikül taşıyıcı gaz akımı sayesinde ses üstü hızlara ulaşan parçacıklar altlık malzeme üzerine yönlendirilerek altlık malzeme üzerinde biriktirilirler. Düşük sıcaklıklar sayesinde altlık malzeme yapısında kayda değer bir metalürjik ve mekanik özellik değişimi gözlenmez (Gärtner vd., 2006).

SGDS teknolojisi kaplama uygulamalarının yanı sıra havacılık, savunma ve otomotiv sanayi gibi pek çok endüstriyel alanda onarım ve geri kazanım uygulamalarında büyük bir potansiyel haline gelmiştir. Aşınma ve korozyon gibi malzeme kayıpları meydana gelerek işlevini yitiren çeşitli parçaların tekrar ürün yaşam döngüsüne kazandırılması amacıyla SGDS teknolojisinin kullanımı ve bu yönde yapılan araştırmalar son yıllarda oldukça artmıştır. Kaynak yöntemleri ve diğer termal sprey uygulamaları kullanılarak gerçekleştirilen çeşitli onarım işlemlerinde yüksek sıcaklıktan kaynaklı oluşan artık gerilme,

mikroyapı ve mekanik özelliklerdeki değişiklikler ile oksidasyon gibi zararlı etkiler SGDS uygulamalarında hiç meydana gelmez veya minimum seviyede ortaya çıkar (Raelison vd., 2017).

Bu çalışmada yüzeylerinde kanal açılarak hasar oluşturulan Al6061 ve Al7075 alüminyum alaşımı altlık malzemeler soğuk gaz dinamik sprej teknolojisi ile onarılmıştır. İşlem sonrası onarılan bölgelerin mikroyapı, tribolojik ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Altlık malzemeler üzerinde frezeleme yöntemiyle 1 mm derinliğe sahip kanallar oluşturularak yapay hasarlar oluşturulmuştur. Hasarlı bölge Al-Zn-Al₂O₃, Ni-Zn-Al₂O₃, Ni-Al₂O₃, Zn-Al₂O₃ ve Al-Al₂O₃ içeriğine sahip mikron boyutundaki 5 farklı toz kullanılarak SGDS yöntemiyle onarılmıştır. Onarım sonrası yüzeyler üzerine taşıma işlemi uygulanarak altlık malzemeler hasar öncesi boyut ve yüzey özelliklerine getirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri, FESEM-EDS analizleri, aşınma deneyleri, mikro sertlik ölçümleri ve mekanik deneyler için numuneler su jeti ile kesim yapılarak elde edilmiştir.

Altı bölümden oluşan bu çalışmada birinci bölüm tez hakkında genel bilgileri ve tezin amacını belirtmektedir. İkinci bölümde soğuk gaz dinamik sprej teknoloji ile ilgili bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde soğuk gaz dinamik teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen onarım uygulamaları ile ilgili literatür araştırması sunulmuştur. Dördüncü bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan materyaller ve yöntemler anlatılmıştır. Beşinci bölümde bulgular ve tartışmalara yer verilirken, altıncı bölümde sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

2. SOĞUK GAZ DİNAMİK SPREY TEKNOLOJİSİ

Soğuk gaz dinamik sprej teknolojisi son yıllarda kullanımı oldukça artan bir termal sprej kaplama teknolojisidir. Geleneksel kaplama uygulamalarına nazaran düşük işlem sıcaklıklarında çalışmaktadır ve bu nedenle önemli bir avantaja sahiptir. Yüksek hızlı parçacıkların katı halde püskürtülmesi neticesinde toz parçacıklar altlık üzerinde biriktirilerek kaplama oluşumu sağlanır. Yöntemin ortaya çıkmasından sonra soğuk spreyleme sistemlerinde meydana gelen teknik gelişmeler oldukça artmıştır. Farklı nozul tiplerinin, taşıyıcı gazların ve kaplama tozlarının kullanılması ile farklı malzeme grupları için uygulanmaya başlamış ve elde edilen özelliklerde muazzam gelişmeler meydana gelmiştir.

Bu bölümde soğuk gaz dinamik sprej teknolojisinin ortaya çıkışı, bileşenleri, mekanizması, işleme etki eden parametreler, diğer termal sprej yöntemleri ile karşılaştırılması, avantaj ve dezavantajları gibi konular üzerine bilgiler verilmiştir.

2.1. Yöntemin Tanımı ve Tarihçesi

Soğuk gaz dinamik sprej teknolojisi esasen bir termal sprej işlemidir. Bu teknolojiyi diğer termal sprej yöntemlerinden ayıran ve benzersiz kılan özelliği ise tamamen bir katı hal biriktirme teknolojisi olmasıdır. Soğuk sprej teknolojisi ve süpersonik parçacık biriktirme isimleri ile de anılan soğuk gaz dinamik sprej teknolojisi 1980'li yıllarda Rusya Bilimler Akademisi'nde geliştirilmiş ve 1990 yılında Alkhimov ve Papyrin tarafından patenti alınmıştır. 2007 yılında yüksek basınçlı soğuk sprej sistemlerinin geliştirilmesine kadar çalışmalar yavaş ilerlemiştir. 2013 yılından itibaren ilave donanımların ortaya konması ve soğuk sprej teknolojisinin temellerinin daha iyi anlaşılması neticesinde esas gelişmeler meydana gelmeye başlamıştır (Widener vd., 2018).

Geleneksel termal sprej yöntemleri ile elde edilemeyecek özelliklere bu yöntem ile ulaşıldığı için soğuk gaz dinamik sprej teknolojisi üzerine yapılan çalışmalar ve araştırmalar her geçen gün artmaktadır. Çalışma sıcaklıkları düşük seviyede olması sebebiyle kullanılan

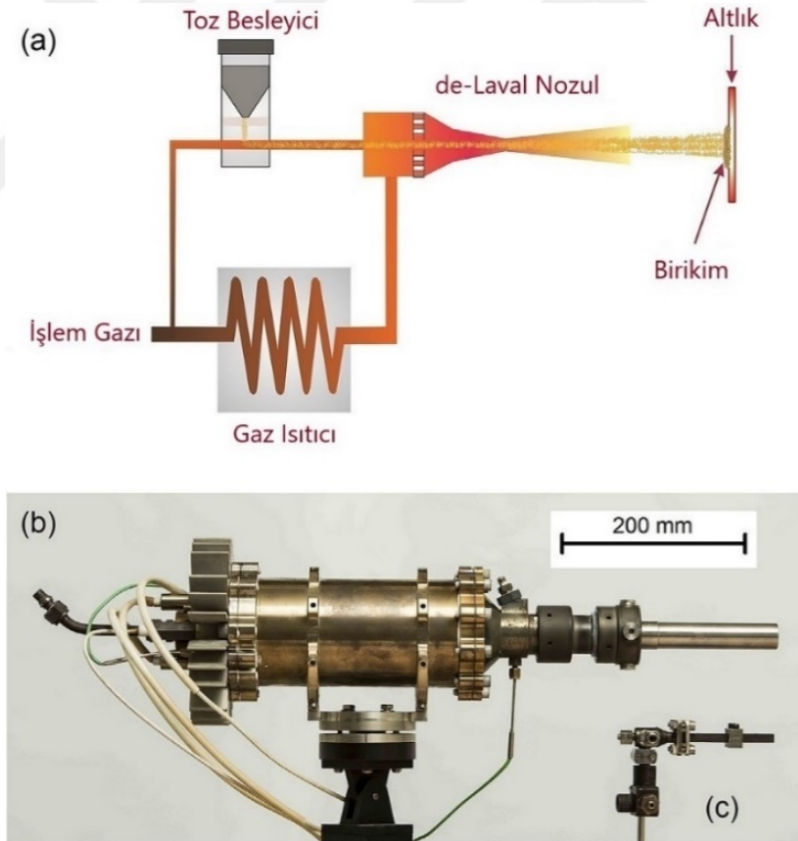
biriktirme tozları ergimeden kalır ve altlık malzeme yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmaz. Böylelikle istenmeyen oksidasyon, çatlak, artık gerilme ve inklüzyonlar meydana gelmez (Gärtner vd., 2006).

Kaplama uygulamalarının yanı sıra çeşitli metal yapılarda meydana gelen kusurların ve hasarların onarılmasında da kullanılmaktadır. SGDS yönteminin benzersiz özellikleri başarılı onarım uygulamaları için büyük bir potansiyeldir (Champagne ve Helfritch, 2015). Soğuk sprej yöntemi ile hasar görmüş veya kullanım dışı kalmış parçaların boyutsal onarımında kullanılabilecek kalın katmanlar üretilebilmektedir. Yüksek hızlı katı hal parçacık etkisi ile soğuk parçacık biriktirme işlemi, eşsiz onarım olanakları sağlayan güçlü, oksidasyon direnci yüksek, su ve hava geçirmeyen gözenek seviyesi düşük benzersiz bir yapı sağlar (Champagne ve Helfritch, 2016). Ayrıca bir eklemeli imalat yöntemi olarak kullanılan SGDS teknolojisi serbest şekilli parçaların imalatında kendine yer edinmiştir. Diğer ergitme esaslı eklemeli imalat yöntemleri ile karşılaştırıldığında biriktirme tozlarının düşük sıcaklık sayesinde kendi özelliklerini koruduğu gözlenir (Yin vd., 2018). SGDS yöntemi kaplama, tamir ve eklemeli imalat gibi pek çok uygulamayı bir araya getiren bir teknolojidir. Kaplamalar, korozyon koruyucu filmlerden katalitik yüzeylere kadar çeşitlilik gösterir. Onarım uygulamaları havacılıkta kullanılan parçaları ve döküm parçaların onarımına kadar geniş bir kullanım alanı sunar. Isı değiştiriciler, borular ve dişliler, soğuk sprej uygulanmış bazı yapısal uygulamalara örnek olarak verilebilir (Champagne ve Helfritch, 2016).

2.2. Soğuk Gaz Dinamik Sprej Çalışma Sistemi ve Bileşenleri

Bir katı hal biriktirme yöntemi olan SGDS yönteminde mikron boyutunda toz parçacıklar kullanılır. Bir gaz akımı sayesinde yüksek hızlara ulaşan tozlar nozul yardımıyla alt tabakaya püskürtülür. Alt tabaka ile etkileşime giren toz parçacıklar kinetik enerjilerini kaybederek yüksek plastik deformasyona uğrar ve alt malzeme üzerinde katman yapısı şeklinde birikir. Toz parçacıkların hızlandırılması basıncı ve sıcaklığı artırılmış bir taşıyıcı gazın özel tasarlanmış nozul içerisinde genişlemesi neticesinde sağlanır. Parçacıklar işlem sırasında ergimeden katı halde kalır ve özelliklerini korur. Bu yöntemle soğuk püskürtme denmesinin temel nedeni de budur. Şekil 2.1’de SGDS yönteminin şematik çalışma prensibi ve bir nozul sistemi gösterilmiştir (Assadi vd., 2016).

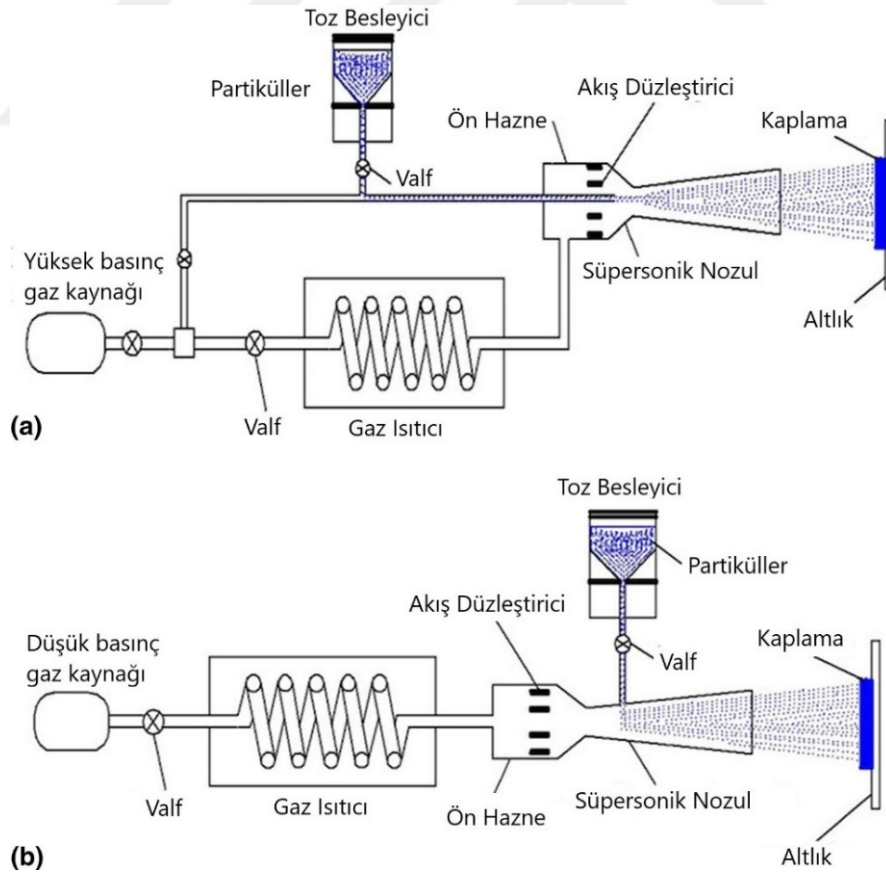
Toz parçacıklar de-Laval tipi nozula bir toz besleyici ile enjekte edilir ve taşıyıcı gaz tarafından nozul içerisinde yüksek hızlara ivmelendirilir. Kullanılan toz boyutları ise 1-50 μm arasında değişim göstermektedir. Yüksek hıza ulaşp kinetik enerji kazanan toz parçacıklar tabakaya çarptığında kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek plastik deformasyona uğrar ve yüzey üzerinde birikir. Basınçlı gaz nozula girmeden önce ısıtılır. Taşıyıcı gaz nozulun boğaz bölgesinde sonik hıza ulaşır ve nozulun ayrılma bölgesine doğru 2 ile 4 arasında değişen Mach sayısı değerine ulaşarak süpersonik hale gelir. Azot, helyum, hava ve bunların karışımları taşıyıcı gaz olarak soğuk spray sisteminde kullanılabilir. Oksitlenmeyi düşürdüğü ve helyuma göre daha ucuz olduğu için azot en çok kullanılan gaz türüdür. İşlemden kullanılan gazın sıcaklığı 700 $^{\circ}\text{C}$ ve basıncı 3,5 MPa değerlerine kadar çıkabilmektedir. Parçacık hızları 300 ile 1200 m/s arasında değişmektedir (Altuncu ve Üstel, 2010; Davis, 2004; Zhao vd., 2006).



Şekil 2.1. Soğuk gaz dinamik spray sistemi: (a) ana bileşen şeması, (b) Helmut Schmidt Üniversitesi tarafından tasarlanmış ticari soğuk spray tabanca/nozul sistemi, (c) Anatolii Papyrin tarafından geliştirilmiş soğuk spray tabanca/nozul sistemi (Assadi vd., 2016).

2.2.1. Düşük basınçlı ve yüksek basınçlı soğuk gaz dinamik sprej sistemleri

Soğuk gaz dinamik sprej prosesleri yüksek basınçlı soğuk sprej ve düşük basınçlı soğuk sprej olarak iki kategoriye ayrılır. Her birinin avantajları ve sınırlamaları vardır ve birbirini tamamlayıcı olarak değerlendirilmelidir. İki sistemde kullanılan gaz basınç farkları sistem ekipmanlarındaki farklı tasarım ihtiyaçlarını gerektirir. Yüksek basınçlı soğuk sprej işleminde, katı toz besleme partikülleri, ön hazne bölgesinde taşıyıcı gaz ile karışır. Daha sonra, Şekil 2.2’de gösterildiği gibi, nozulun yakınsak bölümünden gaz akışına beslenir. Bununla birlikte, düşük basınçlı soğuk sprej işleminde, toz partikülleri, nozulun iraksayan kısmına dik olarak nozulun boğaz bölümünden gaz akışına verilir ve alt tabakaya doğru hızlandırılır. Düşük basınç sisteminde taşıyıcı gaz yalnızca püskürtme tabancasında ısıtılırken, yüksek basınçlı soğuk sprej işleminde gaz, püskürtme tabancasının yanı sıra ayrı bir ısıtma ünitesinde önceden ısıtılır (Rokni vd., 2017).



Şekil 2.2. (a) Yüksek basınçlı SGDS sistemi, (b) Düşük basınçlı SGDS (Rokni vd., 2017).

Artan gaz akışları ile birim zamanda beslenebilecek toz parçacık miktarı artar ve bu nedenle yüksek basınçlı sistemde daha fazla olabilir (Maev ve Leshchynsky, 2006). Bu iki soğuk sprej prosesinde kullanılan tipik püskürtme parametreleri Çizelge 2.1’de özetlenmiştir. Ana farklılıklar proses gazı, basınç seviyesi, sıcaklık ve kullanılan elektrik gücü ile ilgilidir. Yüksek basınçlı soğuk sprej işlemi için, ana gaz ve toz besleme hattının karışmasını sağlamak amacıyla ana gaz akımına yakın veya daha yüksek bir basınçta çalıştırılan yüksek basınçlı bir toz besleyici kullanılmalıdır. Yüksek basınçlı toz besleyiciler, düşük basınçlı kullanım için gerekli besleyicilerden genellikle daha büyük ve daha maliyetlidir (Rokni vd., 2017).

Çizelge 2.1. Yüksek basınçlı ve düşük basınçlı SGDS sistemlerinde parametreler (Rokni vd., 2017).

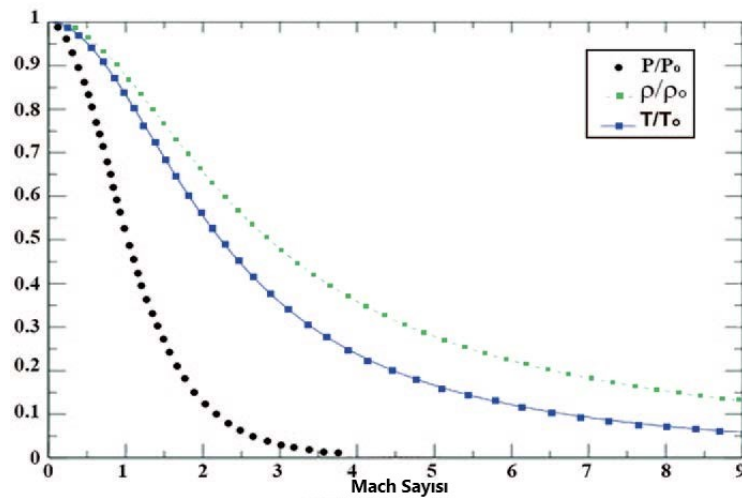
Spreyleme Parametresi	Yüksek Basınç	Düşük Basınç
İşlem gazı	N ₂ , He, karışım	Sıkıştırılmış hava
Basınç, bar	7-40	6-10
Ön ısıtma sıcaklığı, °C	Oda sıcaklığı-1000	Oda sıcaklığı-650
Gaz akış debisi, m ³ /dk	0,85-2,5 (N ₂), maks. 4,2 (He)	0,3-0,4
Toz besleme oranı, kg/h	4,5-13,5	0,3-3
Püskürtme mesafesi, mm	10-50	5-15
Elektrik gücü, kW	17-47	3,3
Toz parçacık boyutu, µm	5-50	5-30

Tüm soğuk püskürtme prosesleriyle ilgili önemli bir problem, partikül hızı ve sıcaklığı arttıkça daha şiddetli hale gelen nozul tıkanmasıdır. Sorunu önlemek için, ilk gönderilen toz parçacık popülasyonuna daha büyük veya daha sert parçacıkların eklendiği ve ayrıca tıkanmaya dirençli çeşitli nozul malzemelerinin kullanıldığı harmanlanmış bir toz kullanılabilir (Champagne, 2007; Karthikeyan, 2007; Smith, 2007). Her iki işlem için de bir diğer ortak sorun, nozul boğaz bölgesinde oluşabilecek erozyon aşınmasıdır. Bu aşınma, nozulun çalışmasını etkileyerek çalışma koşullarında ve kaplama kalitesinde değişikliklere neden olabilir. Düşük basınçlı soğuk sprej sistemlerinde basınçlar daha düşük olduğu için

genellikle daha az maliyetli ekipman gerektirir. Bununla birlikte nozul tasarımı, daha düşük bir genişleme Mach sayısı aralığı (genellikle >3) ile sınırlıdır ve atmosfer basıncının nozula toz beslemek için yeterli olmasını sağlamak için giriş basıncı da sınırlandırılır (normalde 1,7 MPa). Sonuç olarak düşük basınç sistemlerinde daha düşük parçacık hızları elde edilir (Rokni vd., 2017).

2.3. Soğuk Gaz Dinamik Sprey Fiziği

Soğuk gaz dinamik sprej işleminde taşıyıcı gazlar süpersonik rejimde akış özellikleri gösterir. Bu tür akışlarla ilgilenen alan, klasik akışkanlar mekaniği ile klasik termodinamiğin bir birleşimidir ve gaz dinamiği olarak bilinir. Klasik akışkanlar mekaniği ile gaz dinamiği arasındaki en büyük fark, yerel ses hızına yakın veya daha yüksek hızlarda bir gaz akışının hesaba katılması gereken gaz yoğunluğu değişimlerini tetikleyecek kadar büyük basınç gradyanlarını oluşturmaya başlayacağı gerçeğine dayanır. Gaz dinamiğinde, bu değişikliklerin önemli olmaya başladığı minimum gaz hızı sınırı genellikle yerel Mach sayısı 0,3 olarak belirlenmiştir. Yerel Mach sayısı, yerel gaz hızının yerel ses hızına oranı olarak tanımlanır ve genellikle $M > 5$ olduğu durumda akış rejimleri sıkıştırılmaz akış olarak sınıflandırılır. Gaz yoğunluğu, akış transonik rejimin ötesine geçtiğinde veya genişlediğinde büyük ölçüde değişebilen tek akış değişkeni değildir. Gazın yerel statik sıcaklığı ve basıncı da Şekil 2.3'te gösterildiği gibi önemli ölçüde değişir (Villafuerte, 2015).



Şekil 2.3. Mach sayısının bir fonksiyonu olarak statik özellikler (Villafuerte, 2015).

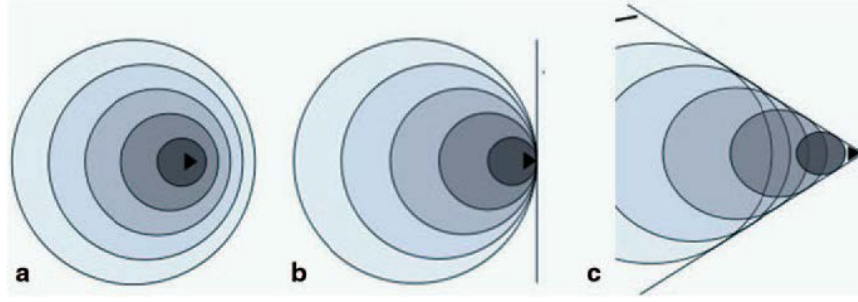
Şekil 2.3'ten, sıkıştırılamaz rejimde düşük akışlı Mach sayılarında, basınç ve sıcaklıkta (ve dolayısıyla entalpide) gözle görülür bir değişiklik olmadığı gözlemlenebilir. Ses altı rejimde hem basınç hem de sıcaklık bazı değişiklikler yaşamaya başlarken, ses üstü rejimde bu değişiklikler daha önemli hale gelir. Bu davranış, bir gazın adyabatik (ısı transferi yok) ve tersinir bir şekilde (sürtünme yok) hızlandırıldığı sonsuz küçük bir kontrol hacmine uygulanan termodinamiğin birinci yasası (enerji korunumu) göz önüne alındığında daha iyi anlaşılabilir. Bu işlemin sabit bir durumda (kontrol hacmindeki herhangi bir akışkan özelliğinde zamanla değişiklik olmadığı) meydana geldiğini varsayarsak, birinci yasa aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2} = h_2 + \frac{v_2^2}{2} \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'de h gazın yerel entalpisi ve v gazın yerel hızıdır. Enerjinin korunumunu ifade eden bu denklem, yukarıda belirtilen varsayımlara göre hızlanan bir akışta, akışın yerel enerjisinin korunduğunu, entalpi ve kinetik enerji olmak üzere iki şekilde ifade edilebileceğini belirtir. Kinetik enerjideki (ve dolayısıyla akış hızındaki) bir artışa, entalpide bir azalma eşlik etmelidir. SGDS yönteminde kullanılan gazlar kalorik mükemmel gazlar olduğu için entalpideki azalma sıcaklıktaki azalma olarak düşünülebilir ve Denklem 2.2 ile ifade edilir:

$$dh = C_p dT \quad (2.2)$$

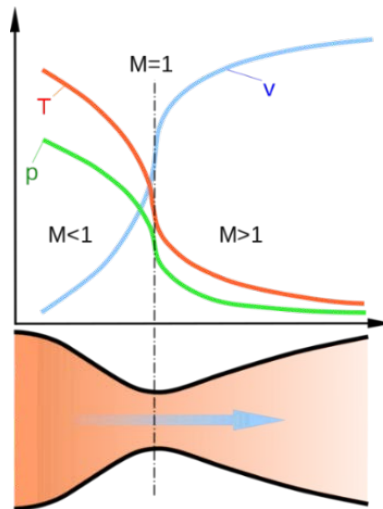
Bu denklemde, C_p sabit basınçta gazın özgül ısısıdır. dh ve dT ise sırasıyla entalpi ve sıcaklıktaki değişimlerdir. Düşük Mach sayılarında, gaz hızındaki artış ve dolayısıyla kinetik enerjideki artış, gaz entalpisini önemli ölçüde etkilemek için yeterli değildir. Ancak hız arttıkça (kinetik enerji gaz hızının karesinin bir fonksiyonu olduğundan), gaz entalpisi (sıcaklık ve dolayısıyla soğuk spray işleminde kullanılan gazların mükemmel gaz yasasına uyduğunu varsayarsak basınç) üzerindeki etki, Şekil 2.4'te yansıtıldığı gibi, giderek daha önemli hale gelir (Villafuerte, 2015).



Şekil 2.4. (a) Ses altı bir akışta noktasal bir pertürbasyon (bozucu etki) tarafından yayılan basınç dalgası modeli. Sağdan sola akış, (b) Sonik bir akışta noktasal bir pertürbasyon tarafından yayılan basınç dalgası modeli. Sağdan sola akış, (c) Süpersonik bir akışta noktasal bir pertürbasyon tarafından yayılan basınç dalgası modeli. Sağdan sola akış (Villafuerte, 2015).

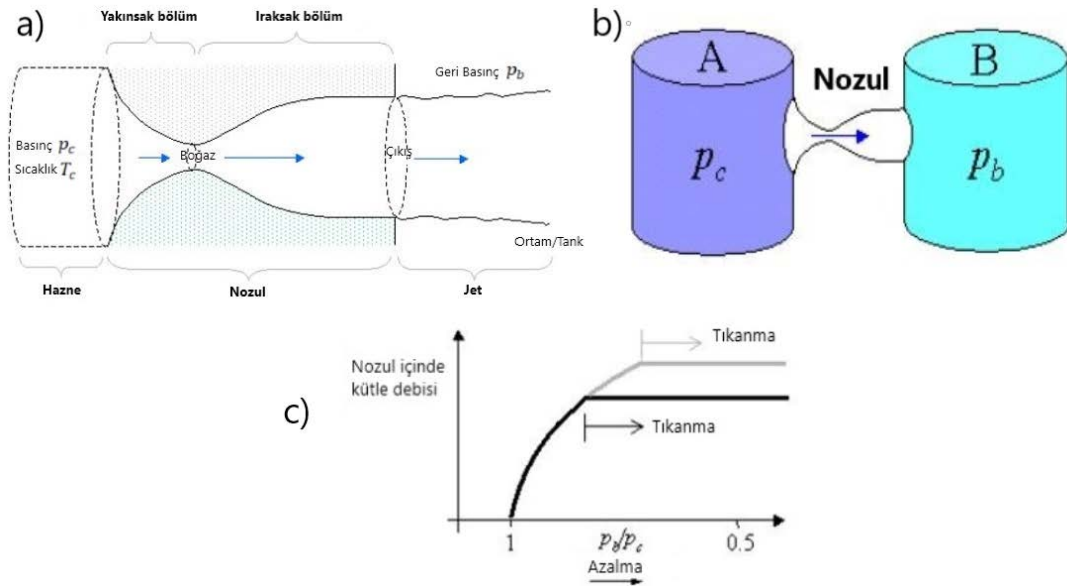
2.3.1. De-Laval nozul

Nozul, kapalı bir hazne, tüp veya boru şeklinde tasarlanan, bir akışın yönünü kontrol etmek, hız ve basınç gibi belirli özelliklerini değiştirmek amacıyla kullanılan bir cihazdır. Bir nozul genellikle farklı kesit alanlarına sahiptir. Nozullar genellikle akış debisini, hızını, yönünü, kütleini, şeklini ve basıncını ayarlamak amacıyla kullanılmaktadır. De-Laval Nozul (yakınsak ve ıraksak nozul) Şekil 2.5 ile gösterildiği gibi orta bölümünde kesiti daralan, asimetrik kum saatine benzer bir geometriye sahiptir. Bu nozul tipi akışın ısı enerjisini kinetik enerjiye dönüştürerek, sıcak ve basınçlı bir gazı eksenel itme yönünde yüksek süpersonik bir hıza ulaştırmak için kullanılır.



Şekil 2.5. Süpersonik de Laval nozul içerisinde basınç, sıcaklık ve hız dağılımı (Huang ve Yonkers, 2019).

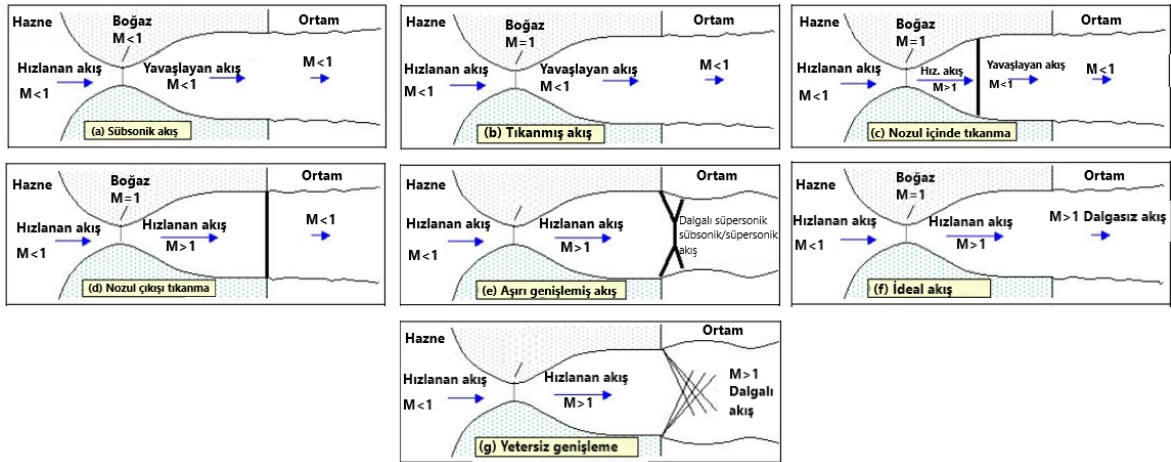
De-Laval nozulun genel yapısı Şekil 2.6 a’da verilmiştir. Gaz, nozuldan yüksek basınçlı bir bölgeden (genellikle hazne olarak adlandırılır) daha düşük basınçlı bir ortama akar. Yüksek basınçlı bölümün hacmi buradaki akışkanın hızının ihmal edilebilmesi amacıyla yeteri kadar büyük olmalıdır. Buradaki basınç p_c sembolü ile gösterilir. Gaz yüksek basınçlı bölümden sırasıyla nozulun yakınsama (converging) kısmına, boğaz bölgesini geçerek sapıtırma (diverging) kısmı boyunca akar ve daha sonra bir jet olarak ortam içine boşalır. Ortam basıncı “karşı (geri) basınç” olarak adlandırılır ve p_b sembolü ile verilir. Şekil 2.6 b’de iki hava silindirini birbirine bağlayan bir Laval nozul kullanılmıştır. A tankı yüksek basınçlı haznenin yerini alırken B tankı ise düşük basınçlı ortamın yerini almıştır. B silindirindeki basıncı kontrol ettiğimizi ve nozul boyunca kütle debisi ölçüldüğünde B’deki basıncı ne kadar düşük yaparsak nozuldaki kütle akışının o kadar çok olması beklenir. Bu ancak bir noktaya kadar doğrudur. Geri basınç yeteri kadar düşürülürse akış debisinin artmasının aniden durduğu noktaya ulaşılır. Bu noktadan sonra geri basınç düşürülmeye devam edilse de daha fazla kütle akışı elde edilemez. Bu noktaya “tıkanmış akım-boğulmuş akış (choked)” denmektedir. Nozulun boğaz kısmı büyütülerek bu davranış geciktirilebilir ancak sonunda yine tıkanmış akım meydana gelir (Şekil 2.6 c). Nozulda boğaz bölgesi ortadan kaldırılsa ve sadece yakınsak bir nozul kullanılsa bile akış tıkanmış akım noktasına yine de ulaşır (Devenport, 2021).



Şekil 2.6. (a) de Laval nozulun genel konfigürasyonu, (b) iki hava silindirini birbirine bağlayan bir de Laval nozul, (c) tıkanmış akım (Devenport, 2021).

Bu durumun sebebi akışın Mach 1 (akış hızı ses hızına ulaştığı durum) seviyesindeki davranış şekli ile ilgilidir. Nozul gibi daimi akış sistemlerinde Mach sayısı sadece minimum kesit alanı bölgesinde oluşabilir. Nozul tıkanmadığında, içinden geçen akış tamamen ses altıdır ve geri basıncı biraz düşürülse, akış daha hızlı gider ve debi artar. Geri basıncı daha da düşürdükçe, boğazdaki akış hızı nihayetinde ses hızına ulaşır (Mach 1). Geri basıncın daha fazla düşürülmesi, nozul boyunca akışı daha fazla hızlandıramaz çünkü bu $M = 1$ olan noktanın alanın minimum olduğu boğaz noktasından uzağa hareket etmesini ve böylece akışın sıkışmasını gerektirir. Boğaz kısmından sonra ıraksak bölümün ve çıkış bölümünün akış profili geri basınç düşürülerek değiştirilebilirken, kütle debisi boğaz bölümünde sabitlendiği için değiştirilemez. Tıkanmış akım noktasından sonraki akış profili özellikleri kütle debisini değiştirmediğinden çok önemli değildir. Ancak bununla birlikte akış profillerinin özellikleri yüksek hızlı akışların elde edilebilmesi için çok önemlidir. Şekil 2.7-a, tamamen akışın ses altı seviyesinde olduğunda (yani, nozul tıkanmadığında) nozuldan geçen akışı göstermektedir. Akış, yakınsama bölümü aracılığıyla yüksek basınçlı ortamdan dışarı doğru hızlanır ve boğazdaki maksimum (subsonik-ses altı, $M < 1$) hızına ulaşır. Daha sonra akış, ıraksak bölüm boyunca yavaşlar ve bir subsonik jet olarak ortam içine sızar. Bu durumda geri basınç düşürmek, nozulun her yerinde akış hızını artırır. Geri basınç yeteri kadar düşürülürse Şekil 2.7-b’de gösterilen durum elde edilir. Akış modeli, boğazdaki akış hızının Mach 1’e ulaşması dışında, subsonik akışla tamamen aynıdır. Geri basınçtaki daha fazla azalma, $M=1$ noktasını boğazdan uzaklaştıramaz. Bununla birlikte, geri basınç daha da düşürüldüğünde, ıraksama bölümündeki akış düzeni değişir. Geri basınç tıkanmış akım ($M=1$) elde etmek için gerekli olan basıncın altına düşürüldüğünde boğaz noktasının hemen alt tarafında süpersonik (ses üstü) akış bölgesi oluşur. Ses altı akışından farklı olarak, alan büyüdükçe süpersonik akış hızlanır. Süpersonik ivmenin bu bölgesi normal bir şok dalgası ile sonlandırılır. Şok dalgası ses altı hızına neredeyse anında bir yavaşlama üretir. Bu subsonik akış daha sonra ayrışan bölümün geri kalanında yavaşlar ve bir subsonik jet olarak tükenir. Bu rejimde, geri basınç düşürülür veya yükseltilirse, şok dalgasından önce ıraksama bölümündeki süpersonik akış uzunluğu artar veya azaltır (Şekil 2.7-c). Eğer geri basınç yeterince düşürülürse süpersonik bölgeyi nozulun ıraksak bölümü boyunca şok dalgası nozulun çıkış noktasına denk gelecek şekilde uzatılabilir (Şekil 2.7-d). Bu durumda çok uzun bir hızlanma bölgesi (tüm nozul uzunluğu) olduğundan, şoktan hemen önceki akış hızı bu durumda çok büyük olacaktır. Bununla birlikte, şoktan sonra jet içindeki akış hala subsonik

olacaktır. Geri basıncı daha da düşürmek şok dalgasının jet bölgesinin içine bükülmesine sebep olur (Şekil 2.7-e). Bu durumda jet bölümünde subsonik ve süpersonik akışın bir karışımını veya yeterli düzeyde düşük geri basınç durumunda sadece süpersonik bir akış içerecek karmaşık bir şok ve yansıma profili oluşur. Şok dalgası artık nozul duvarlarının yakınındaki akışa dik olmadığından başlangıçta büzülen bir jet üreterek çıkıştan ayrıldığında içeri doğru yansır. Bu duruma aşırı genişlemiş akış denmektedir çünkü nozul çıkışındaki basınç geri basınçtan düşüktür. Geri basıncın daha da düşürülmesi, jet içindeki dalga profilini değiştirir ve zayıflatır. Artık geri basınç nozul çıkışındaki basınca eşittir. Bu durumda jet içindeki dalgalar tamamen kaybolur ve akış üniform süpersonik olur (Şekil 2.7-f). Bu durum çoğu zaman arzu edildiği için ‘tasarım koşulu’ denir. Son olarak, geri basınç daha da düşürülürse, çıkış ve geri basınçları arasında (geri basınçtan daha büyük çıkış basıncı) yeni bir dengesizlik yaratılmış olur (Şekil 2.7-g). Bu durumda, nozul çıkışında genleşme dalgaları olarak adlandırılan olay, başlangıçta jet kenarlarındaki akışı bir püskürme halinde dışarı doğru çevirerek ve farklı türde karmaşık dalga profili kurar (Devenport, 2021).



Şekil 2.7. Farklı ortam şartlarında oluşan akış rejimleri (Devenport, 2021).

2.4. Birikim Mekanizması

Soğuk sprey ile malzeme birikimi toz parçacıkların altlık malzeme üzerine ardışık darbeleri çarpması neticesinde meydana gelen viskoplastik deformasyona dayanır. Bu deformasyon besleme tozlarının ardışık bir birikinti halinde sıkıştırılmasını ve etkileşen ara yüzeylerin büyük bir bölümünde metalürjik bağlanma meydana gelmesini sağlar. İki işlem de yoğun ve güçlü bir kaplama elde etmek için ana hedeflerdir. Eksik sıkıştırma, yüksek

gözenek seviyesi ile sonuçlanırken; zayıf metalürjik bağlanma ve kaplamanın düşük dayanımlı olmasında sebep olur. Öte yandan hem sıkıştırma hem de bağlama işlemleri, parçacık darbe etkisi ve bunun sonucunda ortaya çıkan ciddi deformasyon yoluyla gerçekleşir. Bu nedenle, soğuk spreyleme biriktirme mekanizmasının anlaşılması, parçacık deformasyonunun anlaşılmasını gerektirir (Assadi vd., 2016).

Soğuk spreyleme işleminde temelde iki mekanizma mevcuttur. İlk toz parçacıkların altlık üzerinde ilk katmanı oluşturmasıyla başlar. İlk katmanın oluşumu tozların bağlanma mukavemetiyle ilişkilidir. Kaplamanın oluşmasından önce yapılan ilk işlem ile yüzeyin pürüzlülük seviyesi artırılır ve biriktirme verimi iyileştirilir. İkinci mekanizma ise ilk katmanın oluşumundan sonra toz parçacıkların kendi aralarında mekanik bağlanma esasına dayanır. Bu aşamada daha uygun katmanların oluşması nedeniyle kaplama katmanının kalınlığı giderek artar. Püskürtülen tozlar yüzeye yüksek hızda çarptığında ciddi plastik deformasyona maruz kalır. Bu durum, mekanik kilitleme ile sonuçlanır ve kaplama tozunun morfolojisinin, kaplama tabakasına gömülü parçacıkların boyut ve şekli açısından farklılık göstermesine neden olur (Kılıçay, 2020).

2.4.1. Parçacık darbe etkisi ve deformasyonunun fizik ve malzeme modelleri

Soğuk spreyleme tozları tipik olarak 10-50 μm çapındadır ve ilk temas zamanından kinetik enerjinin toplam dağılımına kadar parçacık çarpma süreci yaklaşık 100 ns sürer. Bu kadar küçük zaman ve uzunluk ölçeklerinde, parçacık etkisinin ve ilgili olgunun yeterli düzeyde deneysel olarak izlenmesi ve takip edilmesi mümkün olsa dahi oldukça zordur. Alternatif olarak, bu olayların nasıl gerçekleştiğinin anlaşılabilmesi amacıyla parçacık darbe etkisinin ve deformasyon mekanizmasının sayısal simülasyonu kullanılır. Simülasyonlar temel fizik biliminin nicel modellerine dayanmaktadır. Bu konudaki modelleme ve simülasyonlar tek bir küresel parçacığın aynı malzemeden yapılmış düz bir altlık malzemeye dik olarak uygulandığı durum için geliştirilmiştir (Assadi vd., 2016).

Soğuk spreyleme ile malzeme birikim işleminde rol oynayan birkaç fiziksel olgu vardır. Bunlardan en önemlisi dinamik kesme yükü altında meydana gelen viskoplastik deformasyondur. Elastik deformasyon viskoplastik deformasyonla karşılaştırıldığında soğuk

sprey işleminde çok fazla etkili değildir. Viskoplastik deformasyonun modellenmesi, genellikle ısı iletiminin modellenmesiyle birlikte takip edilir. Yüksek deformasyon hızları altında malzemenin termo-mekanik davranışı genellikle akış gerilmelerini (σ), şekil değişimine (ϵ), şekil değiştirme hızına ($\dot{\epsilon}$) ve sıcaklığa (T) bağlayan kurucu denklemler aracılığıyla açıklanır. Bu denklemlerden bir tanesi Denklem 2.3'te (Johnson, 1983) verilmiştir (Assadi vd., 2016).

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - \theta^m) \quad (2.3)$$

Burada $\dot{\epsilon}^*$ eşdeğer plastik şekil değiştirme hızıdır ve bir referans şekil değiştirme hızına göre normalize edilmiş bir değerdir.

$$\theta = (T - T_{Ref}) / (T_m - T_{Ref}) \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'te yer alan θ değeri ise normalleştirilmiş sıcaklık değeridir. T_{Ref} oda sıcaklığı olarak alınırken, T_m sıcaklığı ise ergime sıcaklığıdır. Bu noktada diğer alternatifler de göz önüne alındığında en iyi malzeme modelinin seçimi önemli bir parametre olarak varlığını sürdürmektedir. Bunun ana nedenlerinden biri, soğuk sprej işleminde 10^9 s^{-1} değerine kadar çıkabilen gerinim hızları aralığı için malzeme verilerinin neredeyse hiç mevcut olmamasıdır. Düşük deformasyon hızlarında bile plastik şekil değiştiren mikron boyutundaki parçacıklar için çok az bilgi mevcuttur. Dahası, parçacık etkisi sırasında deformasyonun doğru simülasyonu, henüz uygulanmamış olan plastik yapı özelliklerine ek olarak daha fazla iyileştirme gerektirir. Bunlar, parçacık çarpması sırasında deformasyon modeli üzerindeki gerinim gradyanlarının olası etkisini içerir (Fleck ve Hutchinson, 1993). Gerinim gradyanları altında, geometrik olarak gerekli dislokasyonların oluşması nedeniyle ek sertleşme meydana gelebilir (Fleck ve Hutchinson, 1993). Mikroyapısal değişikliklere, yani parçacık etkisinin modellenmesinde yaygın olarak dikkate alınmayan dinamik yeniden kristalizasyona bağlı ek yumuşama da olabilir (Jonas ve Sakai, 1984). Dikkat edilmelidir ki termal yumuşama Denklem 2.3'te görüldüğü gibi, mikroyapısal değişikliklerle değil, termal olarak aktive olan dislokasyon hareketiyle ilgilidir.

Viskoplastik deformasyon için gereken iş, çarpma sırasında büyük bir kısmı ısıya dönüştürülen çarpan parçacığın kinetik enerjisi ile sağlanır. Kabaca %10'dan daha az olduğu düşünülen kinetik enerjinin geri kalanı, kusurlar veya artık gerilme ile ilişkili elastik enerji olarak malzeme içinde depolanır. Üretilen ısı iletim yoluyla yayılabilir, ancak bu bazen ihmal edilir, yani deformasyonun adyabatik olduğu varsayılır. Adyabatik varsayımı, yalnızca sistem boyutu x termal yayılma mesafesinden ($\sqrt{\alpha t}$) önemli ölçüde daha büyük olduğunda geçerlidir.

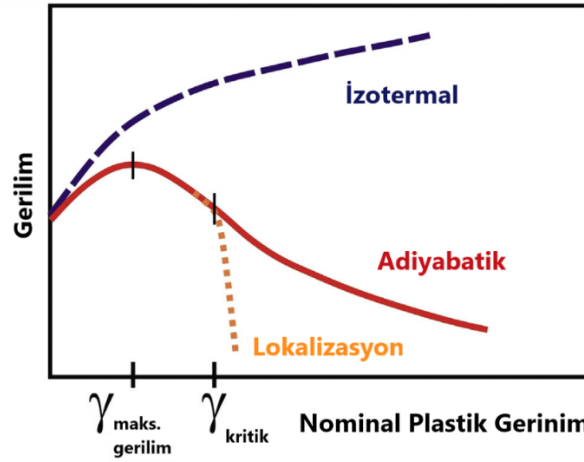
$$\frac{x^2}{\alpha t} = \beta \gg 1 \quad (2.5)$$

Denklem 2.5'te verilen x , karakteristik bir sistem boyutudur, α termal yayılımıdır, t işlem süresidir ve β adyabatiklik derecesini temsil eden boyutsuz bir parametredir. x 'in partikül çapı d_p ile orantılı olduğu ve t 'nin d_p 'nin çarpma hızına oranı v_p ile orantılı olduğu varsayıldığında, Denklem 2.6'daki gibi bir gösterim yapılabilir.

$$\beta \propto d_p v_p \quad (2.6)$$

Bu, aynı darbe hızı için daha büyük parçacıkların daha adyabatik olarak deforme olduğu anlamına gelir. Aslında sadece çok büyük parçacıklar bu koşulu karşılar (Schmidt vd., 2006). Bu nedenle, özellikle biriktirmede parçacık boyutunun rolü dikkate alınacaksa, parçacık deformasyonunun ayrıntılı kantitatif analizi için ısı transferi dikkate alınmalıdır.

Plastik deformasyon sırasında, özellikle yüksek gerilme oranları altında ısı oluşumu, gerilme lokalizasyonuna ve kayma kararsızlığına yol açabilir. Bu durum normalde dökme malzemelerde kayma bandı ve kırılma şeklinde kendini gösterir (Wright ve Wright, 2002). Şekil 2.8'de gösterildiği gibi, bir döküm bileşenin kesme deformasyonu sırasında termal yumuşama, adyabatik koşullar altında gerinim miktarına ve gerinim hızında sertleşmeye baskın olabilir ve bu da genel gerinim yumuşamasına yol açar.



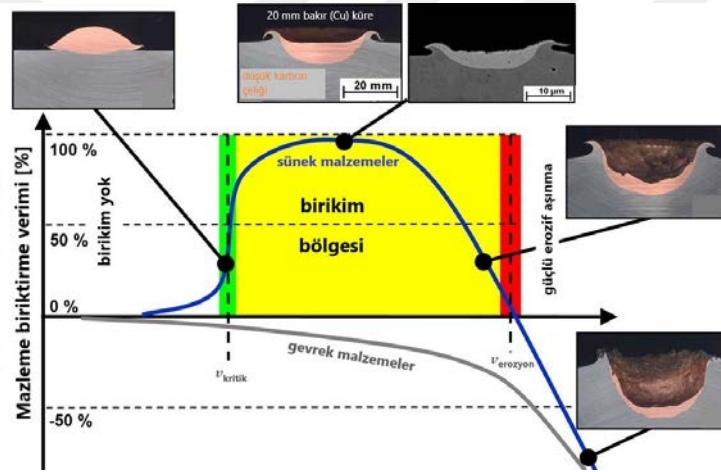
Şekil 2.8. Burulma deneyi sırasında tipik bir dökme metalik malzeme için gerilim-gerinim değişiminin şemaları (Assadi vd., 2016)..

Gerinim yumuşatma sırasında malzeme, plastik deformasyona göre doğal olarak kararsız hale gelir, böylece kritik bir gerilimde (γ_{cr}) lokalizasyon ve kayma bandı meydana gelebilir. Bu noktanın ötesinde, kesme bandındaki yerel gerinim keskin bir şekilde yüksek değerlere yükselirken, genel gerinim kopma noktasına kadar neredeyse değişmeden kalır. Bu olayın soğuk sprej işlemine parçacık bağlanmasıyla yakından ilgili olduğu düşünülmektedir. Bu kavramlar tipik deformasyon sertleştirme ve termal olarak aktive edilmiş deformasyon davranışları ile esas olarak kristal metaller ve alaşımlar için geçerlidir. Diğer malzemeler için farklı malzeme modelleri ve alternatif analitik yaklaşımlar gerekebilir. Örneğin, metalik camlar söz konusu olduğunda, işlem sertleştirme yerine gerinim yumuşatma vardır. Böylece malzeme her zaman kararsızlığa ve kayma bantlanmasına karşı hassas olur. Aksine, bazı intermetalik bileşikler için, anormal (monotonik olmayan) termal yumuşama nedeniyle kararsızlığın elde edilmesi zor olabilir. Örneğin, Ni_3Al 'da olduğu gibi 800 °C'ye kadar artan sıcaklıkla mukavemet artışı görülür. Seramik malzemeler için plastik deformasyon düşünülemez, bu nedenle biriktirme sürecini açıklamak için alternatif kavramlar ve tamamen farklı malzeme modelleri kullanılmalıdır (Assadi vd., 2016).

2.4.2. Kritik hız ve biriktirme verimi

Soğuk püskürtmede en önemli kriter malzeme birikiminin gerçekleşmesi için tozların alt tabaka üzerine çarptığı andaki hızının gerekli olan kritik hız değerine ulaşması ile ilgilidir.

Şekil 2.9, belirli bir darbe sıcaklığı için darbe hızının bir fonksiyonu olarak malzeme biriktirme verimliliğini şematik olarak göstermektedir. İdeal sünekliğe sahip bir malzeme olması durumunda belirli bir hızda malzeme birikimi oluşmaya başlar. Hızın daha fazla artması, biriktirme veriminde dik bir artışa yol açar ve sonunda doygunluğa ulaşarak yüzde yüze yakın bir düzeyde dengelenir. %50 biriktirme verimliliğinde kritik hız tanımlanır (Şekil 2.9'daki dikey yeşil çizgi). Biriktirme veriminin doygunluğa ulaştığı bölgede optimum kaplama koşulları beklenebilir. Doygunluk sınırına ulaştıktan sonra, partiküller tarafından altlık malzemenin hidrodinamik penetrasyonundan kaynaklanan aşındırıcı etkiler nedeniyle biriktirme verimi partikül hızındaki daha fazla artışla azalır (Schmidt vd., 2009).



Şekil 2.9. Sabit bir darbe sıcaklığı için parçacık hızı, biriktirme verimliliği ve darbe etkileri arasındaki şematik korelasyon (Schmidt vd., 2009).

20 mm çapa sahip bakır küreler ile çelik yüzeyler üzerine yapılan darbelerin büyük ölçekli kesitleri ilgili durumu ifade edebilmek için Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Biriktirmenin erozyona dönüştüğü parçacık hızı, erozyon hızı ($v_{erozyon}$) olarak tanımlanır. Çoğu malzeme için bu hız, kritik hızdan iki veya üç kat daha yüksektir. Seramik gibi kırılman malzemeler, ergime sıcaklıklarının altındaki sıcaklıklarda herhangi bir hız için erozyona neden olabilir. Bağlama için kritik parçacık hızı (v_{kritik}), çeşitli faktörlere bağlıdır ancak en belirgin şekilde püskürtme malzemesinin özellikleri ile ilişkilidir. Çizelge 2.2, çeşitli metalik malzemeler için deneysel olarak elde edilen kritik hız değerlerini göstermektedir. Çizelge 2.2'de alüminyum ve tantalyum karşılaştırıldığında kritik hızın tek başına ergime sıcaklığı ile ilişkili olmadığı görülmektedir (Schmidt vd., 2009).

Çizelge 2.2. 20 µm parçacık boyutu bağlanma şartı için kritik hız değerleri (Schmidt vd., 2009).

Malzeme	Ergime noktası, °C	Kritik hız, m/s
Alüminyum	660	620-660
Titanyum	1670	700-890
Kalay	232	160-180
Çinko	420	360-380
Paslanmaz çelik (316L)	1400	700-750
Bakır	1084	460-500
Nikel	1455	610-680
Tantalyum	2996	490-650

Bakır partiküllerinin soğuk sprej kaplama uygulamasında simülasyon ve deneysel çalışmalara dayalı sonuçlara göre kritik hızın partikül çapının (d_p) ve darbe sıcaklığının (T_p) bir fonksiyonu olduğu Denklem 2.7 ile ifade edilir. Buna göre artan partikül boyutu ile kaplamaların daha yüksek kohezyon gücü neticesinde daha iyi partiküller arası bağlanma elde edilir (Schmidt vd., 2009).

$$v_{kritik}(d_p, T_p) = \frac{\sqrt{657000 - 600 * T_p}}{d_p^{0.18}} \quad (2.7)$$

2.5. Soğuk Gaz Dinamik Sprej İşlemini Etkileyen Faktörler

SGDS yönteminde, uygulanan kaplamanın bağlanma mukavemetini, gözenek seviyesini, metalürjik özelliklerini kısacası kaplamanın kalitesini belirleyen pek çok parametre mevcuttur. Bunlar nozul tasarımı, geometrisi ve malzeme özellikleriyle ilgili olduğu gibi, kullanılan toz parçacıkların malzemesi, metalürjik özellikleri, kullanılan taşıyıcı gazın türü, basıncı ve sıcaklığına da bağlıdır. Ayrıca soğuk sprej tabancasının kontrolü ile hareketleri, spreyleme işleminin altlık malzemeye uygulama mesafesi ve uygulama açısı da soğuk spreyleme işlemini etkileyen önemli parametrelerdir. Bu bölümde bu parametrelerin soğuk sprej işlemine etkisi üzerinde durulmuştur.

2.5.1. Taşıyıcı gaz özellikleri

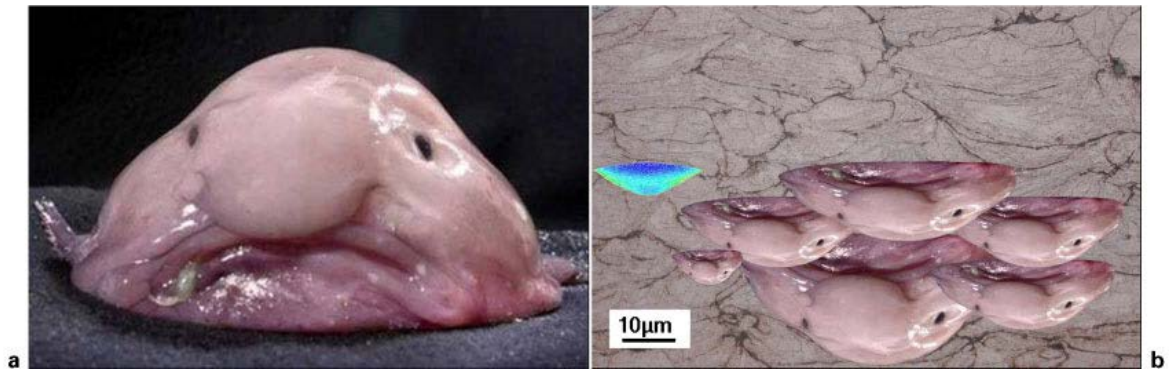
Soğuk spreyde gaz tüketimi, birçok termal sprey işleminden çok daha fazladır. Bunun nedeni, parçacıkları itmek için gerekli olan yüksek hızlar ve akışlardır. Soğuk gaz dinamik sprey işleminde kullanılan gazlar genellikle helyum, azot, hava ve bunların karışımıdır. Bu gazlar arasındaki temel fark yoğunluktur. Kullanılan gazların yoğunluğu ve eylemsizliği toz parçacıkların ulaşabilecekleri maksimum hızı belirler (Villafuerte, 2015). Taşıyıcı gaz olarak hava kullanımı maliyet açısından en uygun yöntemdir ancak oksit oluşma riski en yüksek gaz türüdür. Azot gazının soğuk sprey işleminde kullanımı oldukça yaygındır. Pek çok püskürtme tozu için oksidasyon oluşturmaz ve helyum gazına göre düşük maliyete sahiptir. Azot gazı sıvı azot tanklarından tedarik edilebilir ancak kullanım sırasında uygun çalışma basınçlarına sıkıştırılmalıdır. Bazı malzemeler için, azot ile üretilen hızlar, iyi birikme verimliliği veya yüksek kaliteli kaplamalar üretmek için yeterli değildir (Davis, 2004). Helyum, nitrojene göre çok daha yüksek hızlara ulaşabilmesi ve geniş malzeme biriktirme yelpazesi nedeniyle genellikle hızlandırıcı gaz olarak tercih edilir. Ancak az bulunması nedeniyle pahalıdır ve soğuk spreyleme işleminin maliyetini artırır. Nozul çıkışında helyumun tekrar yakalanması, saflaştırılması ve sıkıştırılıp tekrar kullanılması mümkün olsa da şu an kullanılan soğuk sprey sistemlerinin pek çoğunda mevcut değildir. Bu sistemlerin kullanımıyla birlikte helyum kullanım maliyetlerinin düşeceği açıktır (Champagne ve Helfritch, 2015).

Kullanılan gaz sıcaklığının soğuk sprey işlemi üzerine de önemli etkileri vardır. Yüksek çalışma sıcaklığı ve basıncı gazın nozul içerisinden geçerken yüksek hızlara ulaşmasını dolayısıyla toz parçacıkların da ivmelenerek yüksek hızlara ulaşmasını sağlar. Gazın nozul giriş sıcaklığı 400–1100 °C değerlerinde olsa da nozul içerisindeki akım sırasında genişlemesi neticesinde çıkış sıcaklığı 100–500 °C sıcaklık değerlerinde olur (Champagne ve Helfritch, 2016). Nozulun tıkanma riski ve termal direnci, sistemde kullanılan sıcaklığı sınırlar. Bu engeller parçacık çarpma hızını ve çarpma sıcaklığını sınırlar. Ayrıca parçacık darbe sıcaklığı, termal yumuşama nedeniyle ulaşılabilecek kritik hızı azaltır (Schmidt vd., 2006).

Kullanılan gazın basıncının da kaplama kalitesi üzerine etkileri vardır. Düşük basınçlı gaz ile uygulanan kaplama işlemlerinde kaplama altlık ara yüzeyinde büyük boyutlu hatalar meydana gelebilir (Lee vd., 2010). Gaz akış alanı, enjeksiyon basıncından önemli ölçüde etkilenir. Enjeksiyon basıncının arttırılması, taşıyıcı gaz hızının ve akış hızının artmasına neden olur. Toz parçacıkların enjeksiyon hızı ve nihai kaplama kalınlığı, gazın enjeksiyon basıncı ile yukarı yönlü bir eğilim gösterir. Ayrıca toz parçacık dağılım davranışı enjeksiyon basıncı ile de ilişkilidir. Artan türbülans etkisi nedeniyle enjeksiyon basıncı arttıkça partikül dağılımının giderek daha belirgin hale gelir. Daha yüksek enjeksiyon basıncı, kaplama kalınlığını ve dağılımını kolaylaştırır, ancak aynı zamanda biriktirme verimini ve yapışma mukavemetini azaltır. Bu nedenle, püskürtmeden önce enjeksiyon basıncını dikkatlice seçmek önemlidir (Yin vd., 2014).

2.5.2. Toz yapısı

Soğuk sprej işleminde metal, kompozit ve seramik gibi çeşitli mühendislik malzemelerden üretilmiş mikron mertebesinde toz parçacıklar kullanılır. Bu toz parçacıklar küresel veya düzensiz geometriye sahip olabilir. İşlem sırasında parçacık darbe etkisiyle yüksek plastik deformasyona uğrarlar. Soğuk spreyle üretilen bir kaplamanın kesiti görüntüsü incelendiğinde (Şekil 2.10) deformasyon neticesinde yassılaşıma etkisiyle balon balığına benzer bir form aldıkları görülür (Jeandin vd., 2014).



Şekil 2.10. (a) Balon balığı, (b) Püskürtülmüş Cu toz parçacıklarının mikroyapı içerisinde balon balığına benzer yassılaşımış görüntüsü (Jeandin vd., 2014).

Toz parçacıkların mikro yapısının ve geometrisinin kaplama üzerine önemli etkileri vardır. Küresel tozların akıcılık seviyesi düzensiz şekilli tozlara göre daha yüksektir. Genel

anlamda düzensiz geometriye sahip tozlar kullanılarak oluşturulan kaplamalar, daha yüksek partikül darbe hızları, gözenekli yüzey yapısı, daha fazla deforme olabilen mikro yapıları ve daha yüksek spesifik yüzey alanı sağlar. Bu nedenle küresel tozlar kullanılarak oluşturulan kaplamalara kıyasla ihmal edilebilir gözenek seviyesi ve daha iyi özellikler sunarlar. Ayrıca düzensiz şekilli tozların oluşturduğu kaplamaların sertliği ve biriktirme verimi daha yüksektir. Küresel tozlar kullanılarak elde edilen kaplamalar, düzensiz geometriye sahip tozlar ile elde edilen kaplamalara kıyasla daha zayıf bağlanma dayanımı sergilerler (Munagala vd., 2018). Ayrıca kullanılan toz parçacıklarının boyutları büyüdükçe hızlarında önemli miktarda düşüş meydana gelir (Ning vd., 2007). Soğuk püskürtme işleminde daha küçük boyutlu partiküllerin daha yüksek hızlara ulaştığı bilinmektedir. Küçük partiküllerin parçaya çarptıklarındaki hızları nozuldan yüksek çıkış hızlarına rağmen çok daha düşük olabilse de bu şekilde iyi bir biriktirme verimi elde edildiği düşünülmektedir (Poirier vd., 2019).

2.5.3. Nozul uygulama mesafesi ve sprej açısı

Uygulama mesafesi nozul çıkış noktası ile altlık malzeme yüzeyi arasında kalan alan olarak tanımlanır. Süpersonik bir serbest jette, jet ve atmosfer arasındaki momentum değişimi nedeniyle jet çekirdeğinin yoğunluğu jet merkezi eksenini boyunca kademeli olarak azalır (Yin vd., 2014 a; Yin vd., 2014 b). Jet çekirdeğinin içinde parçacıklar pozitif sürüklenme kuvvetlerine maruz kalır ve dolayısıyla hızla hızlanır. Ancak, gaz memenin uzaklaşan bölümünden çıktıktan kısa bir mesafe sonra gaz yavaşlayarak partikül hızının altına düşer ve ortaya çıkan negatif sürüklenme kuvveti partiküllerin yavaşlamasına neden olur. Sonuç olarak, parçacık çarpma hızı ve biriktirme verimliliği, mesafe sıfırdan arttıkça artar, ancak daha sonra optimal bir çalışma noktasından sonra azalır (Pattison vd., 2008). Yapılan çalışmalarda uygulama mesafesinin artmasıyla biriktirme veriminin düştüğü gözlemlenmiştir. Farklı malzemeler ve toz grupları için en iyi kaplama verimliliği için farklı optimum uygulama mesafesi değerleri olabilir. Bu optimum değer aşıldığında verim düşer. Ayrıca artan mesafe mesafesi ile kaplama kalınlığı azalır (Li vd., 2008).

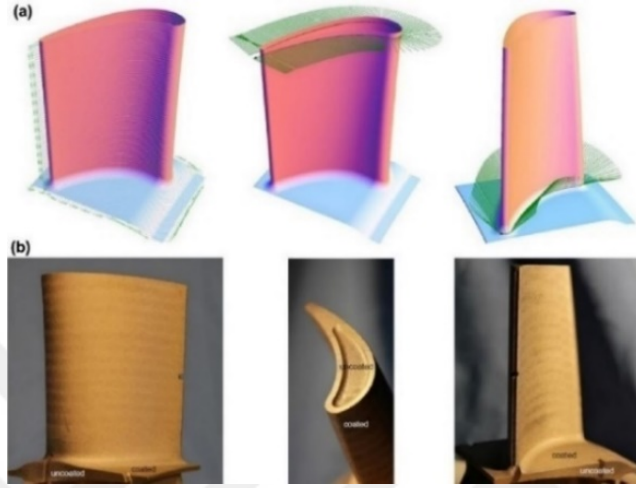
Sprej açısı nozul merkez eksenini altlık yüzeye olan açısı olarak tanımlanır. Parçacık çarpma hızının vektör bileşenleri ve dolayısıyla kaplama biriktirme özellikleri üzerinde

önemli bir etkiye sahiptir. Alt tabaka yüzeyine normalden farklı bir açıyla gerçekleştirilen püskürtme sırasında, sadece normal hız bileşeni parçacık birikimine katkıda bulunurken, teğet hız bileşeni biriken parçacıkları potansiyel olarak ayırarak karşıt bir rol oynayabilir (Chen vd., 2016; Li vd., 2010). Püskürtme açısı azaldıkça, normal hız bileşeni azalır, ancak teğetsel hız bileşeni artar, bu da birikim kalitesini önemli ölçüde bozar. Biriktirme verimliliği, kaplama mukavemeti ve yapışma mukavemetinin tümü, azalan püskürtme açısı ile azalır (Yin vd., 2018). Genel olarak, en iyi kaplama kalitesi ve biriktirme verimliliği, püskürtme açısı 90° olduğunda ortaya çıkar. Ancak, karmaşık geometriye sahip numuneleri kaplarken veya çalışma koşulları nedeniyle sınırlamalar olması durumunda püskürtme açısı değişebilir (Chen vd., 2017). Parçacık altlık malzemeye çarptığında maruz kaldığı plastik deformasyon normal hız ile ilişkilidir. Bu sebeple normal açıdan farklı bir açı ile püskürtülen parçacıkların normal hız bileşeni azalır. Bu durum birikim kalitesini ve kaplamanın mikro yapısını değiştirir (Li vd., 2003).

2.5.4. Nozul hareketleri ve yörüngesi

Nozul yörüngesi terimi nozulun kaplama üretim sürecinde izlediği yolu tanımlamak için kullanılır. Soğuk spreyleme işleminde belirlenen yörüngenin temel prensibi homojen yoğunluk ve homojen özellik dağılımı meydana gelen bir birikim oluşturmaktır. Genellikle düz bir yüzey üzerine bir kaplama işlemi uygulanırken basit bir gidişi-dönüş (zikzak deseni olarak bilinir) yörüngesi uygulanır. Bu yörüngenin tanımlanması kolaydır ve bu yörünge kullanılarak homojen bir birikim elde edilebilir (Rech vd., 2014). Bununla birlikte, karmaşık ve kavisli yüzeyler için yörünge tanımı, biriken malzemenin homojen olmasını sağlamak için, uygulama mesafesinin, püskürtme açısının, nozul hızının ve diğer üretim parametrelerinin kavisli yüzey üzerinde sabit tutulmasını sağlamalıdır. Ek olarak, yörünge tanımı, farklı özellikler arasındaki eğriliği ve geçişi de dikkate almalıdır (Lynch vd., 2013). Karmaşık yüzeyler için nozul yörüngeleri, nozul parametrelerini doğru bir şekilde kontrol etmek ve bunları yüzey topografyasına uyarlamak için CAD/CAM yazılımının yardımıyla bir programlama platformunda tanımlanır (Yin vd., 2018). Şekil 2.11, bir türbin kanadı yüzeyinin soğuk spreyleme işlemi ile biriktirilmesi için bir nozul yörünge tanımını ve sonuçta ortaya çıkan soğuk püskürtmeli MCrAlY kaplamasını göstermektedir. Yörünge ilk olarak Şekil 2.11 a'da gösterildiği gibi nozul dönüş hızını, tarama adımını, uygulama mesafesini ve

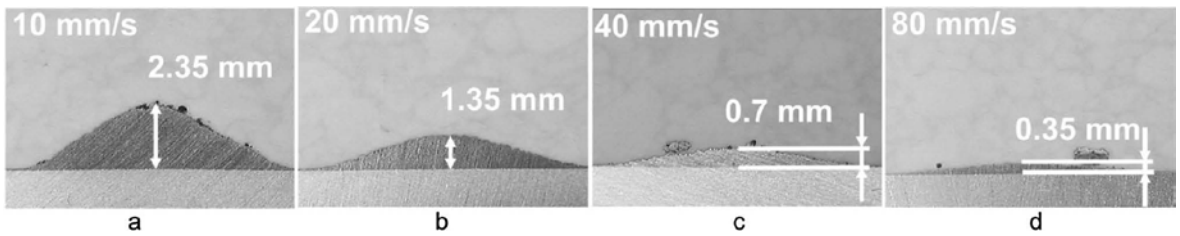
püskürtme açısını tanımlamak için çevrimdışı bir platformda programlanmıştır. Bu yörünge daha sonra, Şekil 2.11 b’de gösterilen soğuk sprej kaplama yöntemi uygulanarak ile bir robot kol tarafından yürütülmüştür (Stier, 2014).



Şekil 2.11. (a) Bir türbin kanadının soğuk sprej kaplama için oluşturulan nozul yörüngesi, (b) elde edilen soğuk sprej MCrAlY kaplama (Stier, 2014).

2.5.5. Nozul hareket hızı

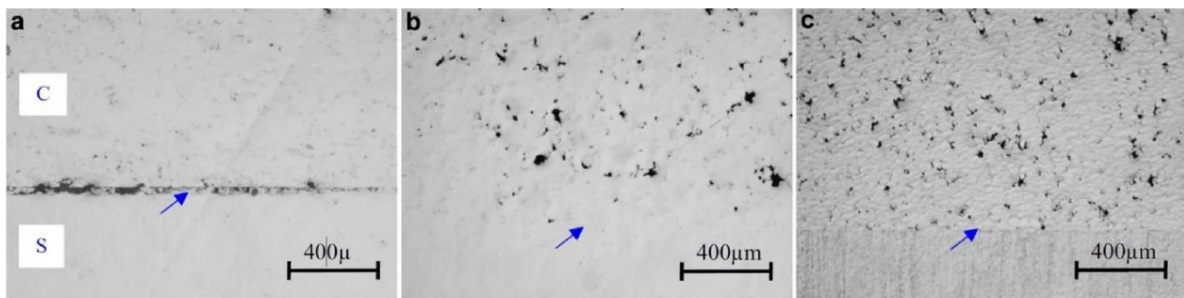
Nozul hareket hızı, nozulun alt tabaka üzerinde kalma süresinin ve birim zamanda biriken metal toz parçacıklarının miktarının bir ölçüsüdür. Aynı zamanda alt tabaka üzerinde biriken kaplama kalınlığını belirler ve kesit profilini etkiler (Yin vd., 2018). Genel olarak, daha düşük bir nozul hareket hızı, Şekil 2.12’de gösterildiği gibi daha kalın tek katmanlı birikim ve daha keskin ara kesit profili ile sonuçlanır (Chen vd., 2017).



Şekil 2.12. Nozul hareket hızının tek katmanlı birikim kalınlığı ve kesit profili üzerindeki etkisi (Chen vd., 2017).

SGDS teknolojisinin gerçek uygulamalarında, tek katmanlı bir kaplamanın kalınlığının ve profilinin kontrolü, nozul hareket hızı ve toz besleme hızının koordinasyonu

ile gerçekleştirilir (Pattison vd., 2007; Sova vd., 2013). Nozul hareket hızı da kaplamanın mikro yapısını ve özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Nozul hareket hızı azaldıkça birikim yoğunluğu artar, ancak birikimin elastisite modülü, mukavemeti ve alt tabaka ile olan bağlanma mukavemeti gibi mekanik özelliklerinde de bir azalma meydana gelir (Moridi vd., 2014; Rech vd., 2014; Tan vd., 2017). Şekil 2.13, farklı nozul hareket hızları kullanılarak Ti6Al4V alt tabakaları üzerine bırakılan Ti6Al4V kaplamaların kesit görüntülerini göstermektedir (Tan vd., 2017).



Şekil 2.13. Ti6Al4V altlık üzerinde farklı nozul dönüş hızları ile üretilen Ti6Al4V kaplamaların kesit görüntüsü: (a) 100 mm/s, (b) 300 mm/s ve (c) 500 mm/s. Mavi oklar, kaplama-alt tabaka ara yüzeyini gösterir (Tan vd., 2017).

Nozul hareket hızı arttıkça gözenek seviyesinin arttığı açıkça görülmektedir. Ayrıca, Şekil 2.13. a'da gösterilen en düşük hızda, kaplamanın alt tabakadan delaminasyonu gözlemlenir, bu da yüksek kalıntı gerilimlerin neden olduğu düşük bağlanma mukavemetine işaretler (Ozdemir vd., 2017; Tan vd., 2017).

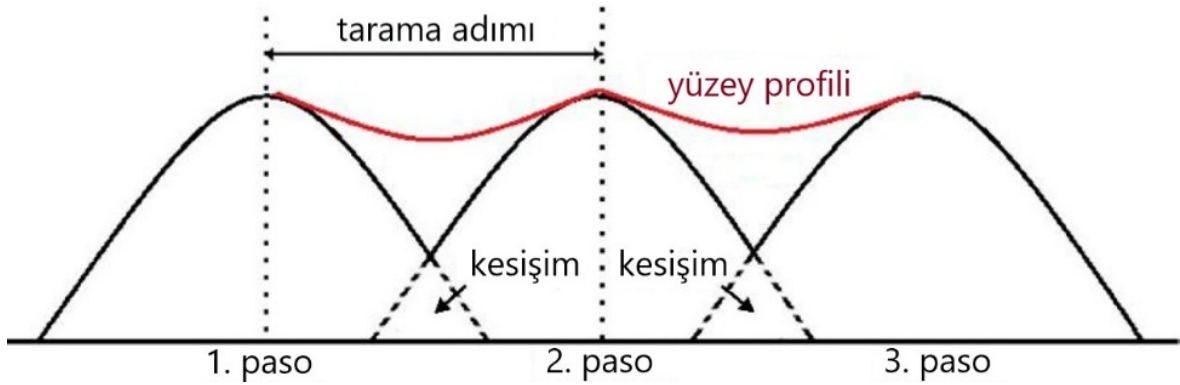
Nozulun tek adımlı hareketi neticesinde daha kalın katmanlar toz besleme miktarının artırılmasıyla da elde edilebilir (Pattison vd., 2007; Sova vd., 2013). Değişen nozul hareket hızı nedeniyle pik kalınlığındaki değişiklik, birim zaman ve birim alan başına salınan besleme tozunun farklı miktarından kaynaklanmaktadır. Daha düşük nozul hareket hızı ve daha yüksek toz besleme hızı hem birim zaman hem de birim alan başına daha fazla miktarda tozun salınmasına neden olabilir. Tek katmanlı birikim profilindeki değişiklik, süpersonik bir nozuldan geçen taşıyıcı gazın akış özelliklerinden kaynaklanır. Akışkanlar dinamiği teorisine göre, merkezi bölgede parçacık hızı ve sonuçta ortaya çıkan biriktirme verimliliği, dış bölgede olduğundan daha yüksek olacaktır (Champagne vd., 2011; Tabbara vd., 2011; Yin vd., 2014 a). Hızdaki bu radyal değişim nedeniyle, birikim kesit profili, Şekil 2.12'de

gösterildiği gibi bir gauss şekli olacaktır. Oluşan katmanın eğimli tarafı bir sonraki biriktirme pasosundan gelen toz parçacıklara eğim vererek birikim verimini azaltır. Bu nedenle, nozul hareket hızı azaldıkça ve toz besleme hızı arttıkça birikim profili giderek daha dik hale gelir.

Nozul hareket hızının bir başka potansiyel etkisi, yüksek sıcaklıktaki çarpma jeti ile kaplamanın ve/veya alt tabakanın ısınmasıdır. Daha düşük nozul hızı, daha yüksek kaplama ve alt tabaka sıcaklıkları ile sonuçlanır, bu da birikme işlemine katkıda bulunur (Tan vd., 2017; Yin vd., 2015) Ancak bunun sonucunda ara yüzeyde termal gerilemeler meydana gelir (Candel ve Gadow, 2009). Şu anda, nozulun hareket hızının nasıl seçileceğine dair genel bir kural yoktur. Bununla birlikte, mevcut çalışmalara ve araştırmacıların deneyimlerine göre, düşük nozul hareket dönüş hızlarının kullanılması, genellikle birilim ve altlık arasında yüksek lokalize artık gerilmeler ve düşük bağlanma mukavemeti ile sonuçlanır (Ozdemir vd., 2017).

2.5.6. Nozul tarama adımı

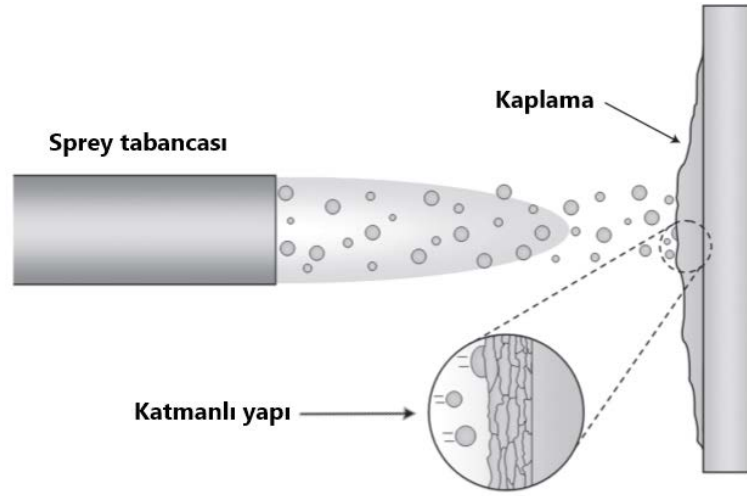
Tarama adımı ardışık iki kaplama pasosu arasındaki mesafe olarak tanımlanır. Kaplama kalınlığı ve kaplamanın profili üzerinde etkileri vardır. Nozul tarama adımı mesafesi arttıkça maksimum kaplama kalınlığı, minimum kaplama kalınlığı, ortalama kaplama kalınlığı ve kaplama yüzeyinin düzlüğü azalır (Cai vd., 2014). Bir soğuk spreyci birikiminin oluşturulması, önceden tanımlanmış bir yörüngeye göre tüm hedef yüzey üzerinde satır satır ve katman katman nozul taraması yoluyla elde edilir. Başka bir deyişle, birçok tekil biriktirme adımının uygulanması yoluyla üretilir. En sık kullanılan tarama stratejisi, Şekil 2.14'te gösterildiği gibi, iki komşu tekil paso adımının birbiriyle örtüştüğü stratejidir. Tarama adımının kaplama üzerindeki ana etkisi, birikim kalınlığının ve yüzey geometrisinin tekdüzeliği üzerindeki etkisidir. Düzgün seçilmiş bir tarama adımı homojen bir birikim ve pürüzsüz bir yüzey elde edilmesini sağlar. Araştırmacılar tarafından kaplama yüzeyinde tatmin edici düzeyde bir düzlük elde edilebilmesi için genelde tek bir kaplama paso genişliğinin yarısı kadar tarama adımı mesafesi seçilir. Ancak son dönemlerde geliştirilen yazılımlar sayesinde daha az dalgalı yüzey elde etmek için yapılan simülasyonlar ile en iyi tarama adımı seçimleri gerçekleştirilebilmektedir (Yin vd., 2018).



Şekil 2.14. Tarama adımı tanımının şematik gösterimi (Yin vd., 2018).

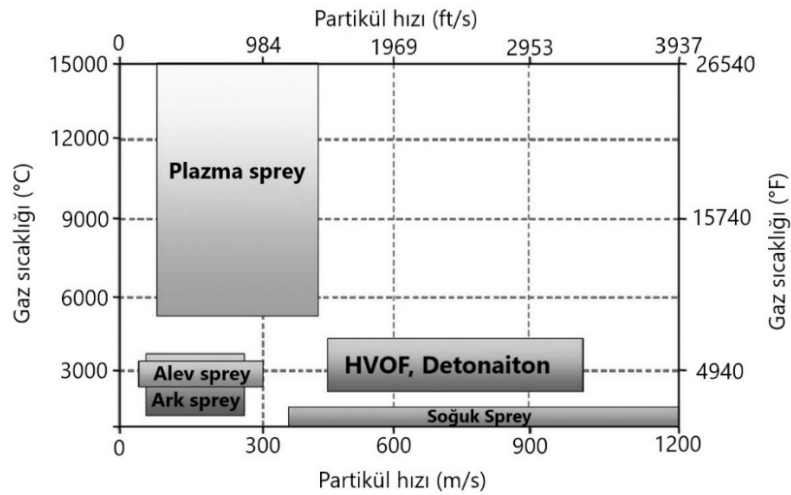
2.6. SGDS Teknolojisinin Diğer Termal Sprey Yöntemler ile Karşılaştırılması

Termal sprej terimi, ark spreji, plazma spreji, alev spreji ve yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF) spreji gibi geniş bir sprej proses teknolojileri ailesini ifade eder. Genel bir termal püskürtme işleminde (Şekil 2.15), toz, tel veya çubuk hammaddeden küçük boyutlu ergimiş veya yarı erimiş damlacıklar (tipik olarak 10-100 mikron çapında) oluşturmak için elektrik veya kimyasal enerji kullanılır. Bu damlacıklar, 1000 m/s'ye kadar ulaşan hızlarda bir ses altı veya ses üstü gaz veya atomizasyon akımıyla bir iş parçası yüzeyine çarptırılır. Karşı malzemeye çarpan her damlacık yayılır ve 104–108 K/s düzeyindeki soğuma hızlarında hızla katılaşır ve "yassı tanecik (splat)" adı verilen spreyle birleştirilmiş malzemenin temel mikroyapısal birimini oluşturur. Çok yüksek soğutma hızları nedeniyle, tek bir yassı tanecik tipik olarak bir sonraki ergimiş damlacık onun üzerine çarpmadan önce katılaşır. Yassı tanecikler, çoğu termal sprej yönteminde ortaya çıkan ve malzemenin bir özelliği olan katmanlı (lameller) mikro yapıyı oluşturur (rastgele istiflenen kar taneleri veya oyun kartları gibi). Yassı tanecik sınırları olarak adlandırılan katılaşmış levhalar arasındaki ara yüzlerin kalitesi, tane sınırlarının dövme veya döküm malzemelerin özelliklerini etkilemesine çok benzer şekilde, püskürtmeyle birleştirilmiş malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini güçlü bir şekilde etkiler (Smith, 2007).



Şekil 2.15. Genel termal sprej işleminin şematik gösterimi (Smith, 2007).

Soğuk gaz dinamik sprej yönteminin diğer termal sprej yöntemleriyle pek çok benzer noktası olmasının yanında, yöntemi ve kullanılan malzemeleri benzersiz kılan temel farklılıklar da mevcuttur. Soğuk sprejin benzersiz özellikleri geleneksel termal sprej proseslerinin doğal sınırlamaları ortadan kaldırarak önemli avantajlar sunar. Şekil 2.16 soğuk püskürtme ve en çok bilinen geleneksel termal püskürtme işlemleri için yaklaşık işlem sıcaklıkları ve parçacık hızlarının bir karşılaştırmasını göstermektedir. Bu karşılaştırmadan, soğuk sprejin diğer sprej teknolojilerine göre nispeten benzersiz bir konuma sahip olduğu ve çok yüksek parçacık hızları ile birlikte olağanüstü düşük işlem sıcaklıkları sunduğu açıktır (Smith, 2007).

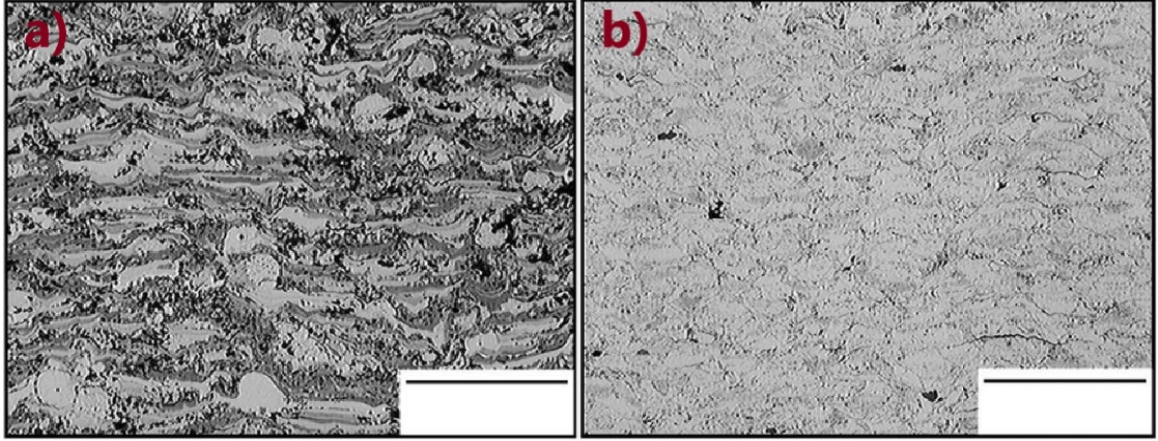


Şekil 2.16. En çok kullanılan termal sprej yöntemleri ile soğuk sprejin karşılaştırması (Smith, 2007).

SGDS yönteminde basınçlı gaz, elektrik enerjisi yardımıyla 300 ila 800 °C'ye ısıtılır ve süpersonik hıza ulaşmak için yakınsak-ıraksak nozuldan geçer. Termal püskürtme yöntemlerinden farklı olarak, gazın ısıtılmasının nedeni tozu ergitmek değil, gazın hızını arttırmaktır. Nozuldan geçen gaz hızla genişler ve soğuyarak daha düşük sıcaklıklarda nozuldan çıkar. Diğer termal püskürtme yöntemleriyle karşılaştırıldığında, soğuk spre y yöntemi çok düşük sıcaklıklarda ve çok yüksek parçacık hızlarında çalışabildiği görülmektedir (Champagne, 2007).

2.6.1. Soğuk gaz dinamik spre y yönteminin avantajları

SGDS yöntemi düşük işlem sıcaklığı ile çalışan bir katı hal mekanizması olduğu için diğer termal spre y yöntemlerinden ayrılır. Geleneksel termal spre y işlemlerinin iki önemli sınırlaması gözeneklilik ve metal oksit oluşumudur. Soğuk spre y bu iki sınırlama üzerinde önemli avantaja sahiptir. Örnek olarak Şekil 2.17 plazma spre y ve soğuk spre y yöntemleri ile elde edilmiş bakır kaplamaların mikroyapılarını göstermektedir. Şekil 2.17 a'da plazma spre y kaplamada %5 gözeneklilik alt malzemeye çarpan ergimiş damlacıkların yüzey düzensizliklerini tamamen dolduramamasından kaynaklanır. Şekil 2.17 b'de %1'in altında elde edilen gözenek seviyesi toz parçacıkların katı halde kalması ve bir sıçrama meydana gelmemesi nedeniyle açıklanabilir. Ayrıca yüksek hızda yüzeye çarpan katı partiküller önceden biriktirilmiş tabakaları darbe etkisiyle deforme eder ve var olan gözenek ve boşlukları kapatma eğilimi gösterir. Diğer bir karşılaştırma ise oksit oluşumudur. Şekil 2.17 a'da plazma spre y kaplama toz parçacıkların işlem öncesi içerdiği oksit miktarından ağırlıkça 6 kat fazla oksit içerir. Plazma spre yinin yüksek işlem sıcaklıkları ve bunun sonucunda bakır tozunun atmosfer ortamında ergimesi, spre y işle mi sırasında sıcak metalin önemli ölçüde oksidasyonu ile sonuçlanmıştır. Bununla birlikte soğuk spre y kaplamanın oksit içeriği işlem öncesi toz partiküllerin oksit içeriği ile neredeyse aynıdır. Soğuk spre y çok daha düşük işlem sıcaklıklarında gerçekleştirildiği için spre y ortamında metallerin oksijenle reaksiyonu büyük ölçüde azalır veya ortadan kalkar. Geleneksel termal spre y işlemlerinde meydana gelen oksidasyon ve gözeneklilik gibi mikroyapı hataları kaplamanın mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Plazma püskürtmeli bakır kaplamanın iletkenliği oksijensiz yüksek iletkenliğ e sahip bakırın %15'i seviyelerindeyken, soğuk spre y kaplamanın iletkenliği ise yaklaşık %85'i seviyesindedir.



Şekil 2.17. Aynı malzemeden üretilen iki bakır kaplamanın karşılaştırılması: (a) plazma sprej, (b) soğuk sprej (Smith, 2007).

Atmosferik ortamda geleneksel termal sprej yöntemleri ile biriktirilen birçok metal kaplamanın sünekliği zayıftır ve talaşlı yöntemler ile işlenmesi zordur. Soğuk sprej kaplamalarda yüksek plastik deformasyondan kaynaklı düşük sünekliğe sahiptir. Ancak soğuk püskürtülen kaplamalar büyük ölçüde gözeneklilik ve oksit kusurlarından arınmış olduğundan, malzemeyi tavlama için basit bir biriktirme sonrası ısıtma işlemi, soğuk püskürtülmüş bir metalin sünekliğini önemli ölçüde iyileştirebilir. Soğuk püskürtme işleminde katı halde biriktirmenin bir başka avantajı, hammadde tozunun kimyasal özelliği, faz bileşimi ve kristal (tane) yapısının kaplamada korunmasıdır. Birden fazla element içeren metal alaşımları, geleneksel termal sprej biriktirmede yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı için daha uçucu elementlerin tercihli buharlaşması nedeniyle kimyasal yapıda bir miktar değişim yaşanabilir. Farklı olarak soğuk sprejdeki katı sprej partikülleri minimum ısı girdisine maruz kalır ve bu nedenle karmaşık bir alaşımın kimyasında herhangi bir değişiklik olmaz. İlk faz bileşimi ve kristal yapısı korunur. Çoğu geleneksel termal püskürtme işlemi için bilinen bir diğer sınırlama, ergimiş damlacıkların katılaşırken artık çekme gerilmeleri oluşturmalarıdır. Bu artık gerilmeler zamanla çatlak oluşumuna ve kaplamanın ayrılmasına neden olabilir. Soğuk sprej kaplama işleminde oluşan gerilmeler darbe etkisi nedeniyle bası karakterli olduğu için malzemenin yorulma dayanımı üzerinde olumlu etkileri vardır (Smith, 2007).

2.6.2. Soğuk gaz dinamik sprey yönteminin dezavantajları

Soğuk sprey yöntemi geleneksel termal sprey proseslerine göre önemli avantajlar sunabilse de alüminyum, bakır, çelik, nikel gibi sünek malzemelerin, seramik veya nispeten daha sert alt tabaka malzemeleri üzerine biriktirilmesinde sınırlıdır. Bunun gerçekleşmesi için, sprey partiküllerinin plastik olarak deforme olacak kadar yeterli sünekliğe sahip olması ve alt malzemenin de biriktirilecek partiküllerin plastik olarak deforme olmasına neden olacak seviyede sert olması gerekir. Bu nedenle, seramik veya kırılğan metaller arası alaşımlar gibi kırılğan püskürtme partikülleri ve plastik, elyaf takviyeli kompozitler gibi daha yumuşak alt tabaka malzemeleri genellikle soğuk püskürtme işlemi için uygun değildir.

Diğer bir potansiyel sorun, soğuk püskürtme işleminin geleneksel termal püskürtme işlemlerinden çok daha büyük miktarlarda, tipik olarak 1-2 m³/dk (35-70 ft³/dk) düzeyinde işlem gazı kullanmasıdır. Basınçlı hava veya nitrojen gibi nispeten ucuz bir proses gazının uygun olduğu uygulamalarda bu ciddi bir sorun olmayabilir. Ancak bazı malzeme ve uygulamalarda gerekli darbe hızlarını ve kaplama kalitesini elde etmek için birincil soğuk püskürtme proses gazı olarak helyum kullanılması gerekebilir. Helyum pahalı bir gaz olduğundan, helyumun gerekli olduğu uygulamalar için işlem maliyeti önemli ölçüde artar.

Bazı uygulamalar için soğuk spreyn bir başka sınırlaması, iyi tanımlanmış sprey bulutunun (sütununun) nispeten küçük (tipik olarak 1 cm'den daha küçük) olmasıdır. Bu nedenle, soğuk püskürtme işlemi sprey bulutunun önemli ölçüde daha büyük olduğu ark sprey gibi bazı geleneksel termal sprey yöntemleriyle karşılaştırıldığında, çok geniş yüzey alanlarını kaplamak için pek uygun değildir. Ek olarak, soğuk püskürtülen metallerin biriktirilmesinin doğasında var olan ciddi plastik deformasyon, püskürtülen malzemeyi sertleştirir ve kaplamanın sünekliğinin düşük olmasına neden olur. Yüksek sertlik gereken bazı durumlarda ise bu durum bir avantaj haline gelir.

Çoğu metalin püskürtme işlemi sırasında çok az oksidasyonla veya hiç oksidasyon olmadan atmosferik ortamda soğuk sprey ile biriktirilebileceği doğru olsa da titanyum gibi yüksek düzeyde reaktif bazı metaller, nispeten düşük sıcaklıklarda bile atmosferik oksijenle reaksiyona girebilmektedir (Smith, 2007).

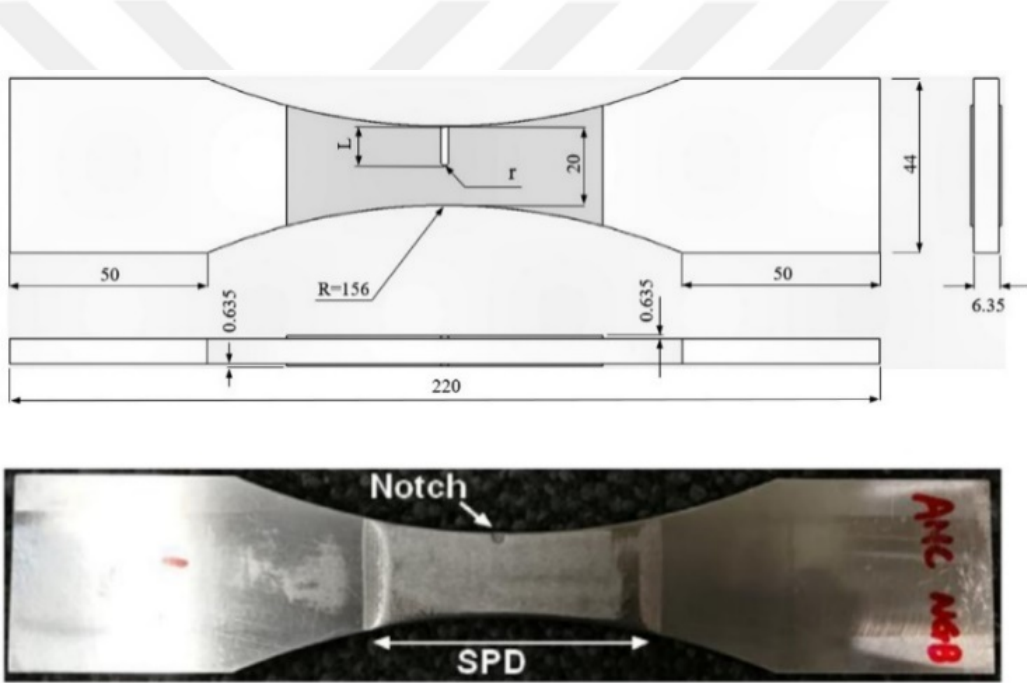
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yapısal metal bileşenler, havacılık ve otomotivden altyapı ve savunma sanayine kadar çok çeşitli endüstrilerde hayati bir rol oynamaktadır. Kullanım sırasında bu bileşenler önemli ölçüde aşınma, termal yorgunluk, erozyon, korozyon veya kimyasal reaksiyonlarla karşılaşabilir ve bu da önemli yüzey hatta hacimsel hasarlara neden olabilir. Bu bileşenlerin değiştirilmesi genellikle ekonomik açıdan avantajlı değildir. Yapısal onarım uygulamaları iyi bir mekanik performans sağlarken orijinal geometriyi eski haline getirmeyi amaçlar. Katkı yeteneklerine ve bağlama mekanizmalarına bağlı olarak, yapısal onarım teknolojileri dört kategoriye ayrılabilir: katkı maddesi olmayan, ergimeyen; katkı maddesi olmayan, ergime esaslı; katkı maddeli, ergimeyen; katkılı, ergime esaslı. Ergitme esaslı yaklaşımlar çeşitli onarım geometrilerine iyi bir hassasiyetle uygulanabilse de, temeldeki ergime ve katılma süreçleri kaçınılmaz olarak katılma gözenekliliği, yüksek artık gerilmeler, dentritik mikro yapı oluşumu, elementel ayrışma, ısı gerilme çatlaması ve gerilmeli korozyon çatlağı gibi mekanik performansı etkileyen önemli sorunlara yol açar. Bu sorunları temelden çözmek veya en aza indirmek ve metalürjik bağ oluşumunu kolaylaştırmak için son dönemlerde katı hal teknolojileri oldukça önem kazanmıştır. Sağlam geometri restorasyonu için, sürekli malzeme besleme ve hassas biriktirme yolu kontrolü için bir katkı özelliğinin dâhil edilmesi gerekir. Şu anda soğuk gaz dinamik sprej teknolojisi biriktirme gereksinimini karşılamaktadır (Gottwald vd., 2021). SGDS teknolojisinde son yıllarda onarım, restorasyon ve geri kazanım uygulamalarıyla önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Tüm bu teknik gelişmelerin yanında çevreci bir yöntem olan SGDS teknolojisi “yeşil teknik ve yöntemler” sınıfına girmektedir. Bu yöntem ürünün tüm üretim süreci boyunca hammadde ve enerji tüketimi konusunda tasarruf sağlamaktadır. Hasarlı parçanın değişimi sırasında ortaya çıkan bütçe kısıtlaması, gecikme süresi, stok sıkıntısı gibi sorunları ortadan kaldırmaktadır (Raoelison vd., 2017).

Bu bölümde, çalışma şartlarında yapılarında aşınma, korozyon, çatlak gibi hasarlar meydana gelen metal esaslı çeşitli endüstriyel parçaların soğuk gaz dinamik sprej teknoloji kullanılarak onarımı ve geri kazanımı üzerine yapılmış çalışmalar özetlenmiştir. Yapılan

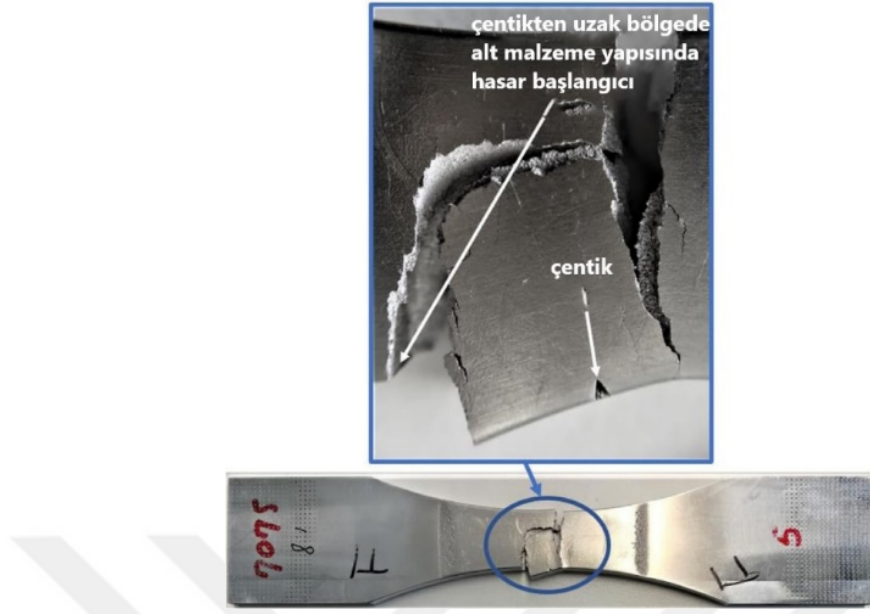
çalışmalarda onarılan numunelerin genel olarak tribolojik, mekanik, fiziksel ve mikro yapısal özellikleri incelenerek karşılaştırılmıştır.

Peng vd. (2021), 7075-T7351 malzemesinden bir alt tabaka üzerinde biriktirilmiş 7075 soğuk spreycaplamalarda oluşturulan çentiklerin hasar toleransını ve kaplama dayanımını incelemiştir. Çevrimli yorulma testleri için 6,35 mm kalınlığındaki test numunesi Al 7075 malzemesinden hazırlanmıştır (Şekil 3.1). Altlık üzerine Al 7075 soğuk spreycaplamaları püskürtülmüş ve 0,635 mm kalınlığında kaplama oluşturulmuştur. Biriktirme öncesi biriktirme verimi artırmak amacıyla numune üzerine Al_2O_3 tozları ile kumlama işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.1. Yorulma test numunesi (Peng vd., 2021).

Yorulma testi 35 kN maksimum yükte ve $R = 0,1$ çevrim oranında ($R: p_{min}/p_{maks}$) gerçekleştirilmiştir. Kaplama üzerinde $L = 0,5$ mm uzunluğunda bir çentik kaplama uygulamasından sonra oluşturulmuştur. Bu deney şartlarında 7075-T7351’de SGDS kaplamasındaki çentikten uzakta başlayan bir çatlak nedeniyle yaklaşık 59700 döngüde hasar meydana gelmiştir (Şekil 3.2).

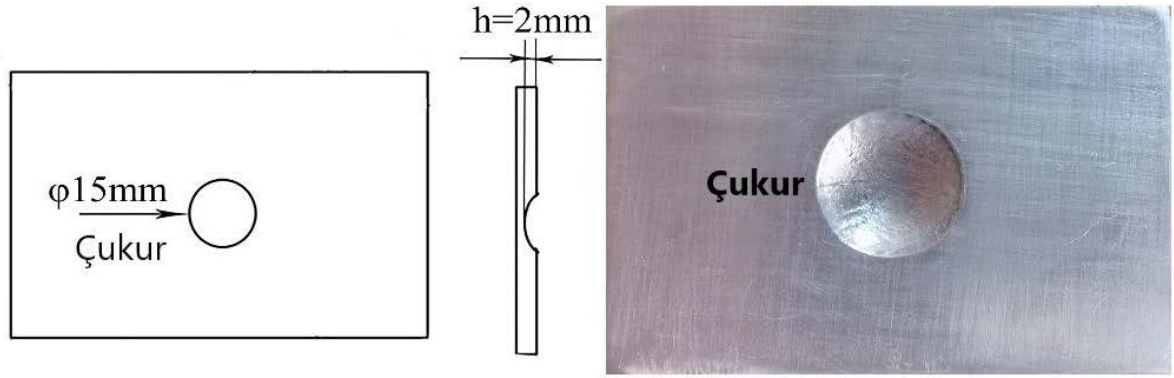


Şekil 3.2. 35 kN ve $R = 0,1$ 'de test edilen Al 7075 SGDS kaplamalı numunede meydana gelen hasar (Peng vd., 2021).

Elde edilen sonuçlara göre yorulma deneylerinde kaplamanın hasar meydana getiren başlangıç çatlağını oluşturmadığını ve hasara dayanıklı olduğunu ortaya koymuştur. Bunun nedeninin kaplamanın alt malzemeye tam anlamıyla bağlanması olduğu düşünülmektedir. Malzeme üzerindeki yükün çentik yolundan farklı olarak alternatif bir yol izlemesi gerilme yığılmasını azalttığı sonucuna varılmıştır. Isıl işlem görmemiş onarımlar için, hasarın kaplamadaki çentikte çatlak çekirdeklenmesi ile ilişkili olmadığı gösterilmiştir. Bu nedenle, kaplamanın 7075-T7351 alüminyum alaşımlı alt tabakadan daha fazla hasara toleranslı olduğu ve soğuk spreyle tamir edilen numunelerdeki hasarın genellikle alt tabakadaki çoklu küçük çatlakların çekirdeklenmesinin bir sonucu olduğu gösterilmiştir. Sonuç olarak SGDS ile alüminyum 7075 alaşımlarının onarımı güçlü bir alternatiftir (Peng vd., 2021).

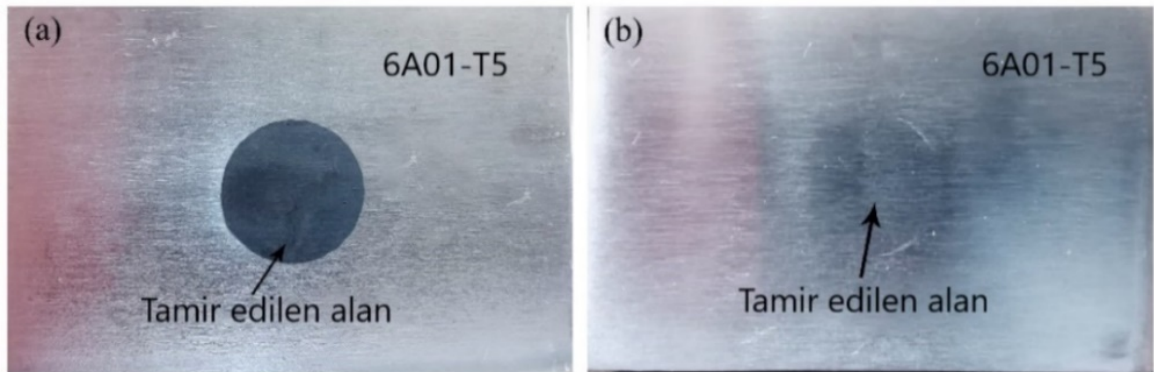
Yüksek hızlı trenlerde kullanılan alüminyum alaşımları karmaşık korozyon ortamlara maruz kalabilmekte dolayısıyla korozyon tehlikesiyle karşı karşıya kalabilmektedir. Bu olumsuz etki trenlerin güvenlik ve denge özelliklerini önemli derecede azaltır. Zhang vd. (2021), bu problemi ortadan kaldırabilmek için alüminyum alaşımlarını alüminyum esaslı toz parçacıklar kullanarak SGDS yöntemiyle tamir etmişlerdir. İşlemden sonra tamir edilmiş parçaların mikroyapı, mekanik özellik ve korozyon davranışları incelenmiştir. Yüksek hızlı trenlerde ve otomobil gövdelerinde sıkça tercih edilen 6A01-T5 metal alaşımı testlerde

kullanılmıştır. Al (%74)-Al₂O₃ (%26) toz karışımı biriktirme tozu olarak kullanılmıştır. Saf alüminyum tozları küresel, Al₂O₃ tozları ise düzensiz forma sahiptir. Düşük yoğunluğu ve parçacıklar arası yüksek sürtünme nedeniyle Al tozları düşük akıcılığa sahiptir. Al₂O₃ tozları ilavesiyle akıcılık iyileştirilmiştir. Korozyon hasarına benzetmek amacıyla alüminyum yüzey üzerinde 2 mm derinlikte bir çukur oluşturulmuştur (Şekil 3.3). Taşlama işlemi ile yüzey üzerindeki oksit filmleri temizlenmiştir.



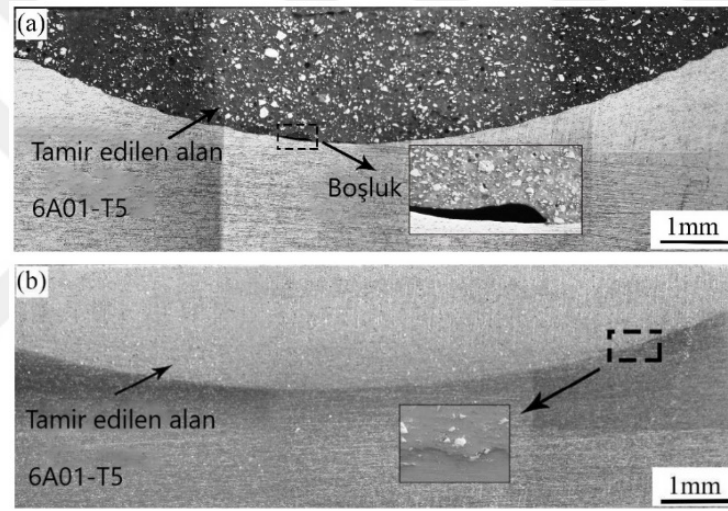
Şekil 3.3. Alüminyum plaka üzerinde oluşturulan çukur (Zhang vd., 2021).

Numunelerden bir tanesi LOCTITE 3478 ferro-silikon dolgulu epoksi reçine ile doldurularak tamir edilmiştir. Diğer numune düşük basıncı soğuk sprey sistemi kullanılarak Al-Al₂O₃ tozları ile tamir edilmiştir (Şekil 3.4). Yüzey üzerindeki fazla birikim başlangıçtaki düz yüzey şartlarına getirilmiştir (Zhang vd., 2021).



Şekil 3.4. Tamir edilen numuneler: (a) LOCTITE 3478, (b) SGDS (Al-Al₂O₃) (Zhang vd., 2021).

Tamir edilen bölgelerin mikro yapıları incelendiğinde ferro-silikon dolgulu reçine ile tamir edilmiş bölgede birikim hattının yumuşak geçişli olduğu görülse de önemli boşlukların olduğu tespit edilmiştir. Bu durum bağlanma dayanımının çok iyi olmadığını göstermektedir. Ayrıca yapı içerisinde bazı gözeneklerin ve çatlakların olduğu görülmektedir. Soğuk sprey yöntemi ile tamir edilen bölge incelendiğinde kaplama altlık ara yüzeyinde sert Al_2O_3 toz parçacıkları nedeniyle düzensiz girintili çıkıntılı bir geçiş olduğu görülmektedir. Bu da daha iyi bir mekanik bağlanma dayanımı elde edilmesini sağlamıştır. Al_2O_3 parçacıkları Al matris içerisinde gömülü bir yapı oluşturmuştur (Şekil 3.5). (Zhang vd., 2021).

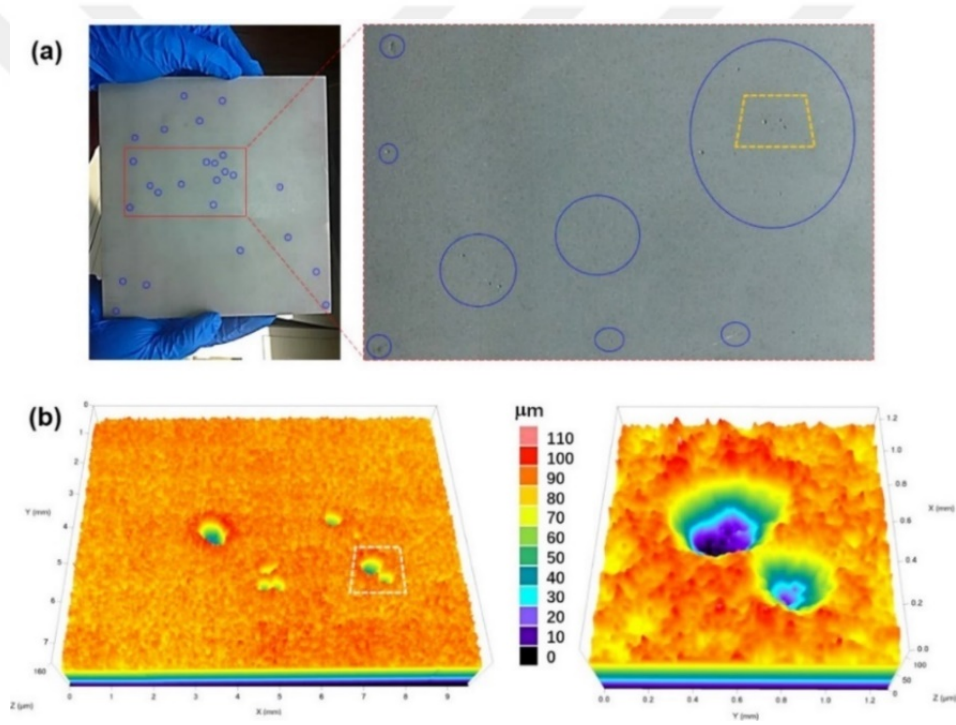


Şekil 3.5. Tamir edilen numunelerin kesit SEM görüntüsü: (a) LOCTITE 3478, (b) SGDS ($Al-Al_2O_3$) (Zhang vd., 2021).

Yüzey ve kesit görüntüleri üzerinden alınan ölçümlere göre SGDS ile doldurulan alanların gözenek seviyesi diğer yöntemlere göre oldukça düşüktür. SGDS ile tamir edilen bölgenin ortalama sertlik değeri $54,5 \pm 3,4$ vikers sertliğinde bulunmuştur. Bu değer altlık malzeme sertliğinin altında kalsa da kullanılan toz parçacıklara daha fazla Al_2O_3 ilavesiyle daha yüksek sertliklere ulaşılabilir. LOCTITE 3478 ile tamir edilen bölgenin sertliği alt malzemeden yüksek olsa da tüm performans kriterleri göz önünde bulundurulduğunda olumlu etki olmayacaktır. Bağlanma dayanımları karşılaştırıldığında SGDS bölgenin 35,6 MPa, diğer yöntemin 31,7 MPa olduğu görülmüştür. Mekanik testler sonucunda elde edilen çekme dayanımı ise SGDS yönteminde daha yüksek olup 160,4 MPa, LOCTITE 3478 numunesinde 138,2 MPa bulunmuştur. Alt malzemenin çekme dayanımı ise 284,6 MPa'dır.

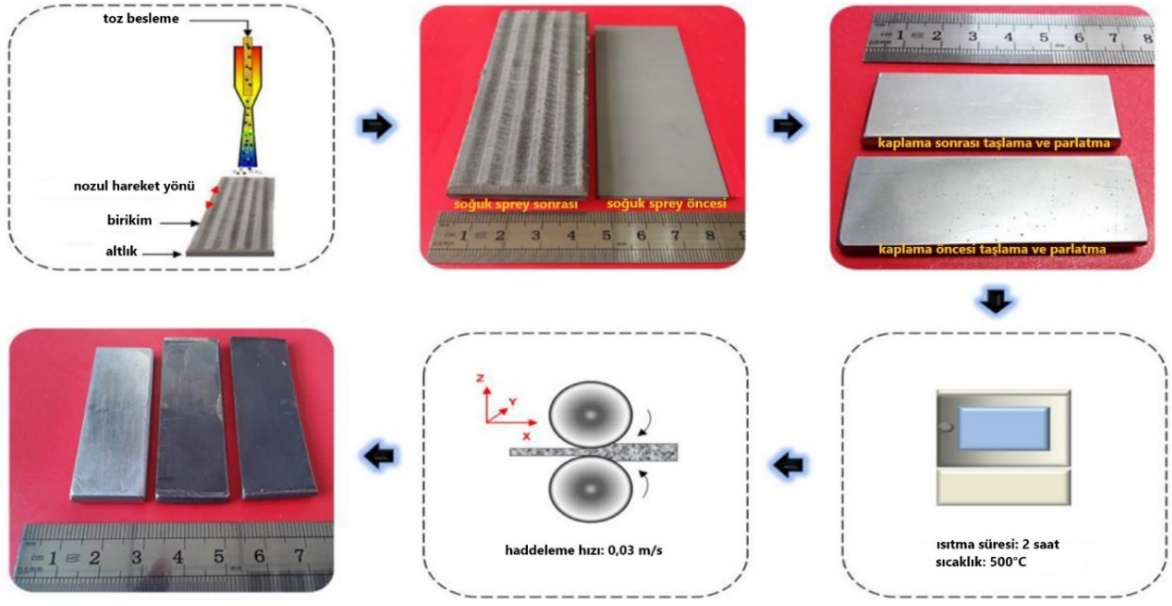
Son olarak korozyon testlerinde soğuk püskürtme ile tamir edilen numunelerin kütle kaybı oranı, 6A01 alüminyum alaşımından daha düşüktü. Tüm sonuçlar incelendiğinde yüksek hızlı trenlerin alüminyum alaşımli bileşenlerinin onarımı için soğuk püskürtme işleminde Al esaslı tozlar uygulanabilir (Zhang vd., 2021).

Qiu vd. (2022), hasarlı nötron koruyucu B₄C/6061 Al kompozit plakaları soğuk gaz dinamik sprej yöntemiyle onarımını gerçekleştirmişlerdir. Son aşamada sıcak haddeleme işlemi uygulanmıştır. Şekil 3.6 B₄C/6061 Al kompozit plaka üzerinde üretimden sonra meydana gelen hataları ve boşlukları göstermektedir.



Şekil 3.6. (a) B₄C/6061 Al kompozit plaka üzerindeki hata ve boşluklar, (b) hata ve boşlukların lazer büyütmeli görüntüsü (Qiu vd., 2022).

B₄C/6061 Al toz parçacıkları, 300 °C ve 3 MPa basınçlı hava kullanılarak 3 mm kalınlığında kaplama olarak uygulanmıştır. Fazla kaplama elektro-erozyon işleme yöntemi ile yüzeyden uzaklaştırılmıştır. Haddeleme öncesi numuneler 500 °C sıcaklıkta 2 saat fırında bekletilmiştir. Haddeleme işlemi, 0,03 mm/s haddeleme hızında ve her geçişte %10'luk bir kalınlık azalması elde edilecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Haddeleme sonucunda %10 ve %20'lik kalınlık azaltılmış iki numune elde edilmiştir. Şekil 3.7 sırasıyla soğuk sprej tamir ve haddeleme adımlarını göstermektedir (Qiu vd., 2022).

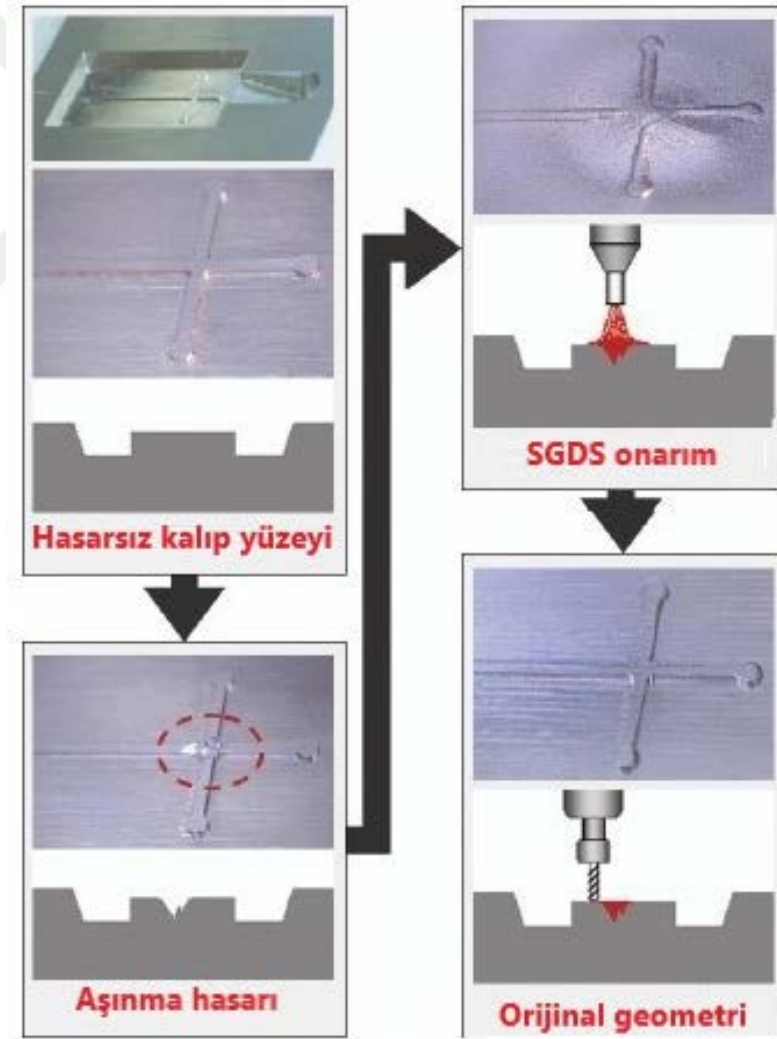


Şekil 3.7. Soğuk spray tamir adımları ve sıcak haddeleme (Qiu vd., 2022).

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve elektron geri saçılım kırınımı (EBSD) sonuçları, kaplama-alt tabaka ara yüzeyinde mikro çatlaklar olmadan iyi bir bağlanma gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Soğuk spray sonrası sıcak haddeleme işlemi, matris içinde B_4C partiküllerinin daha düzgün dağılımı ve püskürtülen tozların gelişmiş mikroyapısı ile sonuçlanmıştır. Ayrıca, geliştirilmiş sıçrama deformasyonu ve sürekli dinamik yeniden kristalleşme nedeniyle matriste iyi bağlanmış sınırlar ve gerinimsiz Al taneleri gelişmiştir. Üç noktalı bükme testi sonuçları, onarılan malzemenin mukavemetinin temel olarak hizmet içi plakaların seviyesine ulaştığını ortaya koydu, bu da servis dışı $B_4C/6061$ Al kompozit plakaların soğuk püskürtme ve ardından sıcak haddeleme stratejisi ile onarılmasının çok uygun olduğunu göstermektedir. Ancak yine de plastisite özelliğinin geliştirilmesi için çeşitli çalışmalar yapılması gerekliliği ortaya konmuştur (Qiu vd., 2022).

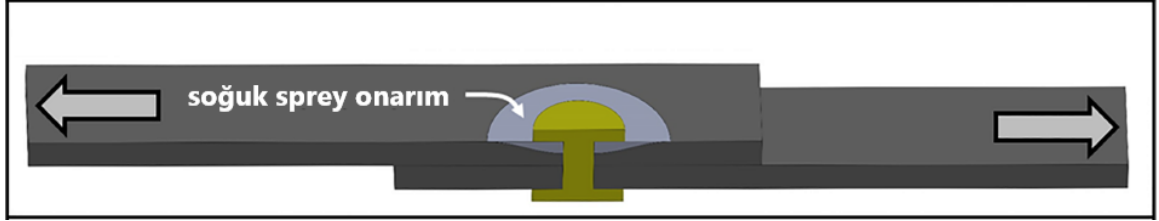
Lee vd. (2007), mekanik ve termal gerilmeler sonucunda aşınmaya maruz kalan 6061-T6 alüminyum alaşımından üretilmiş enjeksiyon kalıp yüzeylerine soğuk gaz dinamik spray onarım işlemini uygulamışlardır. Yöntemin uygulanabilmesi amacıyla yüzey üzerinde talaşlı işlem ile aşınma hasarına benzer malzeme kaldırma işlemi uygulanmıştır. Saf alüminyum toz parçacıkları kullanılarak soğuk spray yöntemi ile hasar görmüş bölge onarılmıştır. Orijinal işleme adımları tekrar uygulanarak kalıp kendi ölçü ve geometrisine getirilmiştir (Şekil 3.8). Onarım işleminden sonra kalıbın sertlik, aşınma direnci,

işlenebilirlik, termal genleşme özellikleri incelenmiştir. Onarılmış bölgenin işlenebilirlik testlerinde kesme kuvveti değerleri alt malzemeye çok benzer sonuçlar vermiştir. Aşınma direnci ise daha yüksek çıkmıştır. Bu özellik kalıbın kullanım ömrünü uzatabileceğinden oldukça önemlidir. Biriktirilen bölgenin sertliği yüksek plastik deformasyon neticesinde saf alüminyuma göre daha yüksek çıkmıştır. Termal genleşme katsayısı ise saf alüminyuma göre %24 daha yüksek çıkmıştır. Onarımdan sonra kalıptan üretilen plastik enjeksiyon ürünlerinde çok az boyutsal hatalar olsa da bu hataların kalıbın işlenmesinde daha hassas işlem adımlarının uygulanmasıyla giderilebileceği düşünülmektedir. Elde edilen deneysel sonuçlar alüminyum alaşımından üretilmiş enjeksiyon kalıpların onarımında soğuk sprey yönteminin önemli bir potansiyeli olduğunu ortaya koymaktadır.



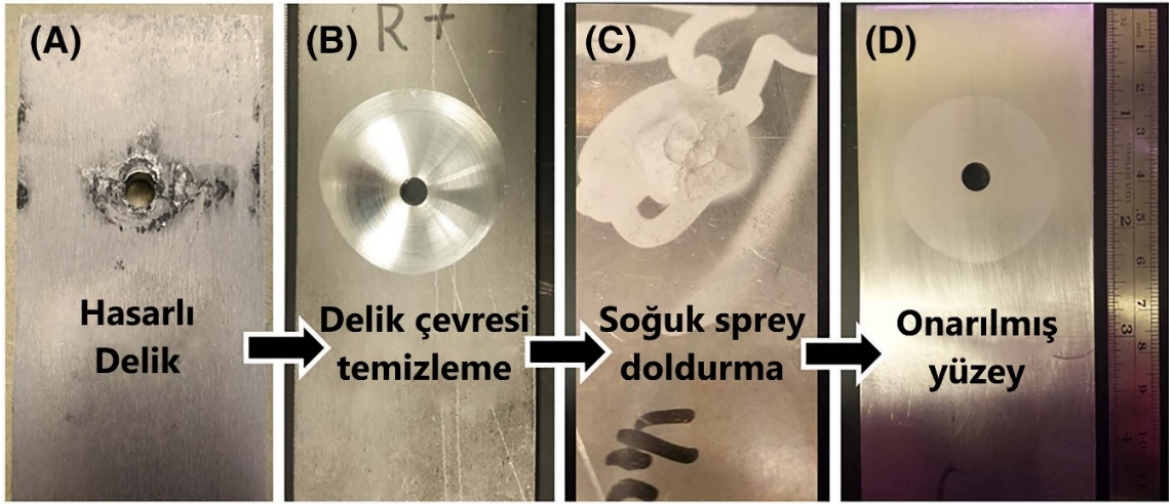
Şekil 3.8. SGDS onarım adımları (Lee vd., 2007).

White vd. (2020), bindirme bağlantı deliklerinde zamanla meydana gelen hasarların SGDS yöntemi ile onarımını araştırmışlar ve tamir edilen bölgenin yorulma performansını incelemişlerdir. Şekil 3.9 bir bindirme bağlantı oryantasyonunu ve soğuk sprej onarım bölgesini göstermektedir.



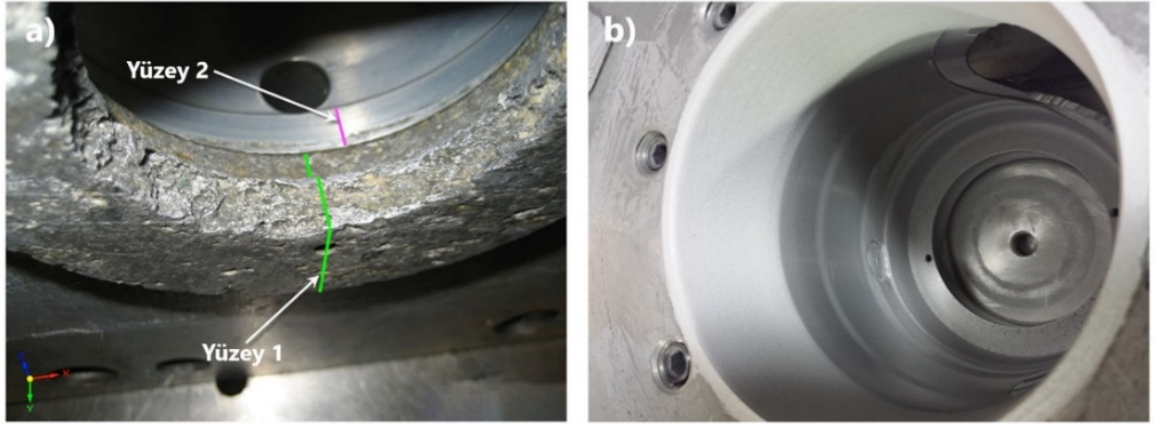
Şekil 3.9. Hasarlı bindirme bağlantı deliğinin onarım sonrası şematik gösterimi (White vd., 2020).

Bağlantı deliklerinin bulunduğu plakalar sertliği yüksek AA7075-T651 ve AA2024-T351 alüminyum dövme alaşımlardır. 6,35 mm kalınlığa sahip plakaların üzerinde yer alan deliklerin çapı 6,35 mm'dir. Soğuk sprej besleme stoğu olarak olarak AA7075-325 ve AA2024-325 toz parçacıkları kullanılmıştır. Hasar görmüş delik çevresi talaşlı işlem ile temizlenerek dairesel bir havuz oluşturularak soğuk sprej birikim oluşumu için uygun bir geometri elde edilmiştir. Onarım uygulaması sonrası biriken fazla malzeme yüzeyden uzaklaştırılmıştır. Onarım adımları Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Deneysel çalışmalar neticesinde soğuk sprej tamir yönteminin ana malzemeye zararlı bir etkisinin olmadığı, mikrosertlik testleri sonucunda alt malzeme sertliğinde herhangi bir azalma meydana gelmemiştir. Soğuk sprej onarımlarının, en azından epoksi dolgulu onarımlar kadar ve bazı durumlarda önemli ölçüde daha uzun yorulma ömürlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Kırılma yüzeyi analizleri sonucunda az miktarda ara yüzey çatlakları gözlenmiş olsa da kaplamanın ana malzemeden ayrılmasını engelleyecek yeterli bağlanma dayanımının var olduğu tespit edilmiştir. Onarılmış AA2024 alüminyum plakanın bindirme bağlantılarda kesme bölgesinde AA7075 plakadan daha iyi özellik gösterdiği görülmüştür. Bu sonuç daha düşük mukavemetin bağlantı deliğinde gerilme konsantrasyonunu düşürmesi ile açıklanmıştır (White vd., 2020).



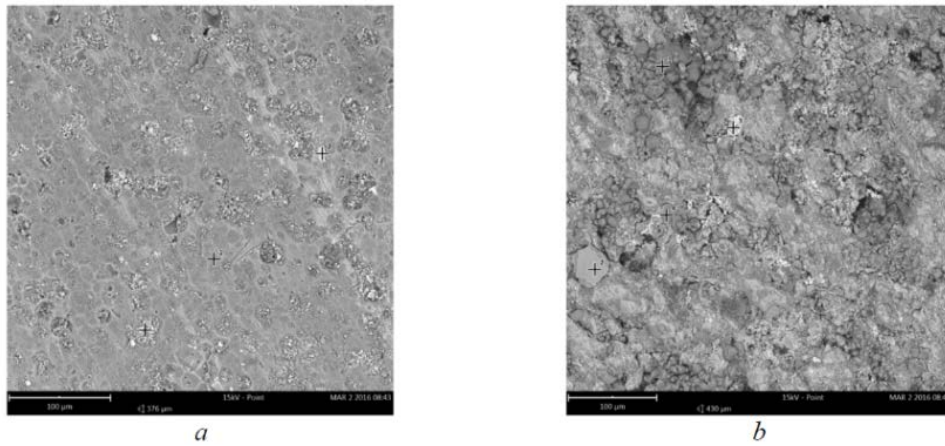
Şekil 3.10. Hasarlı bağlantı deliklerin soğuk spray onarım adımları (White vd., 2020).

Askeri donanma gemilerinde kullanılan hidrolik valf tahrik sisteminin alüminyum gövdesi üzerinde yer alan sızdırmazlık deliklerinde zamanla çalışma koşulları nedeniyle korozyon ve aşınma hasarları meydana gelebilmektedir (Şekil 3.11-a). Widener vd. (2016), 6061 alüminyum alaşımı gövde üzerinde yer alan hasarlı deliklerin soğuk gaz dinamik spray yöntemi ile onarımını araştırmışlardır. 100 mm çapa ve 200 mm derinliğe sahip bu delikler Al6061 toz parçacıkları SGDS sistemi kullanılarak hasarlı delik yüzeyleri üzerinde biriktirilmiştir. İç deliklerin küçük olması nedeniyle 65mm uzunluğa sahip 45° açılı küçük bir nozul soğuk spray işleminde kullanılmıştır. Nozul boyunun kısalması nedeniyle daha az gaz-parçacık etkileşimi olacağı için nozul çıkışında parçacık hızları düşeceğinden daha yüksek hızlar elde etmek amacıyla helyum yüksek özgül ısı oranı ve daha yüksek özgül gaz sabiti özellikleri sebebiyle taşıyıcı gaz olarak seçilmiştir. Pulcuk aşınması ve çukur korozyonu neticesinde ortaya çıkan hasarlar bu yöntem ile başarılı bir şekilde uygulanmıştır (Şekil 3.11-b). Onarılan yüzeylerde beklenen minimum bağlanma mukavemeti 68,9 MPa iken testler sonucu elde edilen değer 200 MPa değerinin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Ortalama sertlik değeri ise $87 \pm 3,3$ vickers sertliği olarak bulunmuştur. Soğuk spray onarım yöntemi sonrası elde edilen sonuçlar benzer hasara uğrayan alüminyum alaşımı yapıların daha önemli ve zorlu uygulamalar için büyük bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 3.11. Valf tahrik sistemi delikleri: (a) hasara uğramış delik yüzeyleri, (b) hasar sonrası soğuk spreyle onarılmış yüzeyler (Widener vd., 2016).

Shikalov vd. (2017), ağır atmosferik koşullar altında çalışan havacılık malzemelerinin korozyon hasara uğrayan bölgelerinin soğuk spreyle onarımını araştırmışlardır. Hasar bölgeleri malzemenin mukavemetini olumsuz yönde etkiler. Bu sebepten dolayı hasarlı parçanın değiştirilmesi veya onarılması gerekir. Yapılan çalışmada 1163RDTV alüminyum alaşımlı plakalar kullanılmıştır. $105 \times 25 \times 2 \text{ mm}^3$ boyutlarındaki alüminyum plaka üzerinde kalınlığının %20'sine eşit kalınlıkta korozyon aşınması meydana gelen yüzey küresel alüminyum ASD-1 toz parçacıkları kullanılarak onarılmıştır. Şekil 3.12 korozyon öncesi ve sonrası mikroyapı görüntüsünü vermektedir.



Şekil 3.12. Plakanın mikroyapı görüntüsü: (a) korozyon öncesi, (b) korozyon sonrası (Shikalov vd., 2017).

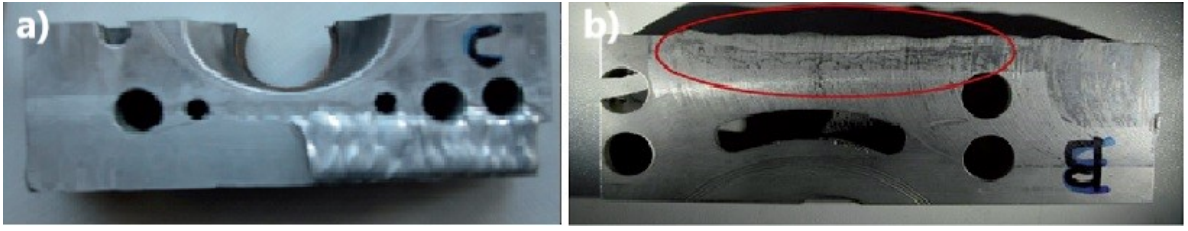
400 μm derinlikte korozyon hasara sahip yüzey soğuk spreyle onarılıp orijinal plaka kalınlığının 300 μm üzerinde bir birikim elde edilmiştir (Şekil 3.13). Onarılan

bölgenin optik mikroyapı incelemeleri sırasında alınan ölçümler sonucunda gözenek seviyesinin %1'in altında olduğu bulunmuştur. Kaplamanın ve alt malzemenin ortalama mikrosertlik değerleri sırasıyla 61,3 ve 144,6 HV_{0,1} olarak bulunmuştur. Onarılmış bölgeden alınan numuneler ile gerçekleştirilen mekanik testlerde en iyi özelliğin gerilme-birim şekil değiştirme diyagramında elastik bölgede olduğu görülmüştür. Onarılmış bölgenin elastik bölgesindeki eğrileri neredeyse hasarsız numuneler ile birebir aynı çıkmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışma soğuk gaz-dinamik püskürtme ile elde edilen fonksiyonel kaplamaların, alüminyum alaşımlarından yapılmış uçak yapı elemanlarının hizmet sırasında korozif hasara karşı korunması ve onarımı için uygulama olasılığının gelecekteki potansiyel uygulamalarına önemli bir referans olmakla birlikte yöntemin uygulanabilirliğinin bilimsel ve teknik olarak geliştirilmesi için farklı araştırmalar yürütülmektedir (Shikalov vd., 2017).



Şekil 3.13. Korozyon aşınmasının soğuk spreyle onarımı (Shikalov vd., 2017).

Astarita vd (2016), A380 alüminyum alaşımından basınçlı döküm yöntemiyle üretilmiş ticari bir motor bloğunun yapısında meydana gelen hasarları soğuk gaz dinamik spreyle onarım yöntemi ile onarıp TIG kaynağı ile gerçekleştirilen standart onarım prosedürü ile karşılaştırmışlardır. Şekil 3.14'de deneysel çalışmalarda kullanılan motor bloğu gösterilmiştir. Deneysel çalışmalar için motor bloğu yüzeyinde talaşlı yöntem ile yapay hasar oluşturulmuştur. Hasarlı bölgeden alınan iki benzer numuneden biri AA4047 ilave metali kullanılarak TIG kaynak yöntemi ile diğeri ise Al-%12Si toz parçacıkları kullanılarak SGDS yöntemi ile onarılmıştır. Kullanılan ilave metallerin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de verilmiştir. Kaynak yönteminde ve soğuk spreyle yönteminde kullanılan ilave metal ve toz parçacıklarının benzer içeriğe sahip oldukları görülmektedir.



Şekil 3.14. Tamir işlemi sonrası numuneler: (a) TIG tamir yöntemi, (b) SGDS tamir yöntemi (Astarita vd., 2016).

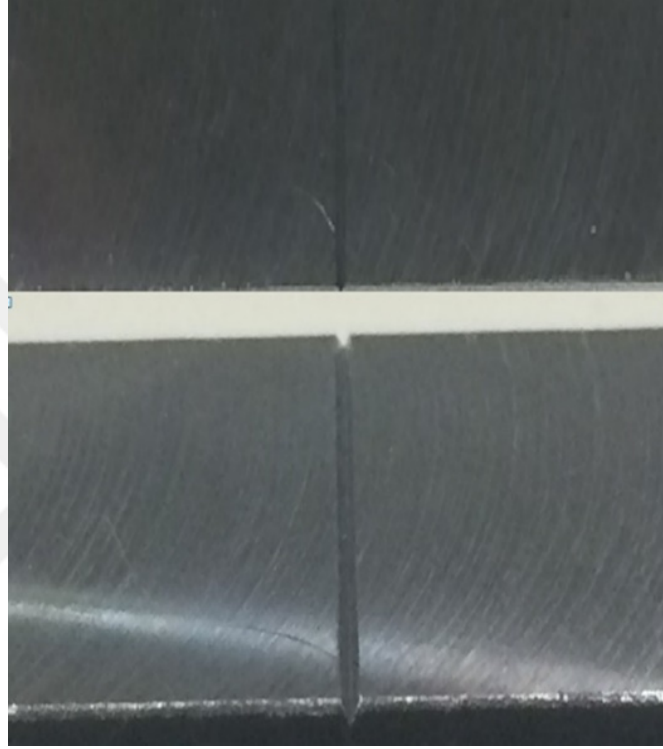
Çizelge 3.1. Kullanılan alaşımların kimyasal bileşimi (%) (Astarita vd., 2016).

	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Ni	Zn	Sn	Diğer	Al
A380	7,8	1,5	3,2	0,1	0,5	0,5	3	0,2	0,4	Kal.
AA4047	12	0,5	0,3	0,1	0,1	-	-	-	0,03	Kal.
Al-%12 Si	12	0,3	0,1	0,1	-	-	-	-	-	Kal.

Deneyisel sonuçlar göre SGDS ile onarılan bölgelerde motor bloğu ana malzemenin mikroyapısında herhangi bir değişim meydana gelmemiştir. SEM analizleri yeni oluşan soğuk sprej tamir bölgesinin kompakt ve gözeneksiz bir yapıda olduğu tespit edilmiştir. Sertlik değeri ana malzeme sertliğine yakın çıkmıştır. Korozyon direnci motor bloğu malzemesine ve kaynakla tamir edilen bölgeye göre daha düşük çıksa da daldırma testlerinde kaynaklı onarıma göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Kaynaklı tamir yönteminin alt malzeme mikroyapısında ve dolayısıyla mekanik özelliklerinde değişime sebep olması, kalıntı gerilme oluşturması nedeniyle alüminyum motor bloğunun SGDS yöntemiyle onarımı önemli bir avantaj sağlamıştır (Astarita vd., 2016).

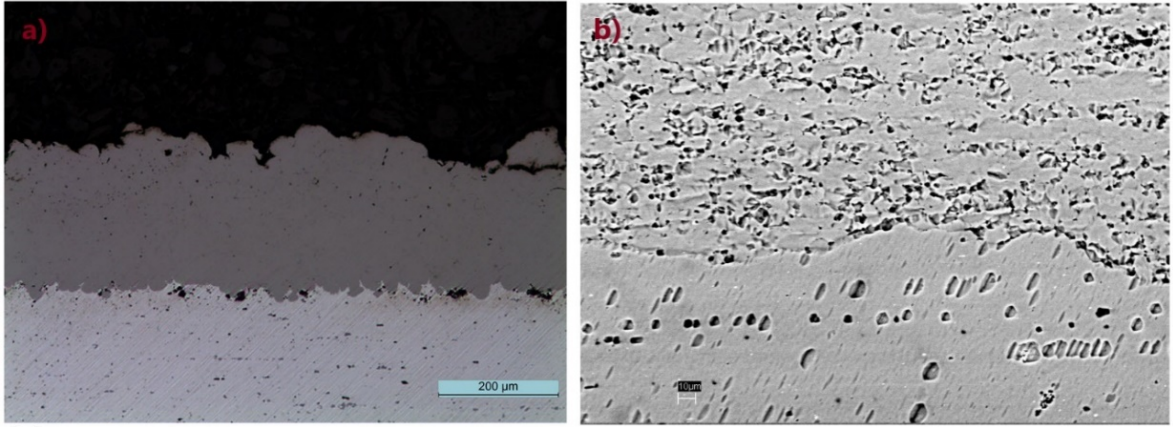
Cavaliere ve Silvello (2017), havacılık uygulamalarında iyi hasar toleransı, yüksek sertlik, düşük yoğunluk, mükemmel korozyon dayanımı ve kaynak edilebilirlik özellikleri nedeniyle oldukça sık kullanılan 2099 alüminyum alaşımlarının SGDS yöntemiyle onarımını araştırmışlardır. Yüzeyinde 30° çentik hasarı bulunan 2099 alüminyum levha (Şekil 3.15) 5-60 µm arasında değişen partikül boyutuna sahip 2198 ve 7075 alüminyum toz parçacıklarının soğuk püskürtülmesi ile onarılmıştır. Tungsten karbür nozul, 40 mm uygulama mesafesi seçilerek parçacık biriktirme işlemini gerçekleştirmiştir. 2,5 MPa gaz

basıncı ve 7075 toz parçacıkları için 400 °C, 2198 toz parçacıkları için 450 °C gaz sıcaklığı seçilmiştir. Simülasyon programları yardımıyla akış hızı 800-900 m/s arasında hesaplanmıştır. Bu işlem parametreleri kullanılarak 400 µm kaplama kalınlığı elde edilmiştir.



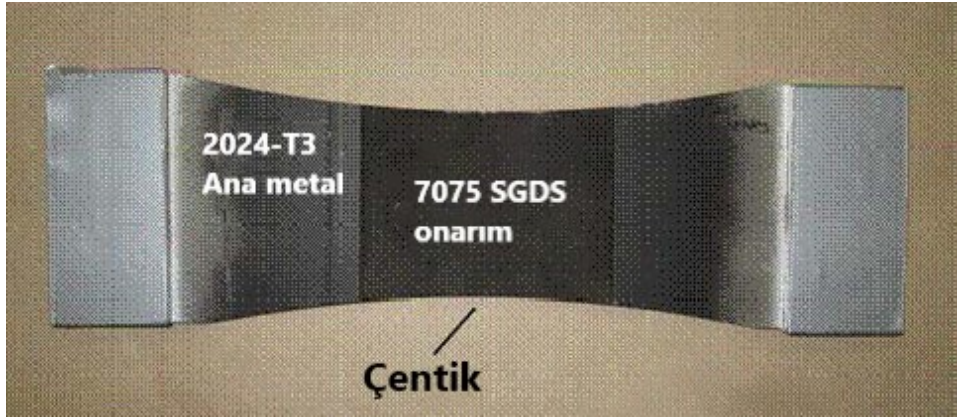
Şekil 3.15. Çentik hasarı oluşturulmuş alüminyum levhalar (Cavaliere ve Silvello, 2017).

Çatlak başlatma ve büyütme testleri tamir edilmiş plakaların optimum işleme parametreleri kullanıldığında 7075 toz parçacıkları için 6 kat, 2198 toz parçacıkları için 7 kat çatlak direncine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Tamir edilmiş plakaların yorulma dayanımı tamir edilen bölgenin mikroyapı kalitesiyle ilişkilidir. Uygun olmayan işlem parametreleri seçildiğinde (350 °C ve 1,5 MPa) düşük bağlanma mukavemeti ve artan kaplama gözenekliliği meydana gelir ve bu durum optimum işlem parametrelerinde elde edilen çatlak direncinde azalmaya neden olur. Şekil 3.16’da optimum işlem parametrelerinde ve uygun olmayan işlem parametrelerinde elde edilen tamir bölgelerinin optik mikroyapı görüntüleri paylaşılmıştır. SGDS tamir uygulaması sonrası gerçekleştirilen simülasyonlar ve mekanik testler, dikkate değer bir K_{IC} faktörü azalmasını ve bunun sonucunda çatlak çekirdeklenmesi ve büyüme hızında bir azalma meydana geldiğini doğrulamıştır (Cavaliere ve Silvello, 2017).



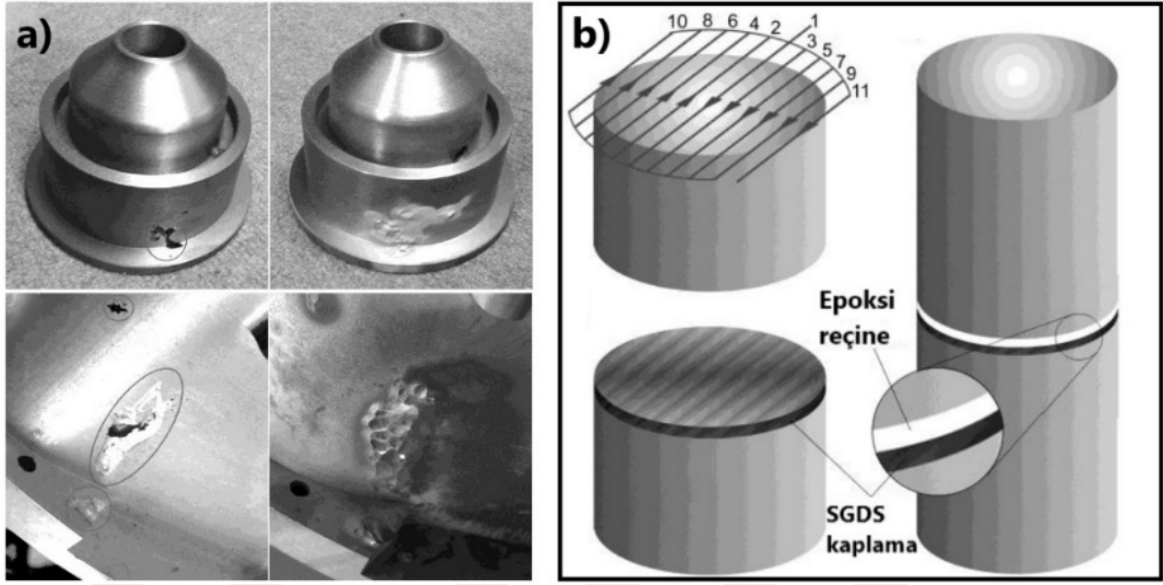
Şekil 3.16. 2198 alüminyum toz parçacıkları ile farklı işlem parametreleri kullanarak onarılan bölgelerin optik mikroyapı görüntüsü: (a) 450 °C-2,5 MPa, (b) 350 °C-1,5 MPa (Cavaliere ve Silvello, 2017).

Jones vd. (2012), uçaklarda kullanılan hasar görmüş ince yapıdaki alüminyum alaşımlarının yapısal bütünlüğünün geri kazandırılması ve uçuş güvenliğinin sağlanması amacıyla SGDS yöntemini kullanmışlardır. Ayrıca onarım uygulamasının yorulma direncine etkisi araştırılmıştır. 2024-T3 alüminyum alaşımından hazırlanmış 1,27 mm kalınlığındaki test numuneleri üzerinde tek kenarlı bir çentik hasarı oluşturulmuştur. Çentiğin bulunduğu yüzey üzerine 7075 alüminyum alaşım toz parçacıkları biriktirilerek 1 mm kalınlığında kaplama oluşturulup onarım işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.17). $\sigma_{maks} = 180 \text{ MPa}$ maksimum gerilme ve $R=0,1$ gerilme oranında sabit genlik yüklemesi altında yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Aynı deney şartlarında gerçekleştirilen ve yaklaşık 13700 çevrimde sonlandırılan yorulma testlerinde onarılmış numunenin çatlak başlangıcı çevrim sayısı ana metalin çatlak başlangıcı çevrim sayısının yaklaşık 6,5 katı olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçla birlikte 2 mm uzunluğundaki kenar çatlağının önünde biriktirilen ince soğuk sprej tabakasının çatlak büyümesini durdurduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar SGDS yönteminin ince alüminyum alaşımlı kanat ve gövde kaplamalarının yapısal bütünlüğünü önemli ölçüde geri kazandırma ve geliştirme potansiyelini ortaya koymaktadır.



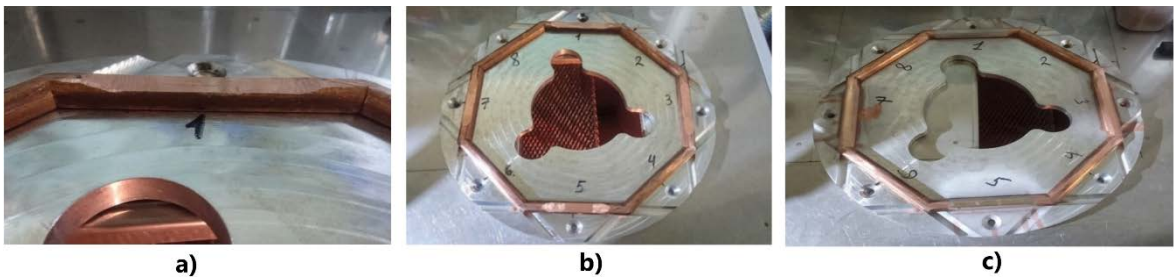
Şekil 3.17. SGDS ile onarılmış yorulma test numunesi (Jones vd., 2012).

Döküm yöntemiyle üretilen parçalarda üretim sırasında hassas kontroller, teknik yöntemler ve kalite standartları olsa da döküm sonrası pek çok yüzey ve yapısal hata meydana gelebilmektedir. Bu hatalar üretim sırasında giderilemiyorsa işlem sonrası giderilmesi gerekir. Piwowarczyk vd. (2014), alüminyum alaşımlarından döküm yöntemiyle üretilen parçaların SGDS yöntemiyle onarımı üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Şekil 3.18 a’da bir döküm hatasının SGDS ile onarım adımları gösterilmiştir. Deneysel çalışmalarda AA1350 ve AA5754 alüminyum alaşımlarından üretilmiş 50 mm yükseklikte 40 mm çapta silindirik numuneler kullanılmıştır. Biriktirme tozu olarak Al_2O_3 seramik partikül katkılı Al, Zn ve Sn toz parçacıkları kullanılmıştır düşük basınçlı SGDS sistemiyle 700 m/s partikül hızına ulaşarak silindirik numuneler üzerine biriktirilmiştir. Taşıyıcı gaz olarak hava kullanılmıştır. Çekme testlerinin yapılabilmesi için biriktirilen yüzey diğer silindirik alüminyum alaşımı ile 70 MPa mukavemete sahip epoksi reçine ile bağlanmıştır (Şekil 3.18 a). Al ve Zn matrisli birikimlerde bağlanma mukavemeti 50 MPa değerinin üzerinde iken Sn matrisli kaplamada ise 34 MPa değerindedir. Bu sonuçlara göre bağlanma mukavemeti üzerindeki en büyük değişim kullanılan toz parçacıklarıyla ilişkilidir. Sn matrisli kaplamalarda daha düşük bağlanma dayanımı düşük kohezif etkileşimlerden kaynaklandığı söylenebilir. Mikroyapı analizleri, uygulanan kaplamaların yüksek yoğunluk, düşük gözeneklilik ve düşük oksidasyon seviyesi sağladığını göstermektedir. Kaplama sertliği yüksek deformasyon sertleşmesi nedeniyle parçacıkların sertliğinden daha yüksek çıkmıştır. En yüksek sertlik 100 HV_{0,2} değerinde Al matrisli kaplamada elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar düşük basınçlı soğuk püskürtme yönteminin, döküm kusurlarının giderilmesi için uygun bir yöntem olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.18. (a) SGDS yöntemi ile döküm kusurlarının onarım örneği, (b) çekme testi numunesi (Piwowarczyk vd., 2014).

Cu-Al₂O₃-Zn toz parçacıkları, farklı birleşim ve oranlarda aşınmış bir bakır temas telini eski haline getirmek için bir bakır altlık üzerine soğuk sprey yöntemi ile püskürtülmüştür. Elde edilen kaplama 1-2,5 mm kalınlığındadır. Kaplama oluşum mekanizmaları mikroyapı incelemeleri ile tartışılmıştır. Tamir edilen yüzeyin bağlanma mukavemeti, elektriksel iletkenlik ve aşınma özellikleri incelenmiştir. Şekil 3.19’da tamir işlem adımları gösterilmiştir (Grigoriev vd., 2021).

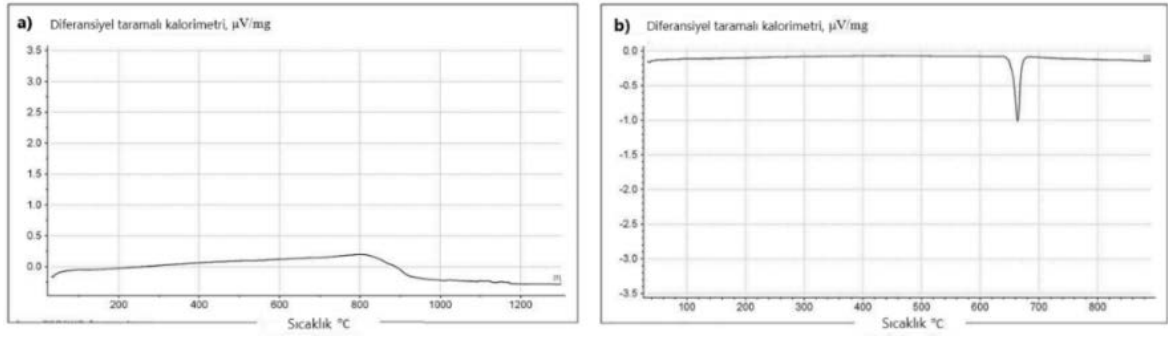


Şekil 3.19. SGDS tamir işlemi: (a) aşınmış temas yüzeyi, (b) 1, 3, 5, 7, numaralı aşınmış yüzeyler, (c) tamir işlemi sonrası elde edilen yüzeyler (Grigoriev vd., 2021).

İri taneli Al₂O₃ toz parçacıkları ile altlık yüzey ön işlemesi ile iyileştirilmiş bağlanma dayanımı elde edilmiştir. Zn içeren toz karışımında tatmin edici bir bağlanma mekanizması altlık ile kaplama ara yüzeyinde Zn bakımından zengin bir tabaka oluştuğunda gözlenmiştir. Zn ile püskürtülen tozlar için, püskürtülen tabakanın alt tabakaya yapışmasının, çinko

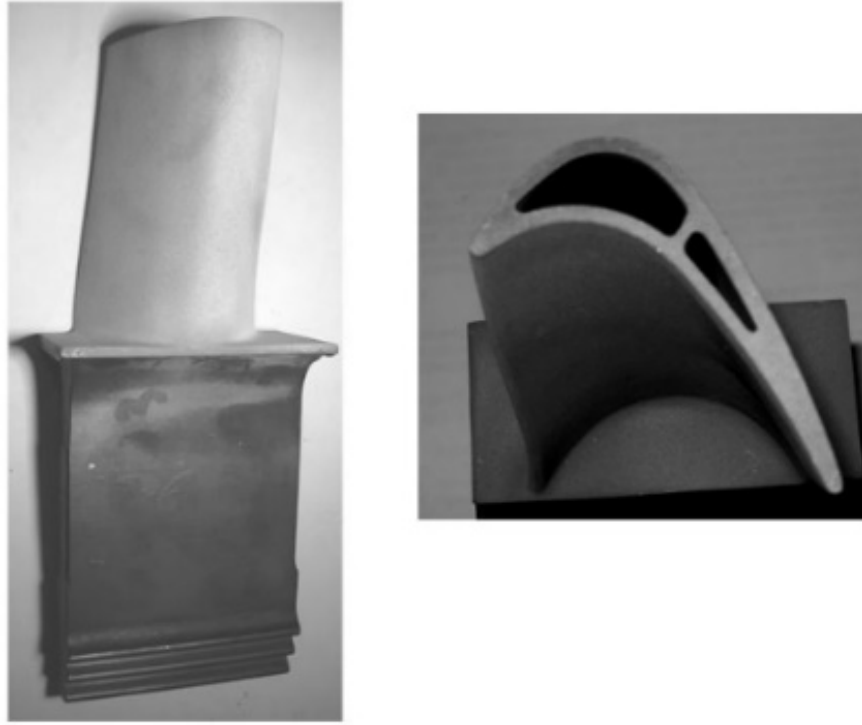
parçacıklarının bakır alt tabakaya yapışmasının bir sonucu olarak meydana gelme olasılığını arttırmaktadır. Püskürtülen bakır partikülleri, altlık yüzeyindeki çinko partiküllerine yapışır. Çinko elementinin akma dayanımı Cu elementine göre daha düşük olduğundan çinko ilaveli toz karışımının yüzeye tutunma olasılığı Zn ilavesiz tozlara göre daha yüksektir. Aşınmış kontak tellerinin soğuk sprej restorasyonu için en iyi hava akışı sıcaklığı, maksimum yapışma ve spesifik elektrik iletkenliği değerleri için 500 °C olarak bulunmuştur. Büyük Al_2O_3 toz parçacıklarının bakır altlık yüzeye püskürtülmesi işlemi, püskürtülen kaplamanın bağlanma mekanizmasını 3–5 kat artırmıştır. Püskürtülen Cu- Al_2O_3 karışımındaki Al_2O_3 içeriği ile bağlanma mukavemeti artmıştır. %40 Cu-60% Al_2O_3 toz bileşiminden elde edilen soğuk sprej kaplama, en yüksek bağlanma mukavemeti ve spesifik elektrik iletkenliğini gösterirken, Cu-50% Al_2O_3 -(5–10)Zn kaplamalar en yüksek aşınma direnci özelliğini göstermiştir. İkinci bileşim, aşınma direncini, besleme hızını ve çalışma süresini dengelemek için aşınmış temas tellerinin soğuk sprej tamiri için önerilebilir (Grigoriev vd., 2021).

Krivina vd. (2020), soğuk gaz dinamik sprej yöntemiyle geliştirilen kaplamaların, gaz türbinli motor kanatlarının iç yüzeylerinin imalatları veya onarımları sırasında yüksek sıcaklıkta gaz fazı korozyonuna karşı koruma performanslarını incelemişlerdir. Kaplama işlemi için Ni (%57)- Al_2O_3 (%43) içeriğine sahip N3-00-02 tozu ve Al (%57)- Al_2O_3 (%43) içeriğine sahip A-20-01 toz parçacıklarını kullanmışlardır. Soğuk sprej sonrası 750 °C’de 4 saat son ısıtma işlemi uygulanmıştır. N3-00-02 toz karışımının yüksek sıcaklık davranışı, Şekil 3.20-a’da gösterilmiştir. 500-800 °C sıcaklık aralığında, nikel oksidasyonu ve ardından NiO oksit oluşumu nedeniyle diferansiyel tarama eğrisinin düzgün büyümesi gözlenir. 500-1000 °C sıcaklık aralığının, NiO tanelerinin sınırları üzerinde Ni iyonlarının yüksek difüzyon hızından dolayı oksit filminin aşırı büyümesi ile karakterize olduğu bilinmektedir. Şekil 3.20 (b)’de gösterilen alüminyum esaslı toz karışımının (A-20-01 toz karışımı) diferansiyel tarama eğrisinde, alüminyumun ergime sıcaklığına karşılık gelen yaklaşık 660 °C’lik bir sıcaklıkta net bir minimum vardır.



Şekil 3.20. Diferansiyel tarama eğrileri: (a) N3-00-02 toz karışımı, (b) A-20-01 toz karışımı (Krivina vd., 2020).

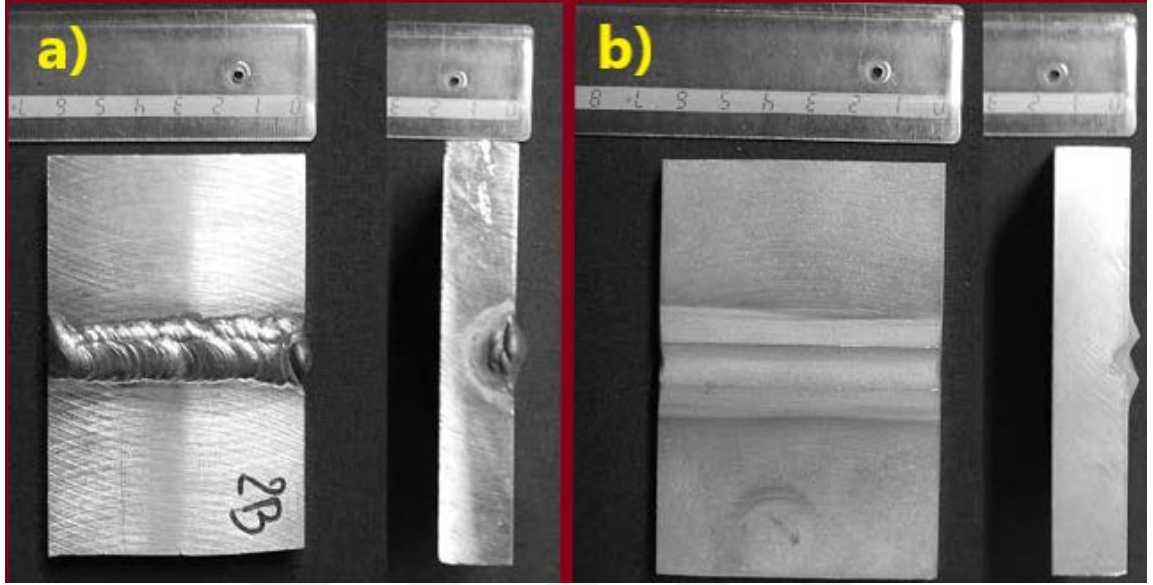
Metaller arası bileşime sahip koruyucu ve yenileyici bir kaplama oluşturmak için Ni-Al sisteminin faz durumlarının bir diyagramı temel alınmıştır. Bu çizelgeye göre, bir nikel matrisinde metaller arası bir β -NiAl fazı oluşturmak için yaklaşık 50/50 nikel ve alüminyum oranı ve 600 ila 800 °C aralığında ısıtma sıcaklığı gereklidir. Bu nedenle kaplama uygulaması için N3-00-02 ve A-20-01'in 50/50 ağırlık oranında toz karışımı hazırlanmıştır. 50/50 oranında karıştırılan N3-00-02 ve A-20-01 tozları soğuk sprej işlemi sonrası 750 °C'de 4 saat bekletildikten sonra yapı içişiindeki ana faz yüzey merkezli kübik kafes yapısına sahip Ni olmuştur. Ayrıca metaller arası β -NiAl fazı ve α -Al₂O₃ fazı yapıda bulunmaktadır. İşlem sonrası kaplamanın mikro girinti bağlanma mukavemeti testleri, alt tabakaya tatmin edici bir bağlanma mukavemeti olduğunu göstermiştir. Kaplama ve alt malzeme ara yüzeyinde çatlak, hata ve şekil deformasyonu tespit edilmemiştir. Uygulanan ısıtma işlemi sonrası yapıda meydana gelen β -NiAl fazı oluşumu neticesinde ortalama sertlik değeri 250 kg/mm² değerinden 415 kg/mm² değerine yükselmiştir. Ayrıca intermetalik faz oluşumu ısı direncini artırarak termal gerilmeye dayalı çatlak oluşumunu azaltmıştır. Bu kaplamalar, gaz türbin motoru bıçaklarının iç boşluklarının yüksek sıcaklıktaki gaz korozyonuna karşı koruma için hem yeni kanatlar için hem de hizmet ömrünü uzatmak için geri kazanım teknolojilerinin bir parçası olarak kullanılabilir. Şekil 3.21 rotor türbin kanadının SGDS yöntemi ile onarılmış son halini göstermektedir (Krivina vd., 2020).



Şekil 3.21. Geri kazanım çalışmalarından sonra gaz kompresörü ünitesi GTK-10I'nin gaz türbini motoru MS 3142'nin yüksek basınçlı türbin rotor kanadı (Krivina vd., 2020).

Faccoli vd. (2014), martenzitik paslanmaz çelik bileşenlerin soğuk gaz dinamik spreyl yönteminin bir onarım tekniği olarak kullanılma olasılığını laboratuvar araştırmaları ile değerlendirmişlerdir. Nikel, bakır veya alüminyum gibi yumuşak metal tozları yerine, hafif alaşım veya dökme demirden yapılmış bileşenlerin onarımında kullanılan östenitik paslanmaz çelik hammadde tozları onarım işlemi için seçilmiştir. Büyük çelik bileşenlerde onarım tekniği olarak yaygın olarak kullanılan TIG kaynağı ve SGDS yöntemi ile elde edilen onarımların mikroyapısını, artık gerilmelerini ve mikro sertliğini doğrudan karşılaştırmışlardır. Tamir işlemi yapılacak malzeme hidroelektrik sektöründeki büyük döküm bileşenleri için yaygın olarak kullanılan bir ASTM A 743 kalite CA6NM döküm martenzitik paslanmaz çeliktir. Kaynak yönteminde alt malzeme ile aynı özellikte martenzitik paslanmaz ilave teli olan Böhler CN 13/4-IG kullanılmıştır. SGDS tamir uygulamasında AISI 316 (östenitik paslanmaz çelik) toz parçacıkları, AISI 410 (martenzitik paslanmaz çelik)'a göre 100m/s daha düşük kritik hız gerektirmesi ve yüksek akış hızlarında östenitik paslanmaz çeliğin daha yüksek kavitasyon direnci nedeniyle seçilmiştir.

TIG ve SGDS yöntemi ile tamir edilen paslanmaz çelik numuneleri Şekil 3.22’de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Paslanmaz çelik tamir uygulamaları: (a) TIG yöntemi, (b) SGDS yöntemi (Faccoli vd., 2014).

Toz biriktirme yönteminde bası kaynaklı kalıntı gerilmeler malzemenin yorulma dayanımını artırarak mekanik özelliğine olumlu etki yapmıştır. Ana metalin metalürjik özelliklerinde herhangi bir değişim meydana gelmemiştir. Soğuk sprey onarımının mikrosertliği kaynaklı onarımda hem yüzeye hem de kesit bölgesine göre daha yüksektir. Bu durum östenitik paslanmaz çelik yüksek tokluğa sahip olduğundan ve tokluk azalmasına uğramadığından herhangi bir soruna yol açmaz. Tüm bu nedenlerle SGDS onarımından sonra malzemenin özelliklerini eski haline getirmek için bir ısıtım işlemi gerekli değildir. Aksine, bir kaynak onarımından sonra, artık gerilmeleri gidermek ve ana malzemenin özelliklerini eski haline getirmek için her zaman kaynak sonrası bir ısıtım işlemi gereklidir. İlave ısıtım işlemi gerekmemesi maliyetleri düşürmeye ve bileşeni yeniden kullanma olasılığını tehlikeye atabilecek bozulma riskini önler. Aynı zamanda ısıtım işleminden kaynaklanan çevre kirliliği de ortadan kalkar (Faccoli vd., 2014).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu yüksek lisans tez çalışmasında Al6061 ve Al7075 alüminyum alaşımı levhaların yüzeylerinde talaşlı işlem ile oluşturulmuş hasarlar, farklı tozlar kullanılarak soğuk gaz dinamik sprej yöntemi ile onarılmıştır. Onarım sonrası levha yüzeyleri ilk ölçüsüne getirilmiştir. Onarılan bölgelerin mikroyapısı incelenmiş, tribolojik ve mekanik performansları araştırılmıştır. Yüksek lisans tez çalışması aşağıda belirtilen adımlara göre yürütülmüştür.

- Çalışma kapsamında (200x300x4) mm³ ölçüde Al6061 ve (200x300x5) mm³ ölçüde Al7075 levha yüzeylerinde frezeleme yöntemiyle kanal açılarak hasar oluşturulmuştur.
- Tamir işleminde kullanılacak tozların SEM görüntüleri alınıp X-ışını kırınım (XRD) analizleri yapılmıştır.
- 5 farklı toz grubu kullanılarak levha yüzeylerindeki hasarlı bölgeler soğuk gaz dinamik sprej yöntemiyle onarılmıştır.
- Onarım işlemi sonrası yüzeylerde biriken fazla kaplama satıh taşlama yöntemi ile yüzeyden uzaklaştırılmıştır.
- Tamir işlemi tamamlanmış sac levhalardan su jeti kesim ve laboratuvar koşullarında yaş kesme yöntemiyle mikroyapı, sertlik, aşınma ve çekme testleri için standart numuneler elde edilmiştir.
- Birinci grup numunelere mikroyapı incelemesi için zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanıp, mikroyapısal özellikleri optik mikroskop, FESEM görüntüleme yöntemleri ve EDS analizleri yapılarak belirlenmiştir.
- İkinci grup numunelerden Vickers mikrosertlik test yöntemi ile sertlik dağılımları belirlenmiştir.
- Üçüncü grup numuneler pin-on-disk yöntemi ile ASTM G99 standartlarında aşınma testleri için kullanılmıştır. Bu test sırasında sürtünme katsayısı-mesafe diyagramları anlık olarak kaydedilmiştir. Test sonrasında aşınma kanalları FESEM ve EDS analizi ile incelenerek aşınma mekanizmaları belirlenmiştir.
- Dördüncü grup numuneler mekanik testler için kullanılmıştır. Her grup için 3 adet olmak üzere çekme testleri yapılarak gerilme-gerinim diyagramları elde edilmiştir.

4.1. Al6061 ve Al7075 Sac Levhalar

Soğuk gaz dinamik sprey yöntemiyle onarım işlemi için her iki malzeme türünden de 6 adet olmak üzere Al7075-T651 ve Al6061-T6 alüminyum alaşım levhalar kullanılmıştır. Alüminyum levha boyutları Al6061-T6 için 200x300x4 mm³, Al7075-T651 için 200x300x5 mm³ olarak belirlenmiştir. Bu boyutlar önceden belirlenen deneysel çalışmalar için numune hazırlamak üzere seçilmiştir. Al6061-T6 ve Al7075-T651 alaşım malzemesinin kimyasal bileşimi Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Al6061 ve Al7075 alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimi.

DEĞERLER	ELEMENTLER (%)								
STANDART (TS EN 573-3) (STANDARD)	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Cu	Mg	Zn	Al
Al6061	0,41	0,70	0,14	0,17	0,04	0,24	0,86	0,05	Kalan
Al7075	0,16	0,08	0,07	0,18	0,03	1,50	2,50	5,80	Kalan

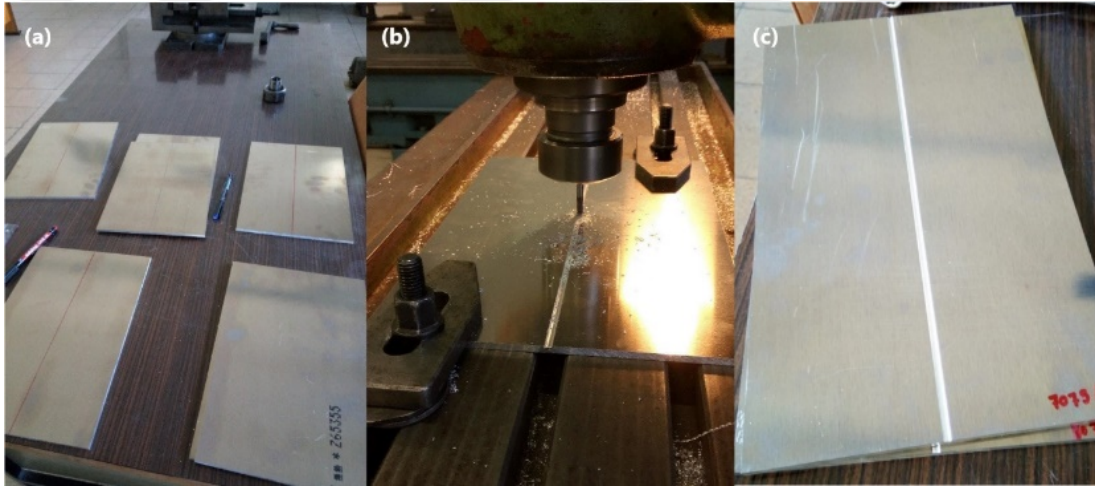
Al6061 ve Al7075 alaşımları havacılık, askeri, savunma ve demiryolu sanayi gibi geniş bir alanda hafif olması ve yüksek spesifik mukavemeti gibi özellikleri nedeniyle kullanılmaktadır. Bu avantajları ve geniş kullanım alanı sebebiyle deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere seçilmiştir.

4.2. Onarım İşleminde Kullanılan Tozlar

Al6061 ve Al7075 sac levhaların onarım işleminde Al₂O₃ seramik tozu ilaveli Al, Ni, Zn içerikli metal tozlar kullanılmıştır. Tozların ortalama tane boyutu 1-50 µm arasındadır. Farklı karakteristiğe sahip tozların kullanılmasıyla soğuk sprey tamir işleminde mekanik, tribolojik ve mikroyapı özellikler üzerine etkileri araştırılmıştır. Onarım işlemi öncesi kullanılan tozların SEM görüntüleri alınmış EDS ve XRD analizleri yapılarak bileşimleri doğrulanmıştır.

4.3. Talaşlı İşlem

SGDS tamir yönteminin uygulanabilmesi için Tos Olomouc marka universal freze tezgahı kullanılarak 6 adet Al6061 ve 6 adet Al7075 levha yüzeyinde yuvarlak tabanlı kanal açılarak hasar oluşturulmuştur. Levhaların 200 mm uzunluğuna sahip kenarının orta noktasında 300 mm uzunluğu boyunca 1 mm derinliğe sahip kanallar, 5 mm çapında karbür kaplamalı parmak freze çakısı kullanılarak oluşturulmuştur. İşleme parametreleri; devir 710 mm/devir ve ilerleme 80 mm/dk olarak seçilmiştir. Şekil 4.1 işlem adımlarını göstermektedir.



Şekil 4.1. Talaşlı işlem adımları: (a) işlem öncesi hazırlanan ve orta noktaları tespit edilen sac levhalar, (b) frezeleme işlemi, (c) hasar oluşturulmuş levhalar.

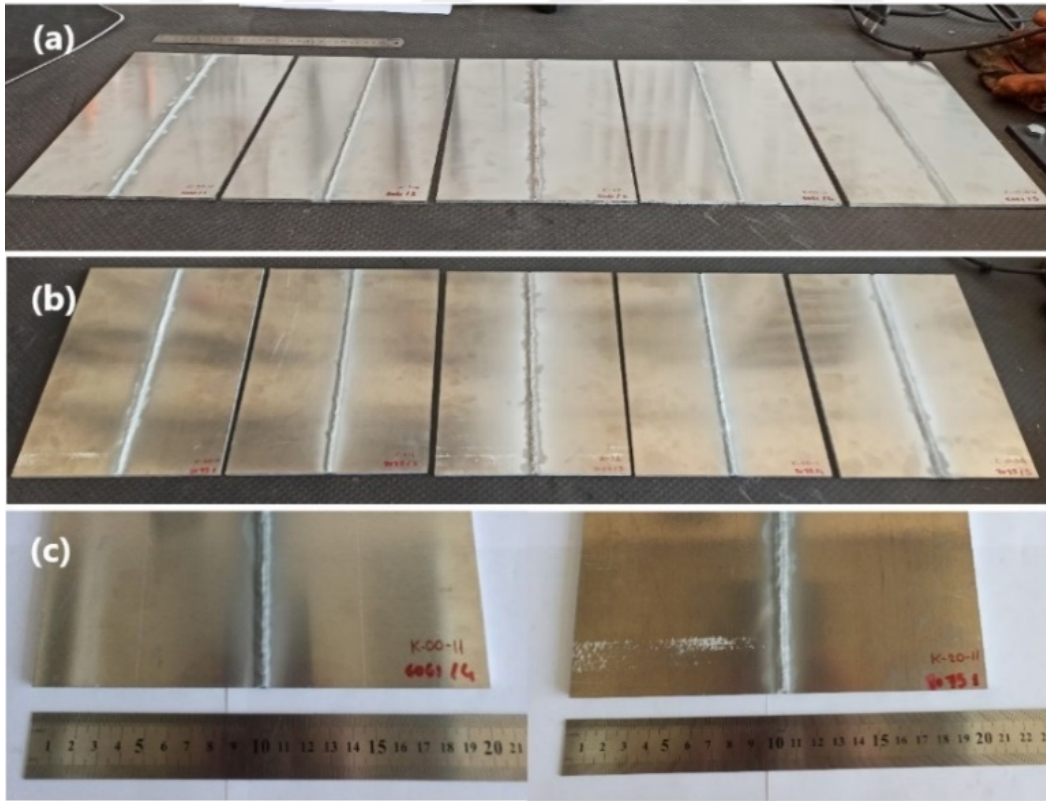
4.4. Soğuk Gaz Dinamik Sprey Tamir İşlemi

Soğuk sprej uygulamasından önce yüzeydeki oksit filmlerin uzaklaştırılması ve yüzey pürüzlülüğünün artırılması amacıyla yüzeye sert Al_2O_3 partikülleri ile kumlama işlemi yapılmıştır. Alüminyum yüzeyler üzerindeki hasarlı bölgeler Dymet-423 (Şekil 4.2) düşük basınçlı soğuk sprej sistemi ile Al-Zn- Al_2O_3 , Ni-Zn- Al_2O_3 , Ni- Al_2O_3 , Zn- Al_2O_3 ve Al- Al_2O_3 içeriğine sahip 5 farklı toz kullanılarak 5 adet Al6061 ve 5 adet Al7075 levha onarılmıştır. Sprej mesafesi 8 mm, toz besleme oranı 0,3 g/s, nozul hareket hızı 20 mm/s olarak belirlenmiştir. Taşıyıcı gaz olarak 8 bar basınçlı hava kullanılmış ve sıcaklığı 300 °C olarak belirlenmiştir. Onarım uygulaması bir operatör tarafından manuel kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.2. Dymet-423 düşük basınçlı soğuk sprej sistemi.

Sac levhaların hasarlı bölgeleri, SGDS onarım yöntemiyle malzeme birikimi sağlanarak doldurulmuştur. Onarım sonrası sac levhalar Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Onarılan sac levhalar: (a) Al6061 levhalar, (b) Al7075 levhalar, (c) yakın çekim görüntüler.

4.5. Yüzey Taşlama İşlemi

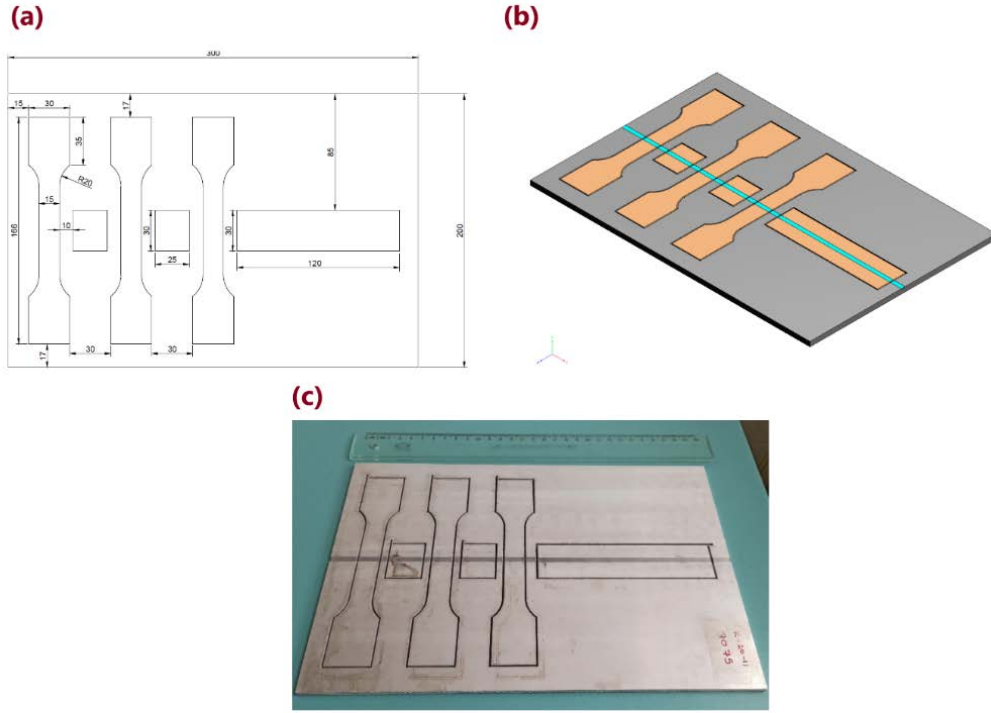
Soğuk sprej tozları ile onarılan sac levhaların yüzeyleri üzerinde biriken fazla malzeme standart deney numunelerinin elde edilebilmesi için, satıh taşlama işlemi uygulanarak hasar öncesi ölçüsüne ve yüzey özelliklerine getirilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Yüzey düzeltme işlemi: (a) Satıh taşlama yöntemiyle levha yüzeyinde biriken fazla soğuk sprej dolgu malzemesinin yüzeyden uzaklaştırılması, (b) taşlama işlemi sonrası ilk ölçüsüne getirilen sac levhalar.

4.6. Su Jeti ile Numune Kesimi

Soğuk sprej teknolojisi ile hasarlı bölgelerin onarımı yapıлып, önceki boyutlarına getirilen parçalar, daha sonra mekanik ve tribolojik testler ile mikroyapı incelemeleri için numune elde etmek amacı ile su jeti ile hassas olarak kesilmiştir. Şekil 4.5-a ve Şekil 4.5-b su jeti ile kesme işlemi öncesinde belirlenen deney numune ölçülerini ve oluşturulan geometriyi göstermektedir. Şekil 4.5-c su jeti ile kesilen sac levhayı göstermektedir.



Şekil 4.5. Su jeti ile numune kesme: (a) Su jeti kesim işlemi için numune ölçüleri, (b) 3 boyutlu geometri, (c) su jeti ile kesim işlemi sonrası sac levha.

4.7. Yaş Numune Kesme

Su jeti ile kesilerek sac levhalardan ayrılan büyük boyutlu numuneler mikroyapı incelemeleri, sertlik ölçümü ve aşınma testlerinde kullanılmak üzere uygun boyutlara getirilmiştir. Bu işlem Struers Discotom 5 marka metalografik numune kesme cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Struers Discotom 5 marka metalografik numune kesme cihazı.

4.8. Metalografik Numune Hazırlama

Kesme cihazında uygun boyutlara getirilen numunelerin dik kesitleri standart metalografik numune hazırlama yöntemlerine göre Struers TegraPol 21 marka numune zımparalama ve parlatma cihazında hazırlanmıştır (Şekil 4.7). Metalografik numune hazırlama adımlarında alüminyum alaşımları için özel olarak seçilen sarflar kullanılmıştır. İlk olarak zımparalama işlemi 320 tanecik sayısına sahip kağıt zımpara ile sulu ortamda yapılmıştır. Parlatma işlemleri alüminyum alaşımlar için seçilen özel parlatma çuhaları ile sırasıyla 9 μm , 3 μm ve 0,2 μm solüsyonlar kullanılarak tamamlanmıştır. Bu işlemler sonucunda mikroyapı incelemeleri için herhangi bir dağlama işlemine gerek kalmamıştır. Sertlik ölçümleri ve aşınma testleri için belirlenen numuneler de zımparalama ve parlatma işlemiyle hazırlanmıştır.



Şekil 4.7. Struers TegraPol 21 metalografik numune zımparalama ve parlatma cihazı.

4.9. Mikroyapı İncelemeleri

Tamir edilen bölgeler, metalografik numune hazırlama adımlarının tamamlanmasından sonra öncelikle Nikon Eclipse L150 Optik Mikroskop ve Clemex Görüntü Analiz Sistemi ile detaylı optik mikroyapısı incelenmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Nicon Eclipse L150 Optik Mikroskop ve Clemex Görüntü Analiz Sistemi.

Optik mikroyapı incelemelerinden sonra tamir edilmiş bölgeler alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopi (EDS) teknikleri ile incelenmiştir. İncelemelerde Hitachi Regulus 8230 marka FESEM cihazı kullanılmıştır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Hitachi Regulus 8230 marka FESEM cihazı.

4.10. Mikrosertlik Ölçümleri

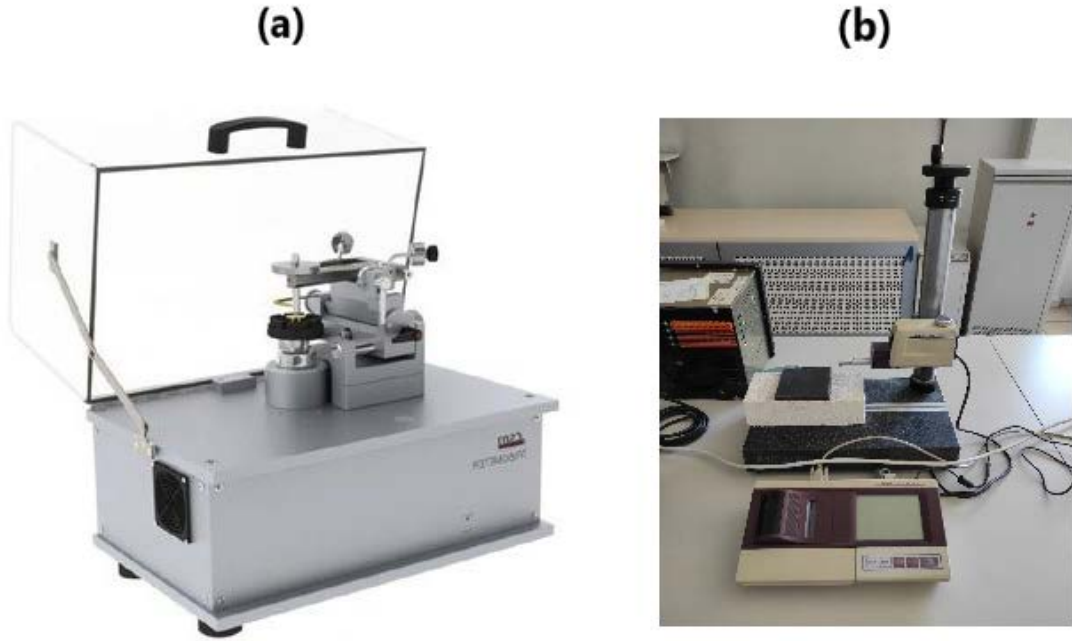
Tamir edilen bölgenin kesit alanı üzerinden Vickers mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Future-Tech FM-700 mikrosertlik cihazı (Şekil 4.10) kullanılarak yapılan deneylerde 100 gf yük ve 10 s bekleme süresi seçilmiştir. Ölçümler numunelerin onarılmış bölgelerinin dik kesit alanı üzerinden, yüzeyden alt malzemeye doğru 150 μm aralıklarla yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri her numunede yatayda 100 μm aralıklarla 3 kez tekrarlanıp ortalama değerler hesaplanmıştır.



Şekil 4.10. Future-Tech FM-700 mikrosertlik cihazı.

4.11. Aşınma ve Sürtünme Deneyleri

Tamir edilmiş bölgelerin tribolojik performansının belirlenmesi için CSM Tribometer test cihazı (Şekil 4.11-a) kullanılarak, ASTM G99 standardına uygun kuru ortamda pin-on disk aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Tamir edilmiş bölgelerin tribolojik performansları, işlemsiz Al6061 ve Al7075 alt malzemeler ile karşılaştırılmıştır.

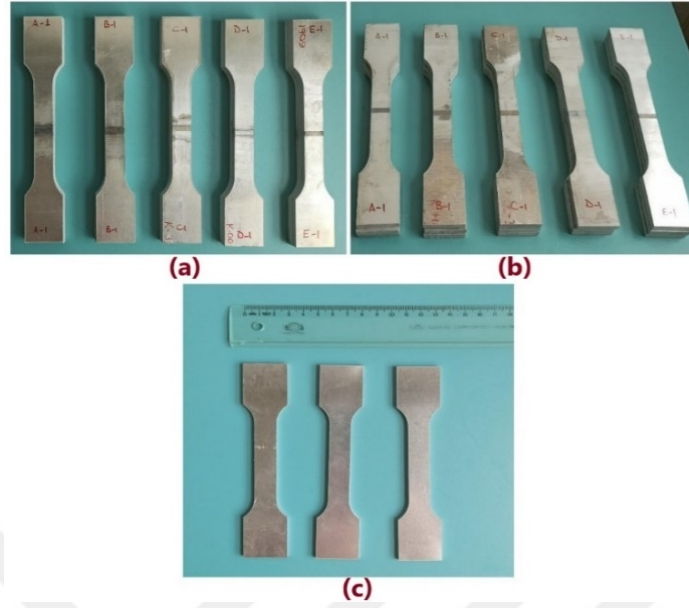


Şekil 4.11. (a) CSM Tribometer aşınma test cihazı, (b) Mitutoyo SJ-400 yüzey profil ölçüm cihazı.

Testler öncesi taşlanmış numunelerin üst yüzeyleri parlatılarak $0.2\ \mu\text{m}$ ortalama yüzey pürüzlülük değerine getirilmiştir. Aşınma deneylerinde aşındırıcı karşı cisim olarak 3 mm çapında WC küre kullanılmıştır. Deney parametreleri olarak normal yük 2 N, 2 mm aşınma çapı, 70 m aşınma mesafesi, 190 dev/dk dönüş hızı belirlenmiş ve deneyler yağlayıcı kullanılmadan $20\ ^\circ\text{C}$ ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında sürtünme katsayısı aşınma mesafesine karşılık anlık olarak ölçülmüş ve test sonucunda ortalama sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Mitutoyo SJ-400 yüzey profil ölçüm cihazı (Şekil 4.11-b) ile 4 farklı noktadan aşınma kanallarının yüzey profilleri, ISO R97 standardında ve Gauss filtresi kullanılarak ölçülmüştür. Bu ölçümler neticesinde aşınma kanallarının ortalama kesit alanları belirlenerek aşınma oranları hesaplanmıştır. Aşınma deneyleri sonrası aşınma kanalları ve aşındırıcı küreler FESEM görüntüleme yöntemi ve EDS analizleri ile incelenmiştir.

4.12. Çekme Deneyleri

Su jeti ile kesme işlemi sonucunda, 5 farklı içeriğe sahip tozlar ile onarılan Al6061 ve Al7075 sac levhalar ile işlemsiz levhalardan üçer adet ISO 6892-1 standartlarına uygun çekme numuneleri elde edilmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Çekme deney numuneleri: (a) onarılmış Al6061 numuneler, (b) onarılmış Al7075 numuneler, (c) işlemsiz numuneler.

Numuneler Alşa-742 model çekme cihazında 4 kN ön yük ve 3 mm/dk çekme hızı deney parametreleri ile 20 °C oda sıcaklığında kopana kadar çekme işlemine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda her bir numune için mühendislik gerilme-birim şekil değişimi diyagramları çizilmiştir. Üçer adet yapılan her deney grubunun ortalaması alınıp, numunelerin akma gerilmesi (σ_{ak}), çekme gerilmesi (σ_c) ve yüzde birim şekil değişimi (ϵ) değerleri bulunmuş ve karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.13. Alşa-742 model çekme cihazı.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

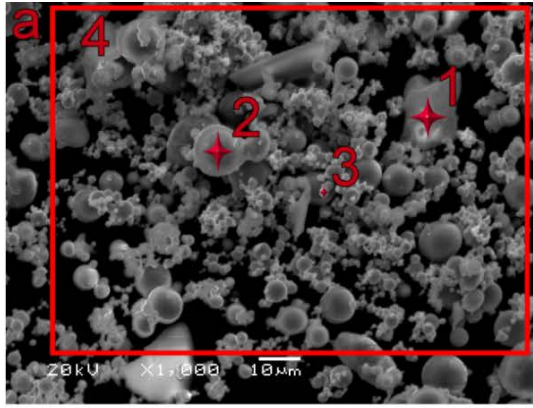
Bu bölümde yüksek lisans tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları verilmiştir. Onarım işleminde kullanılan toz partiküllerin yapısı ve içeriği belirlenmiştir. Onarılan numunelerin mikroyapıları, sertlik sonuçları, tribolojik performansları ve mekanik özellikleri irdelenmiş, sonuçlar karşılaştırılmıştır.

5.1. Kullanılan Tamir Tozları

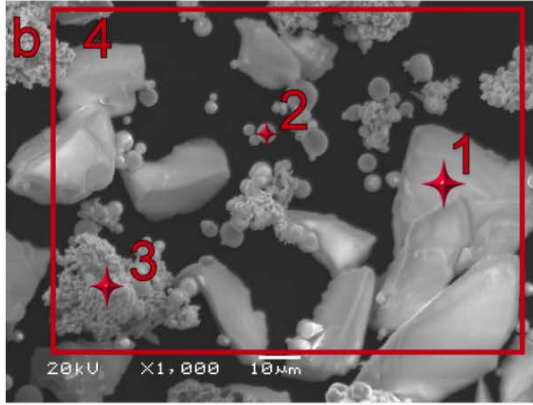
SGDS yöntemiyle yüzeylerinde hasar oluşturulan Al6061 ve Al7075 malzemeler Al_2O_3 içeren Al, Ni, Zn tozları kullanılarak onarılmıştır. Kullanılan tozların ortama partikül boyutları 1-50 μm arasında değişmektedir. Onarım işleminde kullanılan Al-Zn- Al_2O_3 , Ni-Zn- Al_2O_3 , Ni- Al_2O_3 , Zn- Al_2O_3 , Al- Al_2O_3 olarak 5 farklı içerikte kullanılan toz partiküllerin SEM görüntüleri alınmış, EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca XRD analizleri yapılarak sonuçlar doğrulanmıştır. Kullanılan tozların hacim oranları Çizelge 5.1’de, SEM ve EDS analiz sonuçları Şekil 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Kullanılan onarım tozlarının hacim oranları.

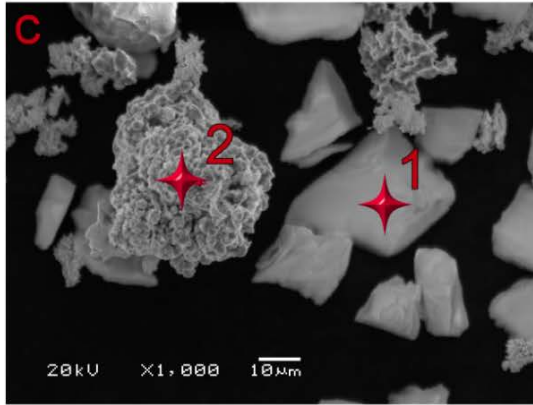
TOZLAR	% Hacim oranları			
	Al	Ni	Zn	Al_2O_3
Al-Zn- Al_2O_3	44,2	-	26,7	29,1
Ni-Zn- Al_2O_3	-	38,7	12,4	48,9
Ni- Al_2O_3	-	37,6	-	62,4
Zn- Al_2O_3	-	-	33,5	66,5
Al- Al_2O_3	16,4	-	-	83,6



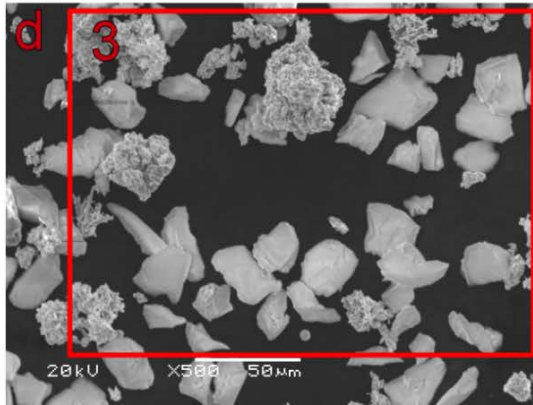
Bölge	Elementler (%Ağ.)		
	Zn	Al	O
1	-	64,712	35,288
2	100	-	-
3	-	100	-
4	48,939	46,985	4,076



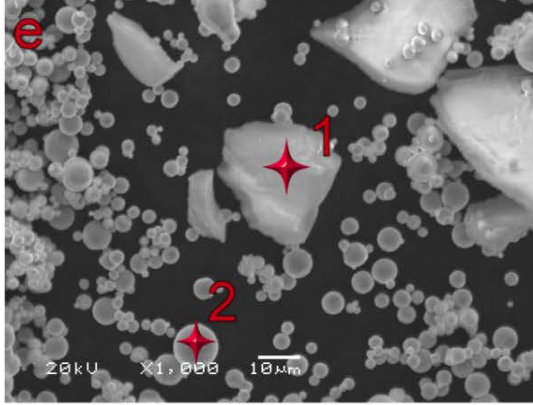
Bölge	Elementler (%Ağ.)			
	Ni	Zn	Al	O
1	-	-	59,290	40,710
2	-	100	-	-
3	100	-	-	-
4	12,321	16,577	48,042	23,060



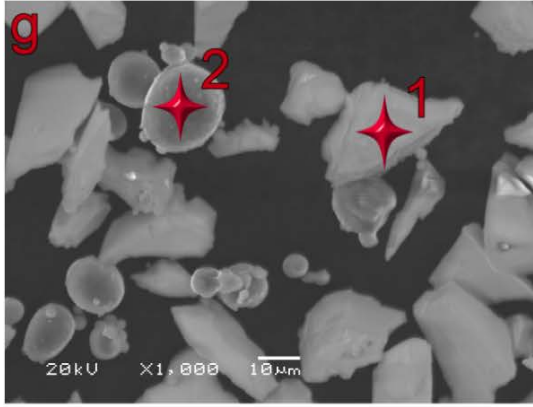
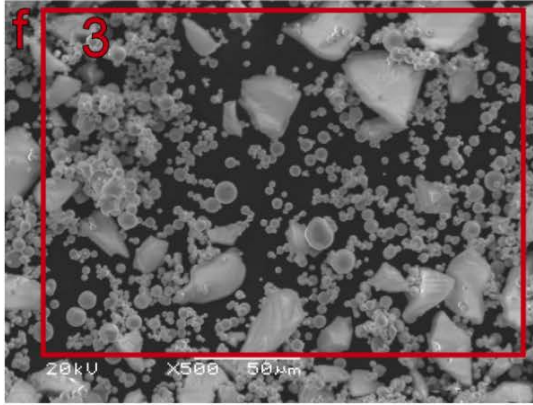
Bölge	Elementler (%Ağ.)		
	Ni	Al	O
1	-	80,005	19,995
2	100	-	-
3	29,961	46,947	23,093



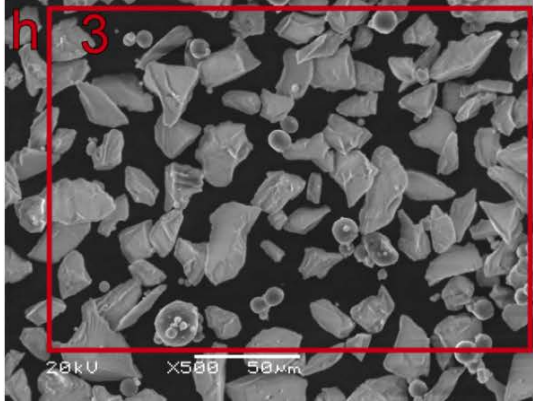
Şekil 5.1. Tamir işleminde kullanılan toz partiküllerin SEM-EDS analizleri: (a) Al-Zn-Al₂O₃ toz partikülleri (1000X), (b) Ni-Zn-Al₂O₃ toz partikülleri (1000X), (c) Ni-Al₂O₃ toz partikülleri (1000X), (d) Ni-Al₂O₃ toz partikülleri (500X).



Bölge	Elementler (%Ağ.)		
	Zn	Al	O
1	-	77,978	22,022
2	100	-	-
3	57,189	30,497	12,314



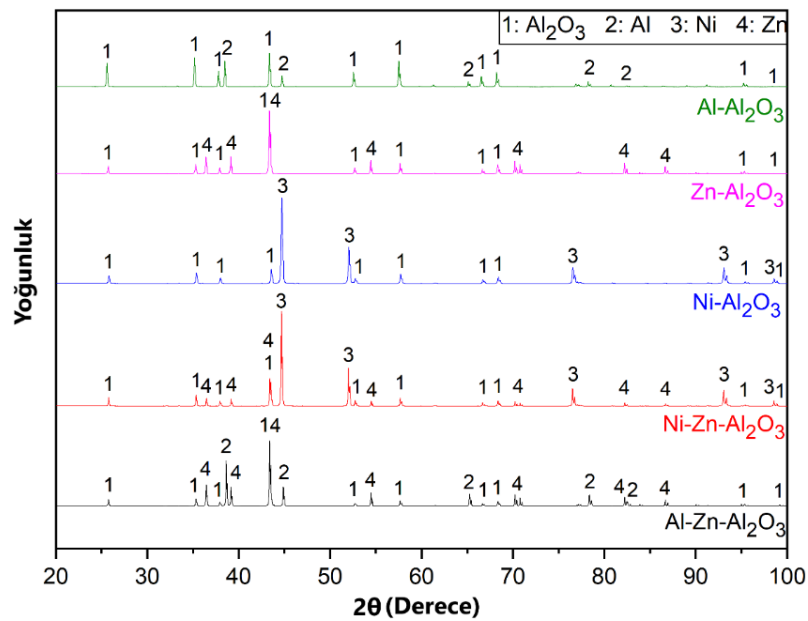
Bölge	Elementler (%Ağ.)	
	Al	O
1	65,669	34,331
2	100	-
3	67,851	32,149



Şekil 5.1. Tamir işleminde kullanılan toz partiküllerin SEM-EDS analizleri: (e) Zn-Al₂O₃ toz partikülleri (1000X), (f) Zn-Al₂O₃ toz partikülleri (500X), (g) Al-Al₂O₃ toz partikülleri (1000X), (h) Al-Al₂O₃ toz partikülleri (500X). (Devam).

Şekil 5.1’de kullanılan tozların SEM görüntüleri ve EDS analizleri incelendiğinde 1 numara ile gösterilen keskin kenarlı ve düzensiz şekle sahip partiküllerin, Al_2O_3 partikülleri olduğu görülmektedir. Şekil 5.1-a, Şekil 5.1-b ve Şekil 5.1-e incelendiğinde 2 numaralı yuvarlak geometriye sahip partiküllerin Zn partikülleri olduğu ayrıca Şekil 5.1-a’da 3 numara ile, Şekil 5.1-g’de 2 numara ile gösterilen yuvarlak geometriye sahip Al partikülleri olduğu görülmektedir. Süngerimsi bir yapıya sahip Ni partikülleri ise Şekil 5.1-b’de 3 numara ile Şekil 5.1-c’de 2 numara ile gösterilmiştir. Al_2O_3 ve Ni partikülleri, Zn ve Al tozlarına göre daha yüksek partikül boyutuna sahiptir. Küçük partikül boyutuna ve yuvarlak geometriye sahip Zn ve Al tozlarının toz bileşimleri içerisinde yer alması toz karışımının daha az boşluklu bir yapı oluşturmasını sağlamıştır. Nokta EDS analizlerine göre Al-Zn-Ni metal partiküllerin ve Al_2O_3 seramik partiküllerin toz bileşimi içerisinde saf halde bulundukları, herhangi bir bileşik oluşturmadıkları ve oksitlenme meydana gelmediği sonucuna varılmıştır. Ayrıca alan EDS sonuçları da toz bileşimleri içerisinde farklı bir elementin yer almadığını desteklemektedir.

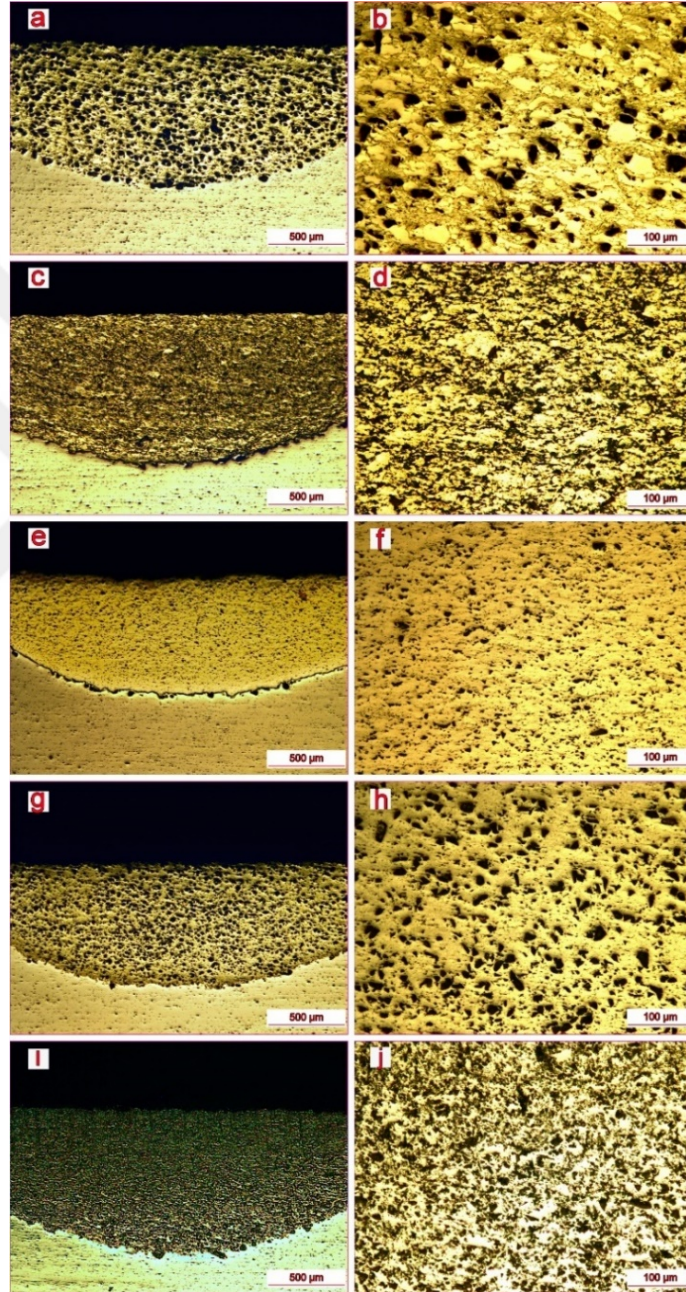
Toz partiküllerin ayrıca XRD analizleri yapılmıştır (Şekil 5.2). Tozların XRD analizleri SEM ve EDS analizlerini desteklemiş, toz bileşimleri içerisinde beklenen Al, Ni, Zn ve Al_2O_3 dışında bir yapıya rastlanmamıştır. Bu tozların yüksek saflık değerine sahip olduğunu da kanıtlamaktadır.



Şekil 5.2. Tamir tozlarının XRD analizi.

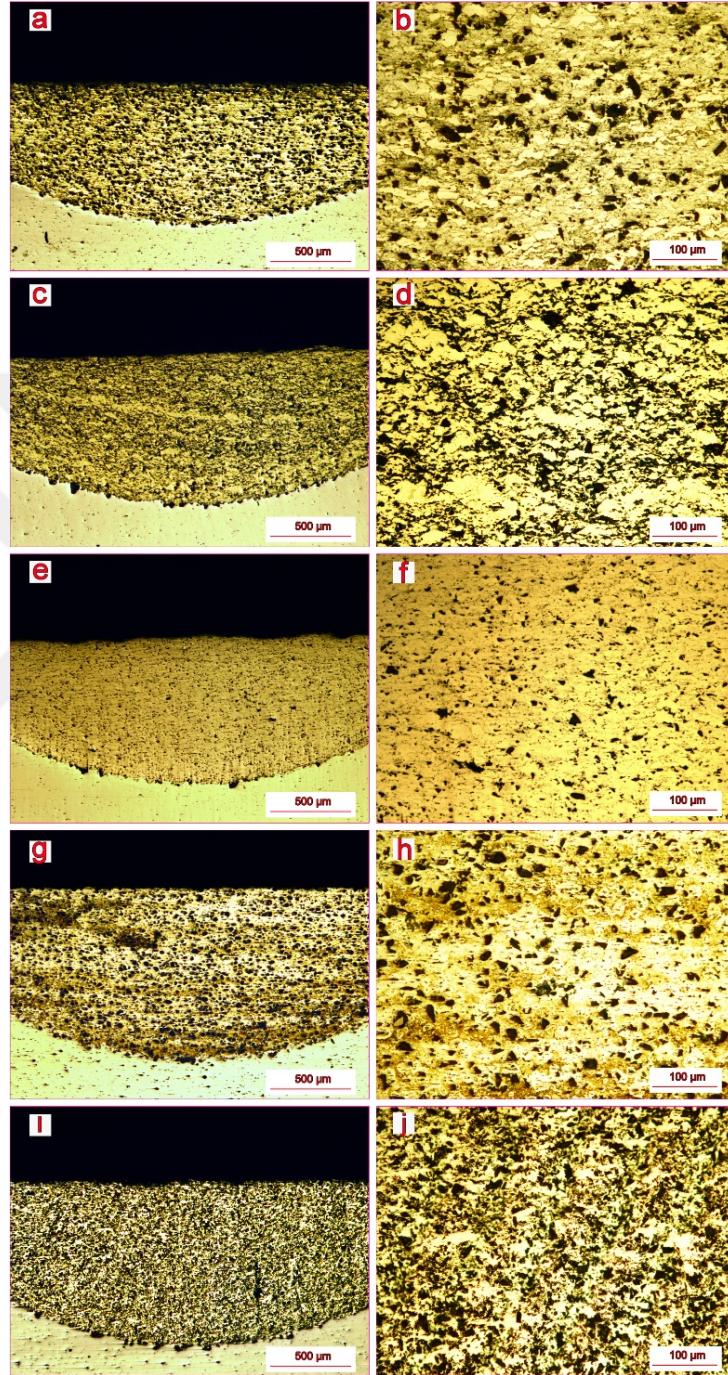
5.2. Mikroyapı İncelemeleri

Soğuk sprey onarım işlemi sonucunda tamir edilen Al6061 alaşımlarının kesit yüzeyleri üzerinden alınan optik mikroyapı görüntüleri Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3. Al6061 alt malzemesinde onarılan bölgelerin dik kesit optik mikroyapı görüntüleri: (a) Al-Zn-Al₂O₃ (50X), (b) Al-Zn-Al₂O₃ (200X), (c) Ni-Zn-Al₂O₃ (50X), (d) Ni-Zn-Al₂O₃ (200X), (e) Ni-Al₂O₃ (50X), (f) Ni-Al₂O₃ (200X), (g) Zn-Al₂O₃ (50X), (h) Zn-Al₂O₃ (200X), (i) Al-Al₂O₃ (50X) ve (j) Al-Al₂O₃ (200X).

Soğuk sprej onarım işlemi sonucunda tamir edilen Al7075 alaşımlarının kesit yüzeyleri üzerinden alınan optik mikroyapı görüntüleri Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4. Al7075 alt malzemesinde onarılan bölgelerin dik kesit optik mikroyapı görüntüleri: (a) Al-Zn-Al₂O₃ (50X), (b) Al-Zn-Al₂O₃ (200X), (c) Ni-Zn-Al₂O₃ (50X), (d) Ni-Zn-Al₂O₃ (200X), (e) Ni-Al₂O₃ (50X), (f) Ni-Al₂O₃ (200X), (g) Zn-Al₂O₃ (50X), (h) Zn-Al₂O₃ (200X), (i) Al-Al₂O₃ (50X), (j) Al-Al₂O₃ (200X).

Soğuk sprej biriktirme işleminde sertliği yüksek ve gevrek partiküllerin tek başına biriktirilmesi zordur (Grujicic vd., 2004). Al_2O_3 gibi sert partiküller soğuk sprej biriktirme işleminde sünek tozlar ile bir araya getirilerek kullanılır ve biriktirme sırasında kaplama katmanlarının içine gömülür. Literatürde Al- Al_2O_3 toz karışımları bir araya getirerek biriktirme veriminin artırılması amacıyla çalışmalar yapılmıştır (Cong vd., 2017). Bu tez çalışmasında Ni-Zn-Al sünek partiküller Al_2O_3 partiküller ile birlikte kullanılarak hasar bölgelerinde iyi bir onarım sağlanması amaçlanmıştır. Soğuk sprej biriktirme işlemi iki aşamada gerçekleştirir. İlk aşama kaplama tozlarının altlık malzeme yüzeyi üzerinde birikmesidir. İkinci aşama ise diğer kaplama tozlarının soğuk sprej kaplama tabakalarının üzerinde birikmesi ve işlem boyunca kalınlığın artmasıdır. Soğuk sprej kaplamalarının yapışma mukavemeti altlık malzemenin yüzey özellikleri ile ilgilidir. Daha önce yapılan bir çalışmada altlık malzemesinin yüzey pürüzlülüğünün artmasının yapışma mukavemetini arttırdığı belirlenmiştir (Samson vd., 2015). Ayrıca soğuk sprej biriktirme işlemi öncesi yüzeydeki oksit tabakaları gibi kalıntıların yüzeyden uzaklaştırılması gerekir. Bu tabakaların varlığı bağlanmayı azaltıcı etki yapar. Oksit tabakaları soğuk sprej işlemi öncesi seramik partiküllerin yüzeye gönderilerek kumlama etkisiyle ortadan kaldırılır. Ayrıca bu işlem yüzeyi daha pürüzlü hale getirerek biriktirme verimini artırır. Bu aşamada kullanılan sert seramik parçacıklar, yüzeye yüksek hızla çarpar ve geri döner. Keskin kenarları olan çok az miktarda sert parçacık, sünek altlık üzerine gömülebilir. Pürüzlü yüzey üzerine kaplama tozu püskürtülür ve ilk altlık malzemesi üzerinde kaplama tabakası oluşturulur. Bu aşamada, literatürde yaygın olarak bildirildiği gibi, kaplama tabakalarının oluşumu, yüksek hızda püskürtülen metal parçacıkların plastik deformasyonu ile ilgilidir (Assadi vd., 2003). Yüksek süneklığe sahip metal partiküller sayesinde kaplama tabakalarının metal matrisi mekanik ara kilitlenme mekanizması ile oluşmaya başlar. Bu işlem sırasında, seramik partiküllerin biriktirme verimliliği düşüktür. Birinci kaplama tabakasının biriktirilmesinden sonra, metal ve seramik partiküllerinin yüksek hızlı darbe etkisi, bağlanmayı iyileştirir ve mekanik kitleme için daha uygun tabakaların oluşması nedeniyle kaplama tabakasının kalınlığı daha hızlı artar. Bu aşamadan sonra seramik partiküllerin parçalanma eğilimi devam ederken yüksek hız nedeniyle metal matrise gömülür. Seramik parçacıkların keskin köşeleri gömülü olma eğilimine olumlu katkı sağlar. Ayrıca bilyeli sertleştirme işlemine benzer bir etkiyle metal matrisi plastik olarak deforme edebilir. Bu da artık gerilme artışı ve tane incelmeye neden olur (Sevillano vd., 2013). Seramik Al_2O_3 parçacıklarının

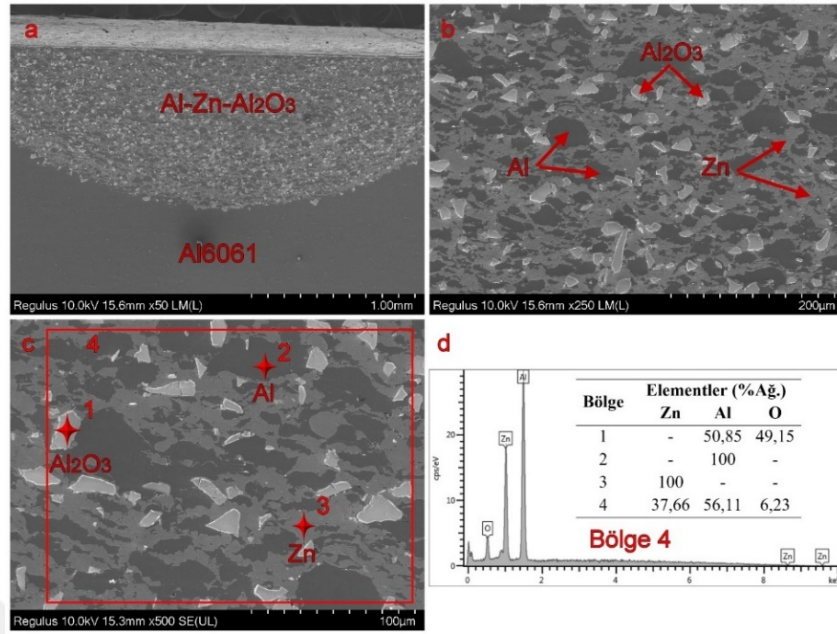
kırılganlığı nedeniyle, yüzeye yüksek hızda çarptıklarında parçalanma meydana gelir. Bu etki, daha önce kaplama tabakasında biriken seramik partiküllere çarptığında şiddetlenir. Seramik parçacıklar, yüksek hızlı çarpma sonrası parçalanma nedeniyle metal matrise gömülür ve yayılır. Bu nedenle, kaplama tozu geometrisi, kaplama tabakasına gömülü olanların boyutundan ve şeklinden farklıdır. Seramik parçacıkların biriktirme verimliliği, parçalanma ve geri tepme nedeniyle azalır (Kılıçay, 2020). Soğuk sprej işleminde sert ve sünek partiküllerden oluşan bir toz karışımı püskürtülürken, birbirinin üzerine denk gelen partiküllerin sert veya sünek olma durumu farklı sonuçlar verir. Sünek partiküllerin sünek partiküller üzerine biriktirilmesi yüksek deforme olabilme kabiliyetleri nedeniyle bağlanma mekanizması diğer durumlar göz önüne alındığında daha kolay gerçekleşir. Soğuk sprejde kullanılan tozların içerisinde yer alan sert partiküllerin oranının artması, sert partiküllerin sünek partiküller üzerine, sünek partiküllerin sert partiküller üzerine, sert partiküllerin sert partiküller üzerine denk gelme olasılığını artırır ve bu durum biriktirme verimliliğinde düşüş eğilimine sebep olur. Soğuk sprej toz biriktirme işleminde sert partiküllerin sert partiküller üzerine denk gelmesi, geri sıçramasına neden olmakla birlikte önceden biriken sert partiküllerin yapı içerisinde dökülmesini tetikler. Bu durum biriktirme veriminin düşmesine neden olur (Luo ve Li, 2015).

Açıklanan mekanizmalar neticesinde oluşan soğuk sprej birikimler ile alüminyum yüzeylerin hasarlı bölgeleri onarılmıştır. Tamir edilen yüzeylerin optik mikroyapı görüntüleri incelendiğinde alüminyum alaşımlarının yüzeyleri üzerinde açılan kanalların soğuk sprej yöntemi ile başarılı bir şekilde tamir tozları ile doldurularak onarım işleminin gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Onarılan bölge ve alt malzeme arasında belirgin bir ara yüzey geçişi oluşmuştur. Oluşan ara yüzeylerde herhangi bir boşluk veya süreksizlik meydana gelmemiştir. İşlem öncesi sert Al_2O_3 partikülleri kullanılarak uygulanan kumlama işlemi sayesinde yüzey pürüzlülüğü artırılarak soğuk sprej biriktirme işleminin veriminin artması sağlanarak yüzeydeki oksit filmleri uzaklaştırılmıştır. Yüzeye gönderilen Al_2O_3 partikülleri ara yüzeylerde açıkça görülmektedir. Optik görüntülerde onarılan bölgelerin mikroyapısı alt malzemelerden tamamen farklıdır. Al-Zn- Al_2O_3 , Ni-Zn- Al_2O_3 , Ni- Al_2O_3 , Zn- Al_2O_3 , Al- Al_2O_3 tozla soğuk sprej işlemi sonrası onarım bölgesinde kompozit bir yapı meydana getirmiştir. Al-Ni-Zn tozları kompozit yapının matris fazını meydana getirirken Al_2O_3 partikülleri ile desteklenmiştir. Optik mikroyapı görüntülerinde onarım bölgesinde

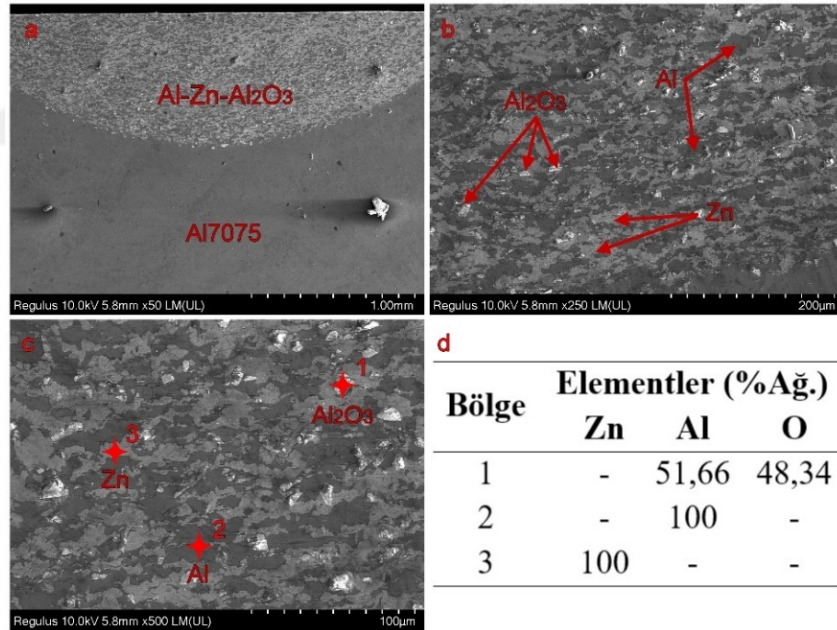
sarı renkte görünen bölgeler Al, Ni ve Zn tozlarının oluşturduğu bölgelerdir. Siyah renkli ve keskin kenarlı olan yapılar ise Al_2O_3 partiküllerinin oluşturduğu bölgelerdir. Al_2O_3 partikülleri yapı içerisine homojen bir dağılım göstermiştir. İşlem sırasında ergimeyen tozlar yüksek hızlarda yüzeye çarpmaları sonucu şiddetli plastik deformasyona uğramışlardır. Plastik deformasyon sonucu yassılaştıran Al-Ni-Zn partikülleri yapı içerisinde lamelli bir yapı oluşturmuştur. Sert ve kırılğan Al_2O_3 partikülleri ise yassı bir şekil almamış, kırılma sonucu daha küçük partikül boyutlarına ulaşarak kompozit yapı içerisinde destek fazını oluşturmuştur. Optik mikroyapı görüntülerine göre onarım bölgeleri yüksek yoğunluğa sahip, boşluksuz ve gözeneksiz bir yapıya sahiptir.

Tamir edilmiş numunelerin kesit yüzeyleri üzerinde FESEM ve EDS analizleri gerçekleştirilerek detaylı mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. İncelenen bölgelerde kompozit yapı içerisinde yer alan elementler tespit edilmiştir. Tamir edilmiş Al6061 ve Al7075 numunelerin FESEM ve EDS analiz sonuçları Şekil 5.5-5.14 arasında verilmiştir.

Alınan SEM görüntülerinde tamir edilmiş bölgeler açıkça görülmektedir. Toz partiküller boşluksuz, homojen ve yoğunluğu yüksek kompozit bir yapı meydana getirmiştir. Tamir edilen bölge ile alt malzemeler arasında oluşan ara yüzey bölgesinde kumlama işleminden kalan büyük boyutlu Al_2O_3 partikülleri gözükmemektedir. Al ve Zn fazları kompozit tamir bölgesinin metal matrisini oluşturmaktadır. EDS analizleri sonucunda göre kompozit onarım bölgesi içerisinde Al, Zn ve Al_2O_3 saf partiküllerinin oluşturduğu bölgeler haricinde farklı bir yapıya rastlanmamıştır. Bu durum soğuk spreylere tamir işlemi sırasında tozların herhangi bir bileşik oluşturmadıklarını ve faz dönüşümü meydana gelmediğini kanıtlamaktadır. Farklı tane boyutlarına sahip Al_2O_3 destek yapılar kompozit tamir bölgesine homojen bir dağılım göstermiştir.

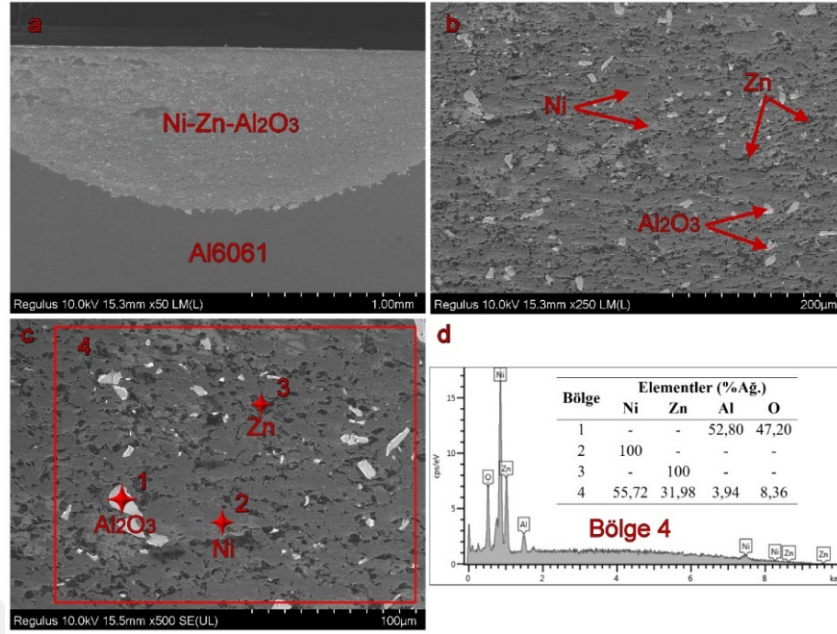


Şekil 5.5. Al-Zn-Al₂O₃ tozları ile tamir edilen Al6061 numunelerin SEM-EDS analizleri.

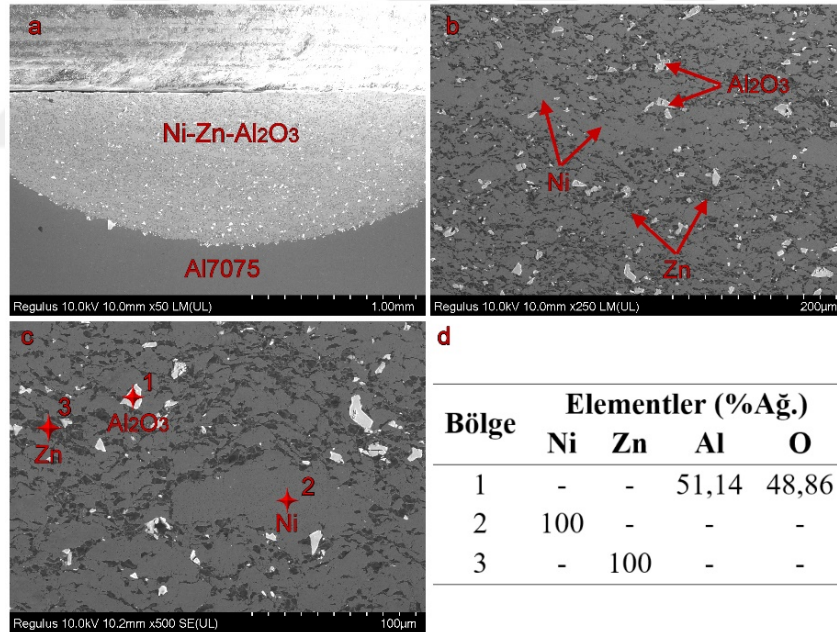


Şekil 5.6. Al-Zn-Al₂O₃ tozları ile tamir edilen Al7075 numunelerin SEM-EDS analizleri.

Al-Zn-Al₂O₃ tozları ile tamir edilen hasarlı Al6061 ve Al7075 numunelerinin SEM-EDS analiz sonuçları Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir. 1 numara ile gösterilen beyaz renkli, düzensiz ve keskin kenarlı geometriye sahip bölgeler Al₂O₃ destek fazı bölgeleridir. 2 numara ile gösterilen koyu gri renge sahip bölgeler Al yapılarını ve 3 numara ile gösterilen açık gri renge sahip bölgeler ise Zn yapılarını oluşturmuştur.

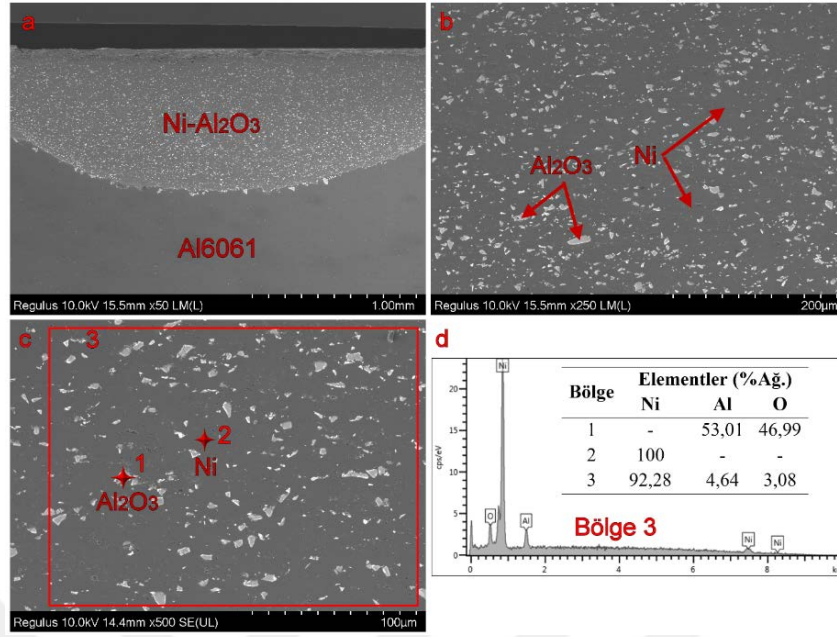


Şekil 5.7. Ni-Zn-Al₂O₃ tozları ile tamir edilen Al6061 numunelerin SEM-EDS analizleri.

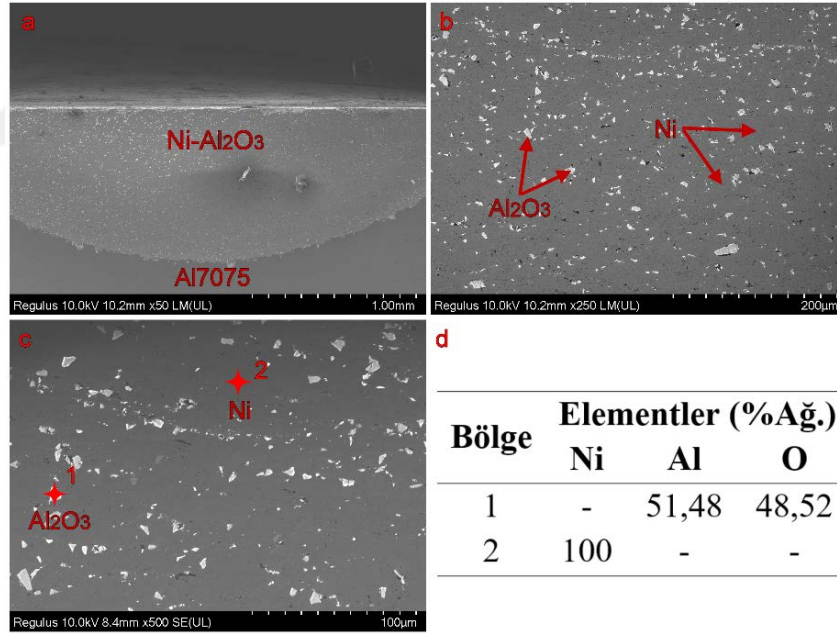


Şekil 5.8. Ni-Zn-Al₂O₃ tozları ile tamir edilen Al7075 numunelerin SEM-EDS analizleri.

Ni-Zn-Al₂O₃ tozları ile tamir edilen hasarlı Al6061 ve Al7075 numunelerinin SEM-EDS analiz sonuçları Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de verilmiştir. 1 numara ile gösterilen beyaz renkli, düzensiz ve keskin kenarlı geometriye sahip bölgeler Al₂O₃ destek fazı bölgeleridir. 2 numara ile gösterilen açık gri renge sahip bölgeler Ni yapılarını ve 3 numara ile gösterilen koyu renkli bölgeler ise Zn yapılarını oluşturmuştur.

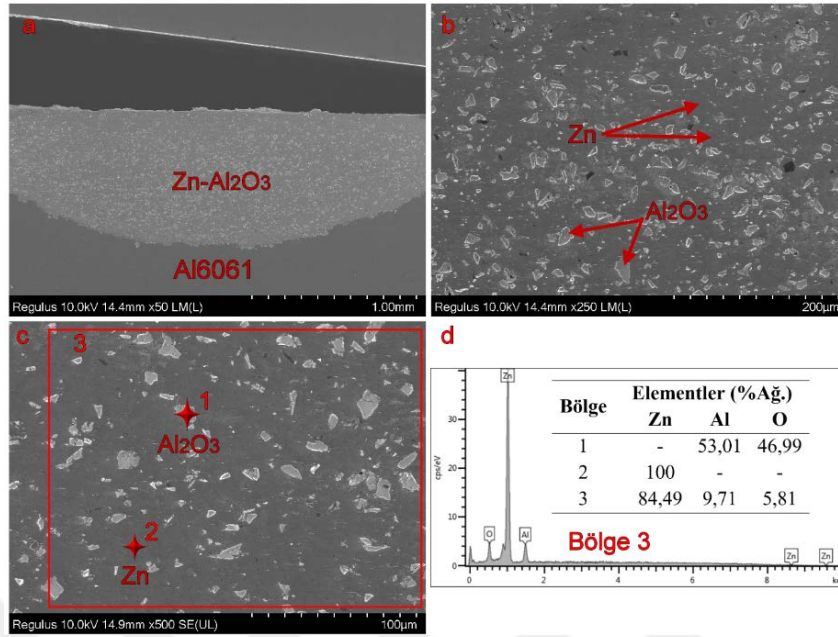


Şekil 5.9. Ni-Al₂O₃ tozları ile tamir edilen Al6061 numunelerin SEM-EDS analizleri.

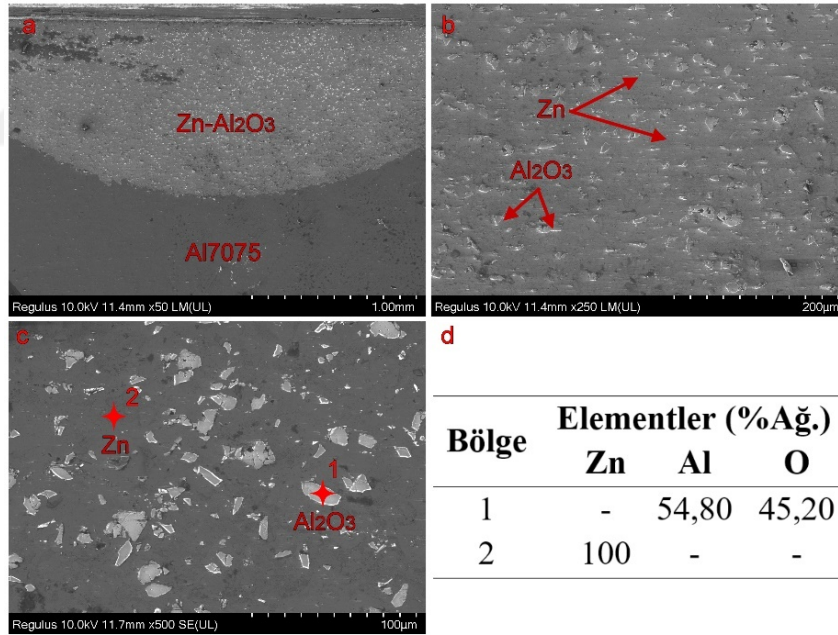


Şekil 5.10. Ni-Al₂O₃ tozları ile tamir edilen Al7075 numunelerin SEM-EDS analizleri.

Ni-Al₂O₃ tozları ile tamir edilen hasarlı Al6061 ve Al7075 numunelerinin SEM-EDS analiz sonuçları Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da verilmiştir. 1 numara ile gösterilen beyaz renkli, düzensiz ve keskin kenarlı geometriye sahip bölgeler Al₂O₃ destek fazı bölgeleridir. 2 numara ile gösterilen gri renkli bölgeler Ni yapılarını oluşturmuştur.



Şekil 5.11. Zn-Al₂O₃ tozları ile tamir edilen Al6061 numunelerin SEM-EDS analizleri.



Şekil 5.12. Zn-Al₂O₃ tozları ile tamir edilen Al7075 numunelerin SEM-EDS analizleri.

Zn-Al₂O₃ tozları ile tamir edilen hasarlı Al6061 ve Al7075 numunelerinin SEM-EDS analiz sonuçları Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de verilmiştir. 1 numara ile gösterilen beyaz renkli, düzensiz ve keskin kenarlı geometriye sahip bölgeler Al₂O₃ destek fazı bölgeleridir. 2 numara ile gösterilen gri renkli bölgeler Zn yapılarını oluşturmuştur.

5.3. Mikrosertlik Sonuçları

Al6061 ve Al7075 altlık malzemelerinin hasarlı yüzeyleri üzerinde yapılan soğuk sprey onarım işlemi sonrası mikrosertlik ölçümleri sonucunda elde edilen ortalama mikrosertlik değerleri Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te verilmiştir. Ayrıca Tamir edilmiş bölgeden altlık malzemeye doğru mikrosertlik dağılımları Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Tamir edilmiş numunelerin ara kesit yüzeyleri üzerinden yatayda 100 µm aralıklarla alınan 3'er ölçüm neticesinde elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Bu ölçümler yüzey üst noktasından alt malzemeye doğru 150 µm aralıklarla tekrarlanmıştır. Bu ölçüm metodunun uygulanma nedeni tamir bölgesinin kompozit bir yapıya sahip olması ve bölgesel olarak farklı mikro sertlik değerleri elde edilebilmesidir. Belirtilen yöntem ile alınan ölçümlerin ortalaması alınarak ortalama değerler elde edilmiştir.

Çizelge 5.2. Tamir edilen Al6061 yüzeylerinden ölçülen sertlik değerleri.

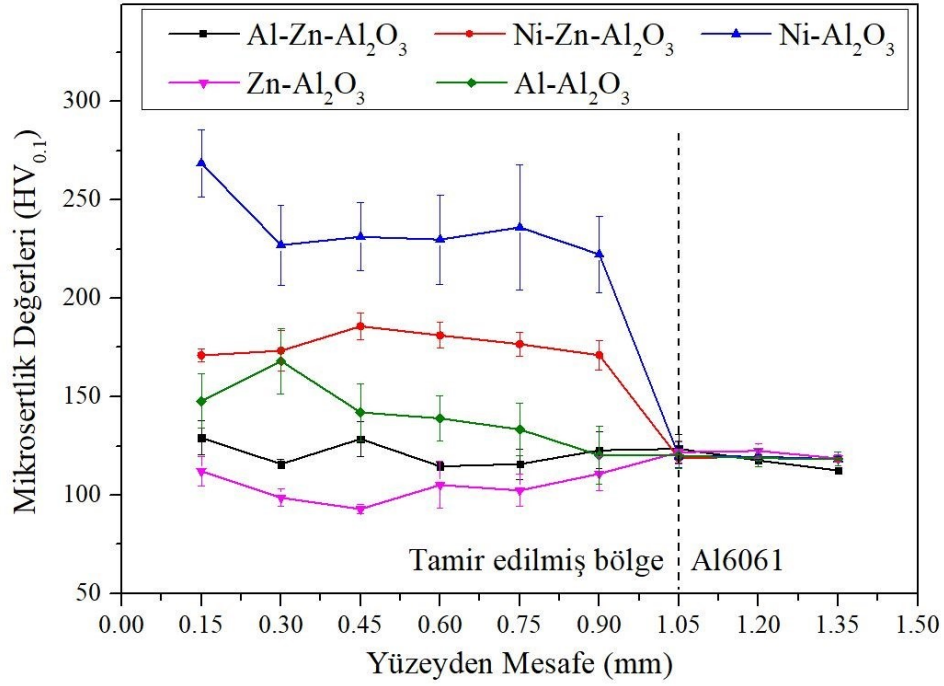
Ölçüm Yüzeyi	Ortalama Mikrosertlik Değerleri (HV _{0.1})
Al6061	119±4
Al-Zn-Al ₂ O ₃	121±9
Ni-Zn-Al ₂ O ₃	177±8
Ni-Al ₂ O ₃	236±2
Zn-Al ₂ O ₃	104±1
Al-Al ₂ O ₃	142±2

Çizelge 5.3. Tamir edilen Al7075 yüzeylerinden ölçülen sertlik değerleri.

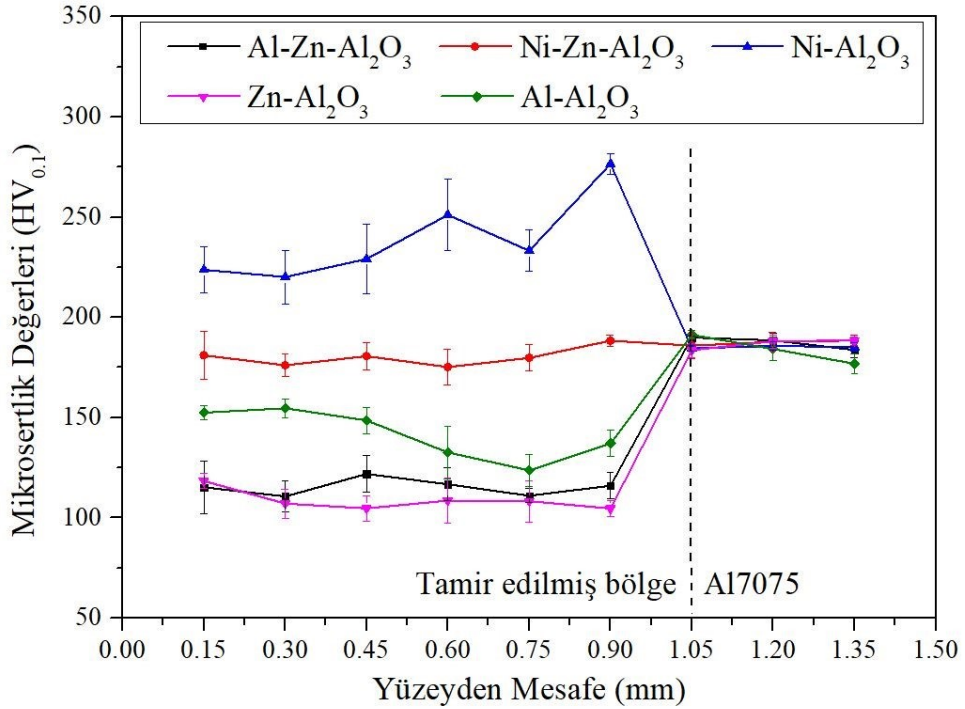
Ölçüm Yüzeyi	Ortalama Mikrosertlik Değerleri (HV _{0.1})
Al7075	186±5
Al-Zn-Al ₂ O ₃	115±8
Ni-Zn-Al ₂ O ₃	180±8
Ni-Al ₂ O ₃	239±2
Zn-Al ₂ O ₃	109±8
Al-Al ₂ O ₃	142±1

Sertlik sonuçları incelendiğinde, Al6061 altlık malzemesine göre Al-Zn-Al₂O₃, Ni-Zn-Al₂O₃, Ni-Al₂O₃, Al-Al₂O₃ tozları ile tamir edilmiş yüzeylerinde sırasıyla yaklaşık olarak %2, %49, %98, %19 daha iyi sertlik değerleri elde edilmiştir. Ancak Zn-Al₂O₃ tozu ile tamir edilmiş numunenin mikrosertlik değerlerinde Al6061 altlık malzemesine göre yaklaşık %14'lük bir azalma meydana gelmiştir. En yüksek mikrosertlik değeri görülen numuneler Ni-Zn-Al₂O₃, Ni-Al₂O₃ içeriğine sahip tozlar ile tamir edilmiş numunelerdir. Bu durumun nedeni ise her toz grubunda bulunan Al₂O₃ seramik tozlarına ilave olarak yine nispeten yüksek sertliğe sahip Ni eklenmesidir. Ni metal matrisi, Zn ve Al metal matrisine göre daha yüksek sertlik değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır. Tamir edilen parçalarda yüksek sertlik iki mekanizma nedeniyle oluşmaktadır. Birinci mekanizma, kaplama tabakasında dağılan alümina partiküllerinin yüksek sertliği nedeniyle, metal matrisli kaplamaların mikrosertlik değerini artmasıdır. Bu sertlik artışının ana nedenidir. İkinci mekanizmada ise, soğuk püskürtme işleminde toz partiküllerin altlık yüzeyine çarpması sonucu oluşan yüksek plastik deformasyondur. Bu nedenle işlem sırasında elde edilen matris sertlikleri işlemde kullanılan tozların döküm haldeki başlangıç sertliğinden daha yüksektir. Ayrıca püskürtülen tozlardaki seramik partikülleri yüzeye yüksek hızlarda çarpması metal matrislerindeki deformasyonu artırdığı için sertlik değerlerinin iyileşmesini desteklemiştir.

Tamir edilen Al7075 yüzeylerinin sertlik sonuçları incelendiğinde tamir edilmiş Al6061 yüzeylerinden ölçülen değerlere benzer sonuçlar vermiştir. Al7075'in daha yüksek sertliğe sahip olmasından dolayı sadece Ni-Al₂O₃ toz partiküller ile yapılan tamir işleminde yaklaşık olarak %29 kadar sertlik değerinde bir iyileşme sağlanmıştır. Diğer Al-Zn-Al₂O₃, Ni-Zn-Al₂O₃, Zn-Al₂O₃, Al-Al₂O₃ toz gruplarında sertlik değeri sırasıyla %38, %3, %41, %24 Al7075 altlık malzemenin altında kalmıştır. Ni metal matrisi, Zn ve Al metal matrisine göre daha yüksek sertlik değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır.



Şekil 5.15. Al6061 alt malzemesinde tamir edilmiş bölgelerin sertlik dağılımları.



Şekil 5.16. Al7075 alt malzemesinde tamir edilmiş bölgelerin sertlik dağılımları.

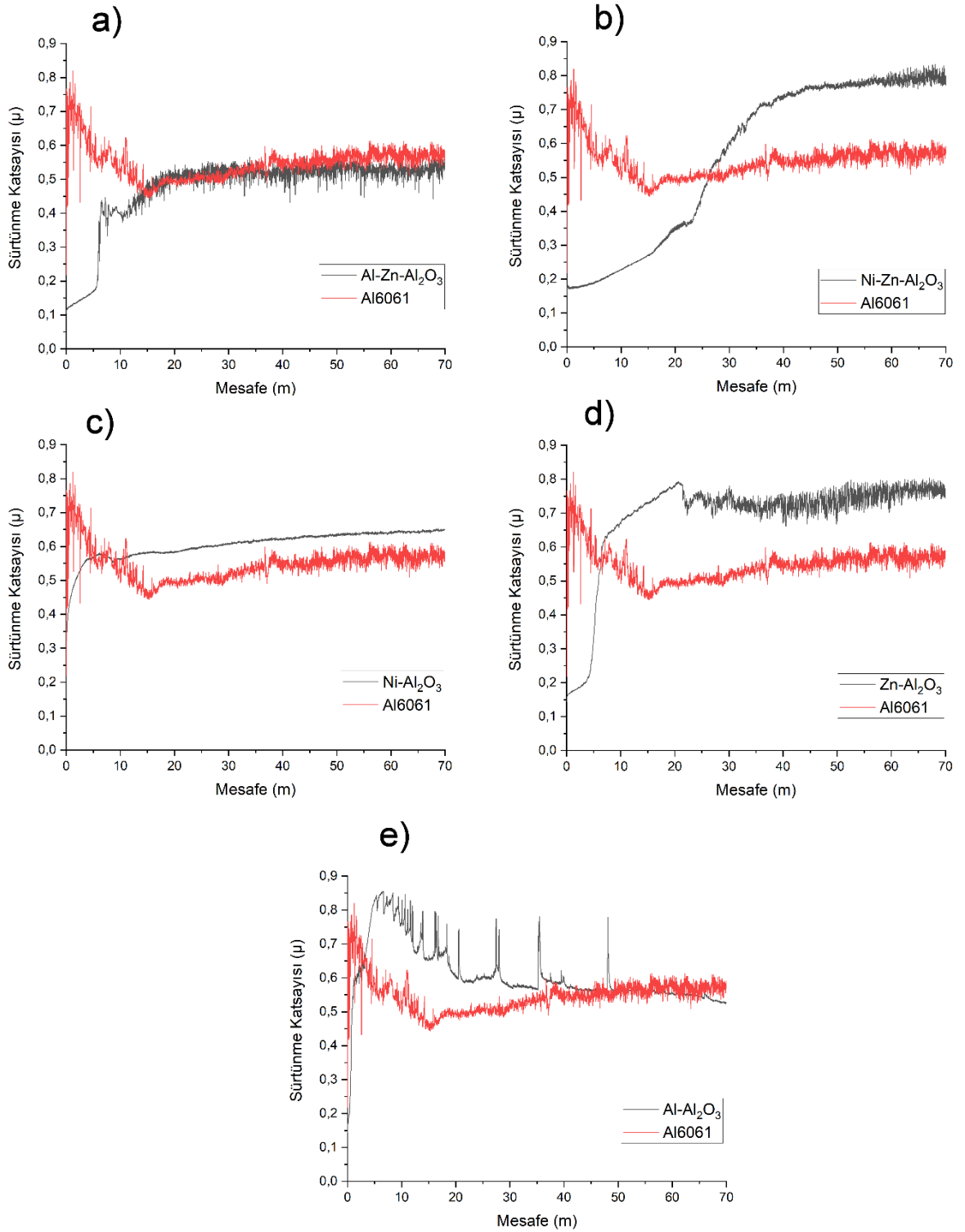
5.4. Aşınma Deneyi Sonuçları

Bu bölümde alüminyum yüzeylerin soğuk spre y yöntemi ile farklı tozlar kullanılarak tamir edilen yüzeyleri üzerinde gerçekleştirilen aşınma deneylerinin sonuçları verilmiştir. Deneyler sonrası ilk olarak aşınma oranları ve ortalama sürtünme katsayıları belirlenmiştir. Aşınan yüzeyler üzerinde oluşan aşınma kanallarının ve aşındırıcı kürelerin SEM EDS analizleri gerçekleştirilerek aşınma mekanizmaları değerlendirilmiştir.

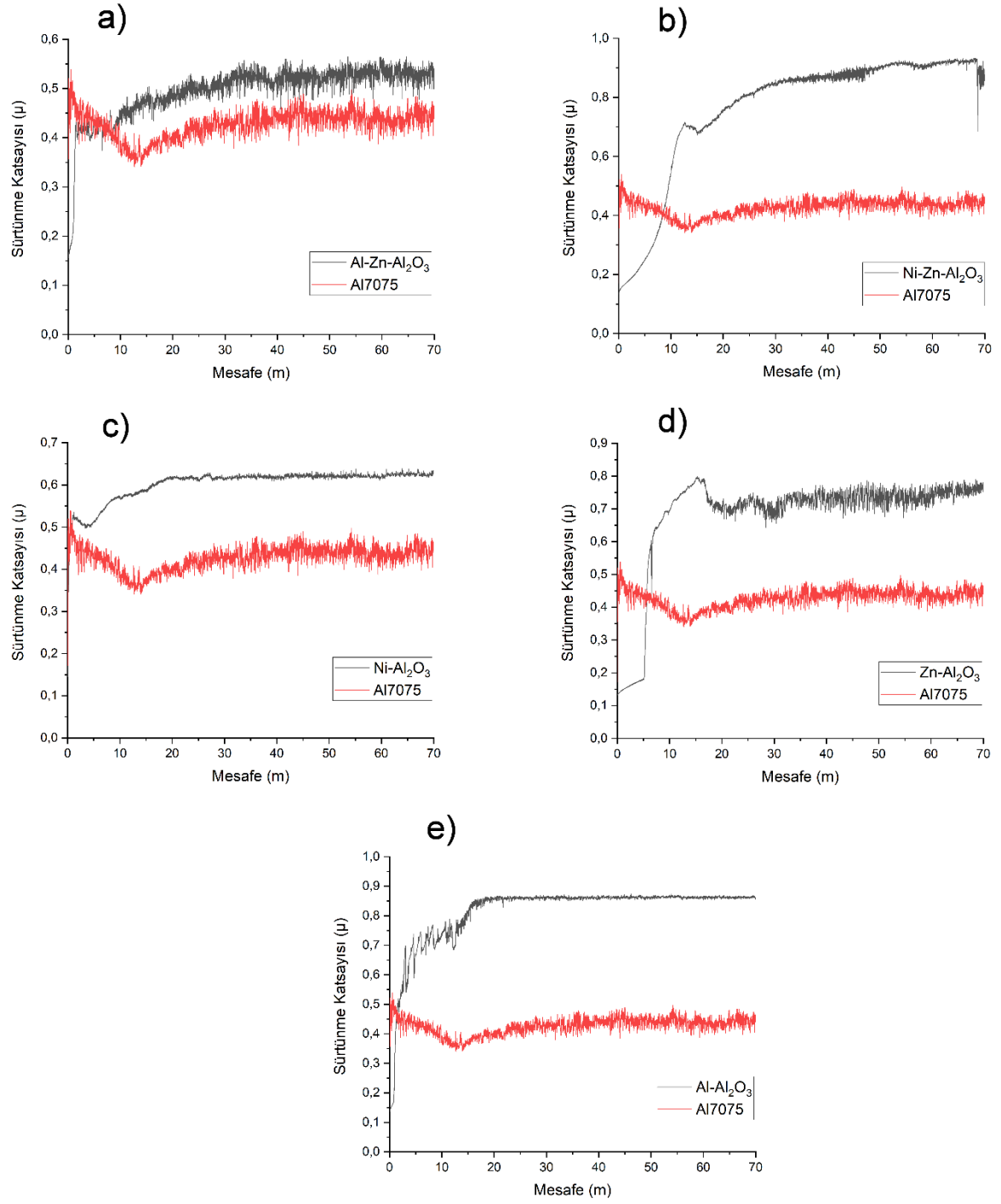
5.4.1. Aşınma oranları ve ortalama sürtünme katsayıları

Tamir edilen kanalların üst yüzeyleri üzerinde kuru ortamda küre-disk aşınma deneyleri yapılmış ve deneyler sırasında ortalama sürtünme katsayısı değerleri anlık olarak kaydedilmiştir. Al6061 ve Al7075 alaşımları için tamir edilen yüzeylerin, aşınma mesafesi boyunca sürtünme katsayısı değerlerinin değişimi sırasıyla Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de verilmiştir.

Aşınma deneyleri sırasında numuneler üzerinden ölçülen anlık sürtünme katsayısı değerleri, Al6061 onarımında Al-Zn-Al₂O₃, Ni-Al₂O₃ ve Zn-Al₂O₃ bölgelerinde 20 metreden sonra, Ni-Zn-Al₂O₃ ve Al-Al₂O₃ bölgelerinde 40 metreden sonra kararlı duruma gelmiştir. Al6061 alt malzemesinde sürtünme katsayısının kararlı duruma geçmesi ise 20 metreden sonra olmuştur. Al7075 alt malzemesinin soğuk spre y onarımı sonrası onarım bölgelerinden okunan sürtünme katsayısı değerleri 20 metreden sonra sürekli rejim durumuna gelmiştir. Aşınma deneyi sırasında aşındırıcı küre ve aşınma yüzeylerinde oluşan oksit tabakalarının varlığı sürtünme katsayısının kararlı hale gelene kadar değişim göstermesinde etkili olmuştur. Tüm aşınma deneyleri sürtünme katsayısında kayda değer bir değişim olmaması nedeniyle 70 metre aşınma mesafesinde tamamlanmıştır.

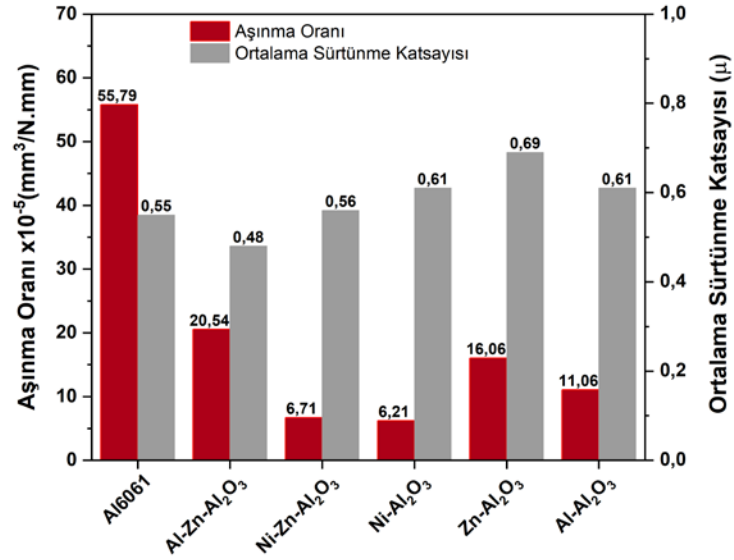


Şekil 5.17. Aşınma deneyi sırasında Al6061 alt malzemesinin farklı tozlar ile tamir edilmiş yüzeyleri üzerinde ve Al6061 yüzeyinde ölçülen sürtünme katsayısı değerleri: (a) Al-Zn-Al₂O₃, (b) Ni-Zn-Al₂O₃, (c) Ni-Al₂O₃, (d) Zn-Al₂O₃ ve (e) Al-Al₂O₃ tozları ile onarılan bölge.

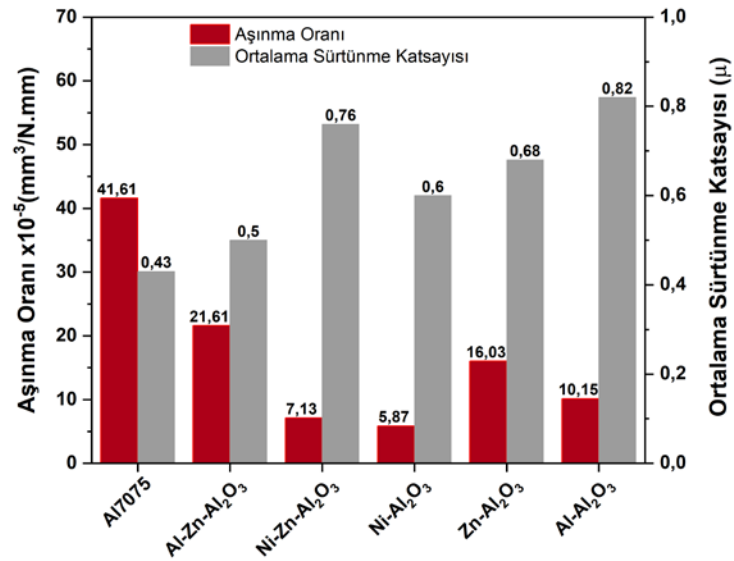


Şekil 5.18. Aşınma deneyi sırasında Al7075 alt malzemesinin farklı tozlar ile tamir edilmiş yüzeyleri üzerinde ve Al7075 yüzeyinde ölçülen sürtünme katsayısı değerleri: (a) Al-Zn-Al₂O₃, (b) Ni-Zn-Al₂O₃, (c) Ni-Al₂O₃, (d) Zn-Al₂O₃ ve (e) Al-Al₂O₃ tozları ile onarılan bölge.

Aşınma deneyleri sonrasında aşınma kanallarının profilleri belirlenerek aşınma alanları hesaplanmıştır. Hesaplamalar ve ölçümler neticesinde ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma oranları belirlenmiştir. Sonuçlar Al6061 için Şekil 5.19'da, Al7075 için Şekil 5.20'de verilmiştir.



Şekil 5.19. Al6061 alt malzemenin ve farklı tozlar ile onarılan bölgelerin aşınma oranları ve ortalama sürtünme katsayıları.



Şekil 5.20. Al6061 alt malzemenin ve farklı tozlar ile onarılan bölgelerin aşınma oranları ve ortalama sürtünme katsayıları.

Aşınma performansları değerlendirildiğinde farklı tozlarla tamir edilen bölgelerin aşınma oranlarının hepsi Al6061 işlemsiz ana malzemeye göre düşük çıkmıştır. Onarılmış bölgelerde kompozit yapılardaki Al_2O_3 içeriği tamir edilen bölgelerin sertliğini artırırken plastik deformasyona karşı direncini de geliştirmiştir. Al-Zn- Al_2O_3 , Ni-Zn- Al_2O_3 , Ni- Al_2O_3 , Zn- Al_2O_3 , Al- Al_2O_3 toz partikülleri ile yapılan tamir işlemleri sonucu elde edilen yüzeylerin aşınma performansı, Al6061 malzemesine göre sırasıyla yaklaşık 2,7, 8,3, 9, 3,5 ve 5 kat daha yüksektir. En iyi sonuçlar Ni ilaveli tozlarda elde edilmiştir. Bunun temel nedeni Ni tozlarının Al_2O_3 tozlarından sonra en yüksek sertlik değerine sahip olması ve abrazif aşınmaya karşı olan direnci artırmasıdır.

Al7075 altlık malzemesinin tamir işleminden sonra aşınma performanslarında benzer şekilde iyi sonuçlar elde edilmiştir. Al-Zn- Al_2O_3 , Ni-Zn- Al_2O_3 , Ni- Al_2O_3 Zn- Al_2O_3 , Al- Al_2O_3 toz partikülleri ile yapılan tamir işlemleri sonucu elde edilen yüzeylerin aşınma performansı Al7075 malzemesine göre sırasıyla yaklaşık 1,9, 5,8, 7,1, 2,6 ve 4,1 kat daha iyi çıkmıştır. En yüksek aşınma performansı Al7075 alt malzemesi için de Ni- Al_2O_3 ve Ni-Zn- Al_2O_3 tozlarıyla gerçekleştirilen onarım bölgelerinden elde edilmiştir.

Al-Zn- Al_2O_3 , Ni-Zn- Al_2O_3 , Ni- Al_2O_3 Zn- Al_2O_3 , Al- Al_2O_3 toz partikülleri ile onarılan bölgelerin aşınma performansları Al6061 ve Al7075 alt malzemelerine göre çok daha iyi çıkmıştır. Bu nedenle temas halinde çalışan ve yüzeylerinde aşınma meydana gelen Al6061 ve Al7075 alüminyum alaşımlarının soğuk sprey ile onarımı parçaların servis ömürlerini ciddi şekilde uzatabileceği söylenebilir.

5.4.2. Aşınma mekanizmaları

Aşınma deneyleri sonrası tamir edilen bölgelerde meydana gelen aşınma mekanizmalarının belirlenmesi amacıyla, aşınma kanalları ve aşındırıcı küreler üzerinde FESEM ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen FESEM görüntüleri ve EDS sonuçları Şekil 5.22-5.26 arasında verilmiştir.

Al6061 malzemesinin aşınma kanalının farklı büyütme ölçeklerinde alınan FESEM görüntülerinde abrazif aşınma izleri belirgin olarak görülmektedir (Şekil 5.21-a ve Şekil

5.21-b). Bu izler deney sırasında abrazif aşınmanın baskın olduğunu göstermektedir. Ayrıca aşınma bölgelerinde oksit tabaka kalıntıları tespit edilmiştir. Bu durum EDS analizleri ile belirlenen yüksek oksijen içeriği ile saptanmıştır. Bu kalıntıların küre ve aşınma yüzeyi arasında sıkışarak mikro kazıma mekanizması neticesinde malzeme kaybını artırdığı yorumu yapılabilir. Aşındırıcı kürenin temas noktası üzerinde yapılan EDS analizleri aşınan malzemeden küreye malzeme transferi olduğunu göstermektedir (Şekil 5.21-d). Bu durum ayrıca adhezif aşınmanın da etkin bir rol oynadığını kanıtlamaktadır. Adhezif aşınma neticesinde alt malzeme üzerinde bazı bölgelerde katman ayrılması (delaminasyon) şeklinde malzeme kopmaları da meydana getirerek aşınmayı artırmıştır. Bu numunede ana aşınma mekanizmaları abrazif ve adhezif aşınma olarak belirlenmiştir.

Al7075 üzerinde yapılan aşınma deneyleri neticesinde meydana gelen aşınma kanalının FESEM görüntüleri incelendiğinde abrazif izlerin varlığından söz edilebilir (Şekil 5.21-e ve Şekil 5.21-f). Aşınma bölgesindeki oksit tabaka kalıntılarının artan aşınma deneyinden kaynaklanan test yükleriyle kırılarak temas bölgelerinde kaldığı FESEM görüntüleri ile belirlenmiştir. (Şekil 5.21-f). Bunun yanında aşındırıcı karşı cisim üzerinde yapılan EDS analizi (Şekil 5.21-h), aşınan yüzeyden aşındırıcı küreye malzeme transferi olduğunu yani adhezif aşınmanın da etkin olduğunu göstermektedir. Ayrıca katman ayrılması şeklinde meydana gelen malzeme kayıpları da aşınmanın artmasında etkin rol oynamıştır. Aşınan yüzeyden adhezif etkilerle kopan malzeme tabakalarının, küre ve aşınan yüzey arasında ardışık olarak transferi neticesinde bazı bölgelerde plastik deformasyona uğrayan aşınma kalıntıları belirlenmiştir. Bu numunede abrazif aşınma ve adhezif aşınma mekanizmaları etkili olmuştur.

Al-Zn-Al₂O₃ tozları ile tamir edilmiş Al6061 ve Al7075 alt malzemelerin tamir edilmiş bölgelerinde gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucunda aşınma kanalları üzerinden elde edilen FESEM görüntüleri birbirine benzer çıkmıştır. Şekil 5.22-a, Şekil 5.22-b, Şekil 5.22-e ve Şekil 5.22-f'de abrazif izlerin varlığı görülmektedir. Küreler üzerinde gerçekleştirilen EDS analizleri malzeme transferi gerçekleştiğini dolayısıyla adhezif aşınma mekanizmasının da etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca Şekil 5.22-b de adhezif aşınma kalıntıları görülmektedir. İncelemeler neticesinde bu numunede abrazif ve adhezif aşınma mekanizmalarının birlikte etkili olduğu yorumu yapılabilir.

Al6061 alt malzemesinin Ni-Zn-Al₂O₃ ile tamir edilen bölgesinde meydana gelen aşınma kanalının FESEM görüntüsü incelendiğinde sık ve belirgin olmayan abrazyon izleri yer almaktadır (Şekil 5.23-a ve Şekil 5.23-b). Bu durum aşınan yüzeyin abrazyon aşınmaya karşı direnç gösterdiğini kanıtlamaktadır. Al6061 ile kıyaslandığında Ni-Zn-Al₂O₃ kaplamasının sertliğinin yüksek olması abrazyon aşınmaya olan direnci önemli ölçüde artırmıştır. Aşındırıcı küreye transfer olan az miktarda malzeme adezyonun şiddetlenmediğini göstermektedir. Delaminasyon bölgelerinin çok fazla olmadığı, buna bağlı olarak aşınmanın düşük seviyede kaldığı yorumu yapılabilir. Aşınma yüzeyinde bazı bölgelerde mikro çatlaklar olduğu tespit edilmiştir. Bu çatlakların, tribo-oksit tabakalarının aşınma deneyi sırasında test yükleri nedeniyle kırılması sonucu meydana geldiği söylenebilir. Ancak bu mikro çatlaklar kırılan tabakaların aşınma yüzeyinden ayrılmasına sebep olmamıştır.

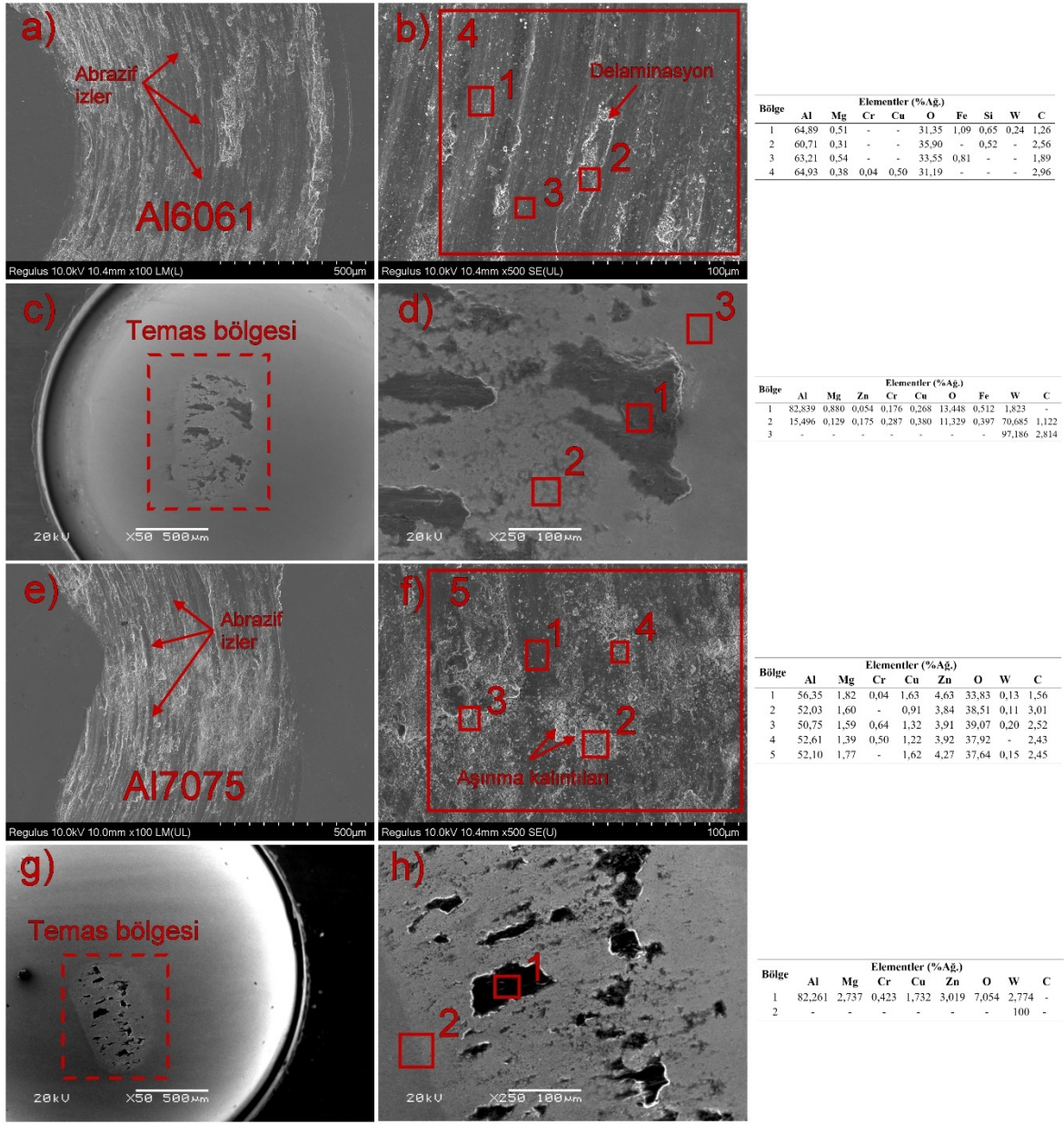
Al7075 alt malzemesinin Ni-Zn-Al₂O₃ ile tamir edilen bölgesinde meydana gelen aşınma kanalının FESEM görüntüsü incelendiğinde aşınma yüzeyinde abrazyon etkilerinin oldukça azaldığı belirlenmiştir. Şekil 5.23-h incelendiğinde aşınma bölgesinden aşındırıcı karşı cisme malzeme transferi tespit edilmiştir. Bu nedenle ana aşınma mekanizmasının adezyon aşınmasına bağlı olarak geliştiği söylenebilir. Aşındırıcı karşı cisme transfer olan malzemede EDS analizinde (Şekil 5.23-h) tespit edilen yüksek oksijen içeriği aşınma deneyi sırasında oksit tabakalarının meydana geldiğini ispatlamaktadır.

Şekil 5.24 Al6061 ve Al7075 alaşımlarının Ni-Al₂O₃ ile onarılmış bölgelerinin aşınma kanalı ve kürelerin FESEM görüntülerini göstermektedir. Şekil 5.24-a ve Şekil 5.24-b’de yüzeyde ince bir tribofilm tabakasının oluştuğunu gösteren balık pulu benzeri modeller oluşmuştur. Balık pulu benzeri yapı tribofilm tabakasının aşınma test yükü etkisi sonucunda kırılması neticesinde meydana gelmiştir. Oluşan bu oksit tabakalar aşındırıcı karşı cisim ile doğrudan temas etmektedir. Oluşan bu oksit tabakaları karşı aşındırıcı cisme olan adezyonu azaltıcı etki göstermiştir. Bu numunede meydana gelen aşınma kanallarının daha sık ve daha dar olduğu belirlenmiştir. Tüm bunların yanında abrazyon izlerinin neredeyse hiç görülmemesi aşınma yüzeyinin abrazyon aşınmaya karşı oldukça dirençli olduğunu kanıtlamaktadır. Şekil 5.24-e ve Şekil 5.24-f bölgelerinde yüksek oksijen içeriğine sahip tribo-oksit tabakaları yüzeyi kaplamış ve küre-aşınma yüzeyi temasını engelleyerek aşınmayı azaltmıştır. Ayrıca Şekil 5.24-h’de küreye transfer olan malzemenin Ni, Al ve O içeriği adezyonun varlığını

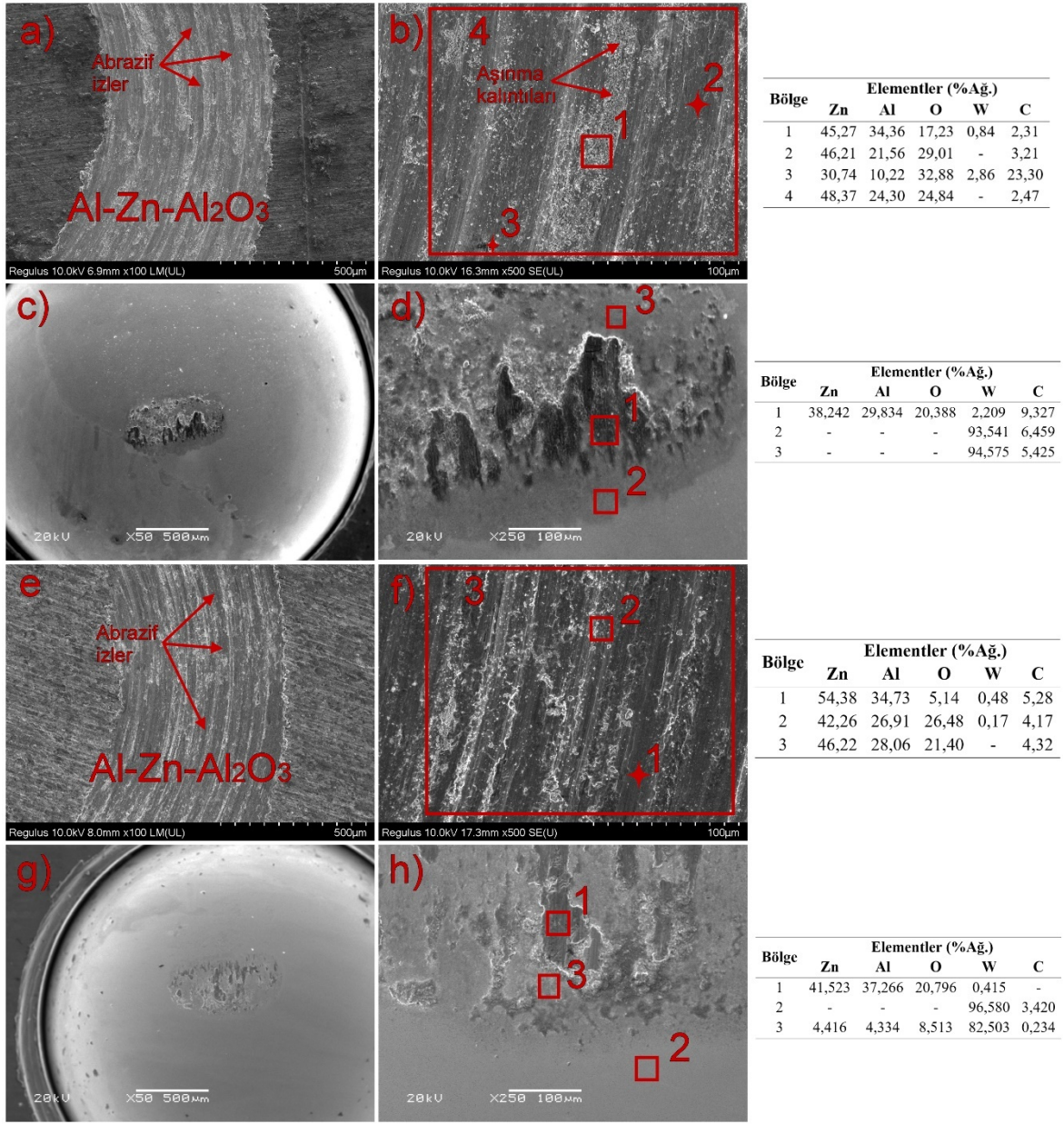
kanıtlamaktadır. Bu numunelerin ana aşınma mekanizmalarının adezyon ve oksidatif aşınma olduğu yorumu yapılabilir.

Şekil 5.25-a, Şekil 5.25-b, Şekil 5.25-e ve Şekil 5.25-f incelendiğinde tamir edilen kaplamalarda en düşük sertliğe sahip numuneler olmasına rağmen aşındırıcı sert karşı cisimle temas sonucunda abrazif izlere rastlanmamıştır. Bu numunelerin aşınma kanalları incelendiğinde geniş bir bölgede yüksek oksijen içeriğine sahip tribo-oksit tabakaları belirlenmiştir. Kaplama tabakası içerisindeki yüksek saflıktaki Zn metal matrisinin oksidasyona yatkın olduğu bilinmektedir (Kılıçay, 2020). Bu durumun bir sonucu olarak aşınma deneyleri sonrasında yüzeylerde yüksek Zn ve O içerikli tabakalar EDS analizleri sonucunda belirlenmiştir. Bu numunelerin aşındırıcı karşı cisimlerinin üzerinde benzer yüksek Zn ve O içerikli transfer tabakaları belirlenmiştir. Bu durum tribo-oksit tabakalarının aşınan yüzeyden karşı cisme adezyonunu göstermektedir (Şekil 5.25-d ve Şekil 5.25-h). Bu numunelerin ana aşınma mekanizmasının oksidatif ve adhezif aşınma olduğu yorumu yapılabilir.

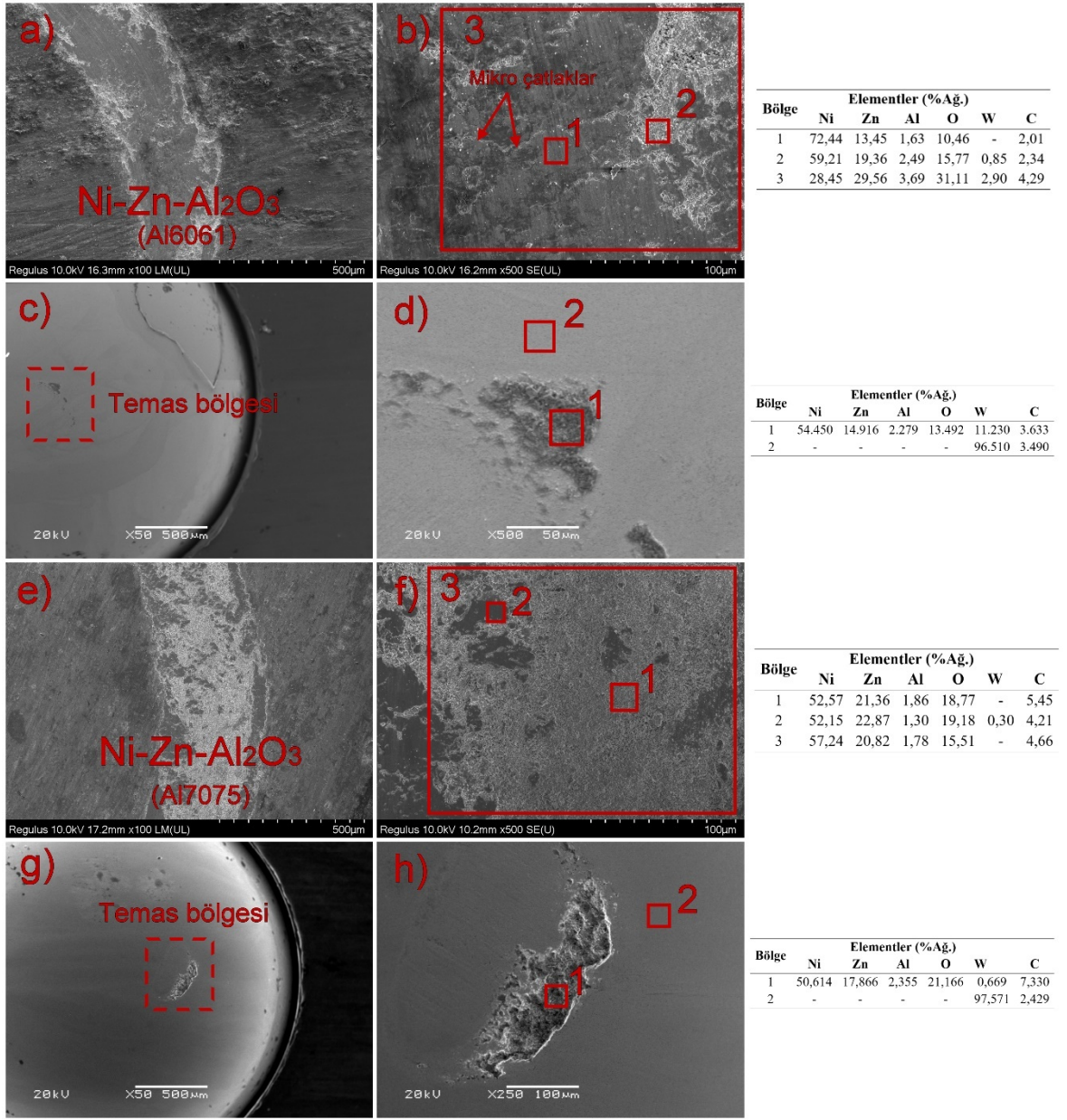
Şekil 5.26-a, Şekil 5.26-b, Şekil 5.26-e ve Şekil 5.26-f'de aşınma bölgelerinde abrazif aşınma izlerine rastlanmamıştır. Aşınma bölgelerinde tribo-oksit tabakalarının varlığı belirlenmiştir. EDS analizi sonucunda bu tribo oksit tabakalarında yüksek O ve Al içeriği tespit edilmiştir. Deney sırasında uygulanan aşınma test yüklerine bağlı olarak tribo oksit tabakalarının bazı bölgelerinde kırılmalar oluşmuştur. Ancak oluşan kırılmalar geniş bölgelere yayılmamıştır. Bu durum oluşan oksit tabakalarının kalın olmasıyla açıklanabilir. Kırılma oluşan bölgelerde delaminasyon oluşmamış ve kalın oksit tabakalarının büyük bir kısmı kırılmadan yüzeyde kalmıştır. Aşındırıcı karşı cismin EDS analizlerinde aşınma kanalından transfer olmuş Al ve O içerikli transfer tabakaları belirlenmiştir. Bu durum adezyon aşınmasının da etkili olduğunu kanıtlamaktadır. Bu numunelerde ana aşınma mekanizmasının oksidatif ve adhezif aşınma olduğu yorumu yapılabilir.



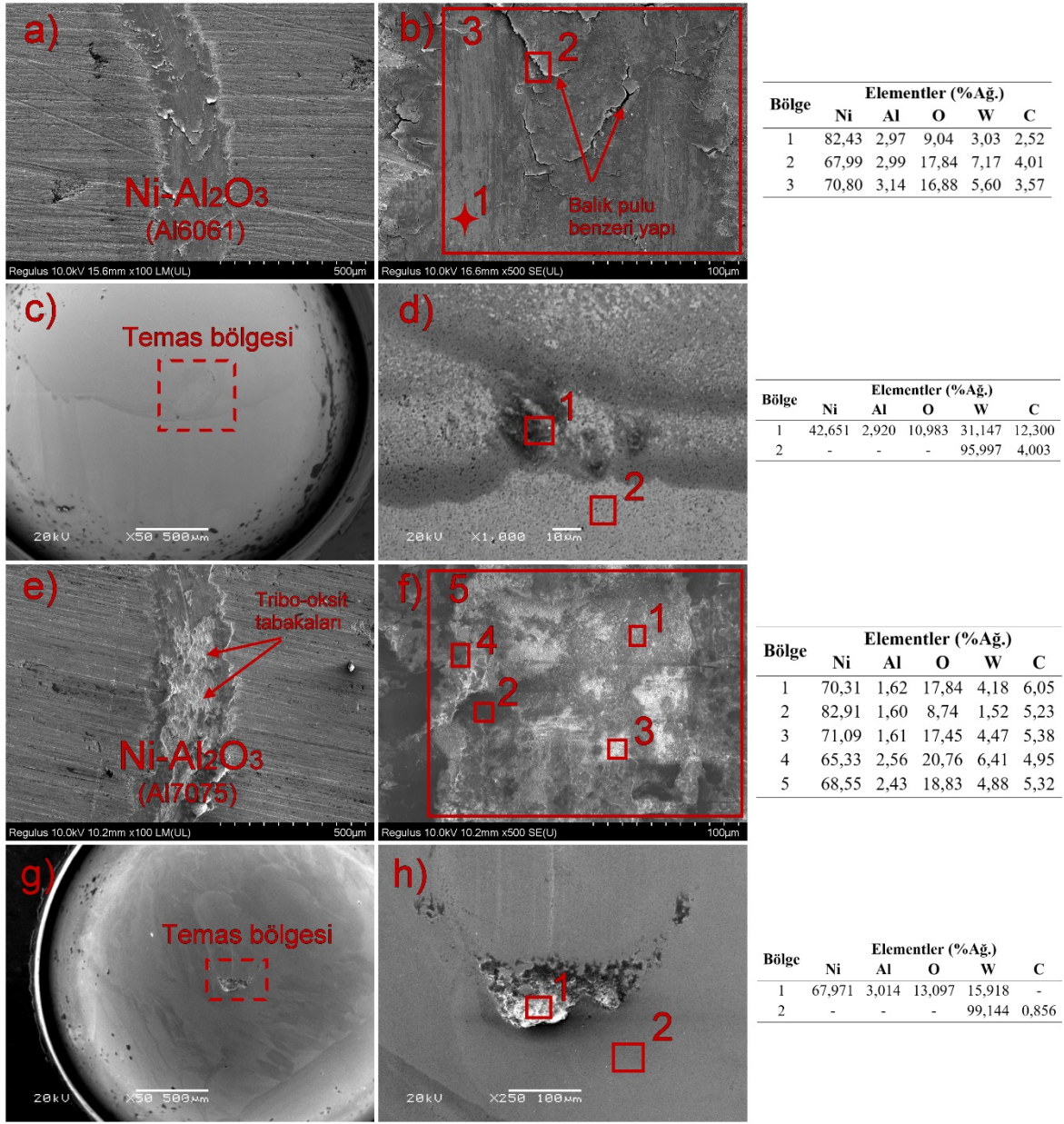
Şekil 5.21. Al6061 ve Al7075 alt malzemelerinin aşınma deneyi sonrası aşınma kanallarının ve aşındırıcı kürelerin FESEM-EDS analizi.



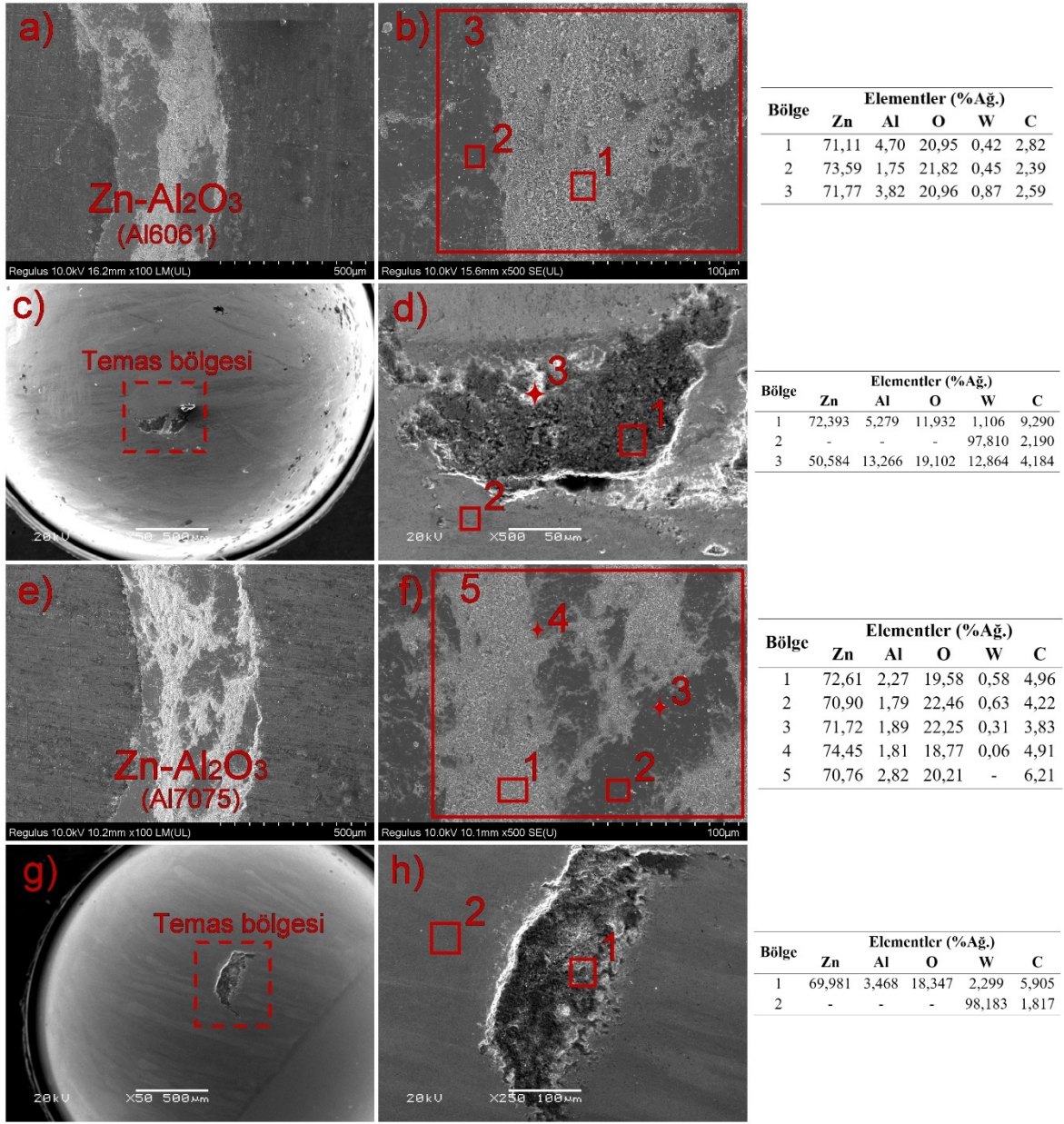
Şekil 5.22. Al6061 ve Al7075 alt malzemelerinin Al-Zn-Al₂O₃ tozları ile onarılmış yüzeyleri üzerinde gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonrası aşınma kanallarının ve aşındırıcı kürelerin FESEM-EDS analizi.



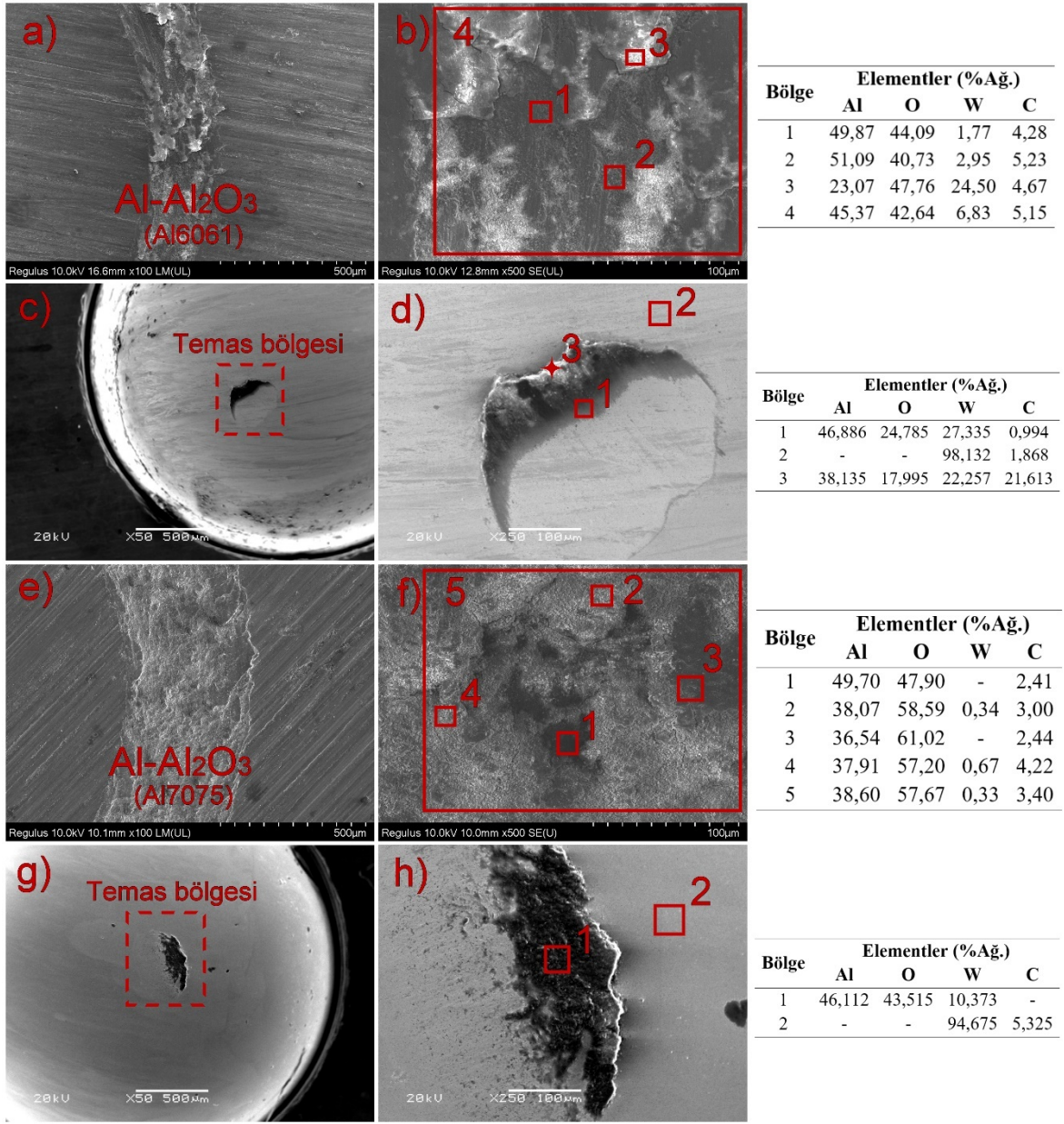
Şekil 5.23. Al6061 ve Al7075 alt malzemelerinin Ni-Zn-Al₂O₃ tozları ile onarılmış yüzeyleri üzerinde gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonrası aşınma kanallarının ve aşındırıcı kürelerin FESEM-EDS analizi.



Şekil 5.24. Al6061 ve Al7075 alt malzemelerinin Ni-Al₂O₃ tozları ile onarılmış yüzeyleri üzerinde gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonrası aşınma kanallarının ve aşındırıcı kürelerin FESEM-EDS analizi.



Şekil 5.25. Al6061 ve Al7075 alt malzemelerinin Zn-Al₂O₃ tozları ile onarılmış yüzeyleri üzerinde gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonrası aşınma kanallarının ve aşındırıcı kürelerin FESEM-EDS analizi.



Şekil 5.26. Al6061 ve Al7075 alt malzemelerinin Al-Al₂O₃ tozları ile onarılmış yüzeyleri üzerinde gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonrası aşınma kanallarının ve aşındırıcı kürelerin FESEM-EDS analizi

5.5. Çekme Testi Sonuçları

Hasarlı Al6061 ve Al7075 alt malzemeleri soğuk sprey yöntemi ile onarıldıktan sonra onarılan bölgelerden çekme numuneleri elde edilmiştir. Onarım işlemi yapılan her toz grubu için 3 adet çekme numunesi belirlenmiş ve çekme testleri gerçekleştirilerek sonuçların ortalaması alınmıştır. Çekme testi sırasında numunelerin kesit değerine bağlı olarak gerilme değerleri ve birim uzama değerleri kaydedilmiş ve grafikleri çizilmiştir. Elde edilen grafiklerden onarılan numuneler ile hasarsız Al6061 ve Al7075 numunelerin σ_{ak} ve σ_c noktaları tespit edilmiştir. Onarılan numuneler belirgin akma noktası göstermedikleri için gerilme-uzama diyagramından %0,2 birim şekil değiştirme noktasından elastik bölgeye paralel doğrular çizilerek σ_{ak} noktaları tespit edilmiştir. Al6061 için hesaplanan ortalama akma gerilmesi, çekme mukavemeti ve % uzama değerleri Çizelge 5.4'te, Al7075 için Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çekme testi sırasında anlık olarak birim şekil değişimine karşılık ölçülen gerilme değerleri kullanılarak gerilme-birim şekil değiştirme diyagramları çizilmiştir. Karşılaştırmak amacıyla her toz grubu için seçilen 3 numuneye ait grafikler aynı diyagramda çizilmiştir. Sonuçlar Al6061 için Şekil 5.27 ve Al7075 için Şekil 5.28'de verilmiştir.

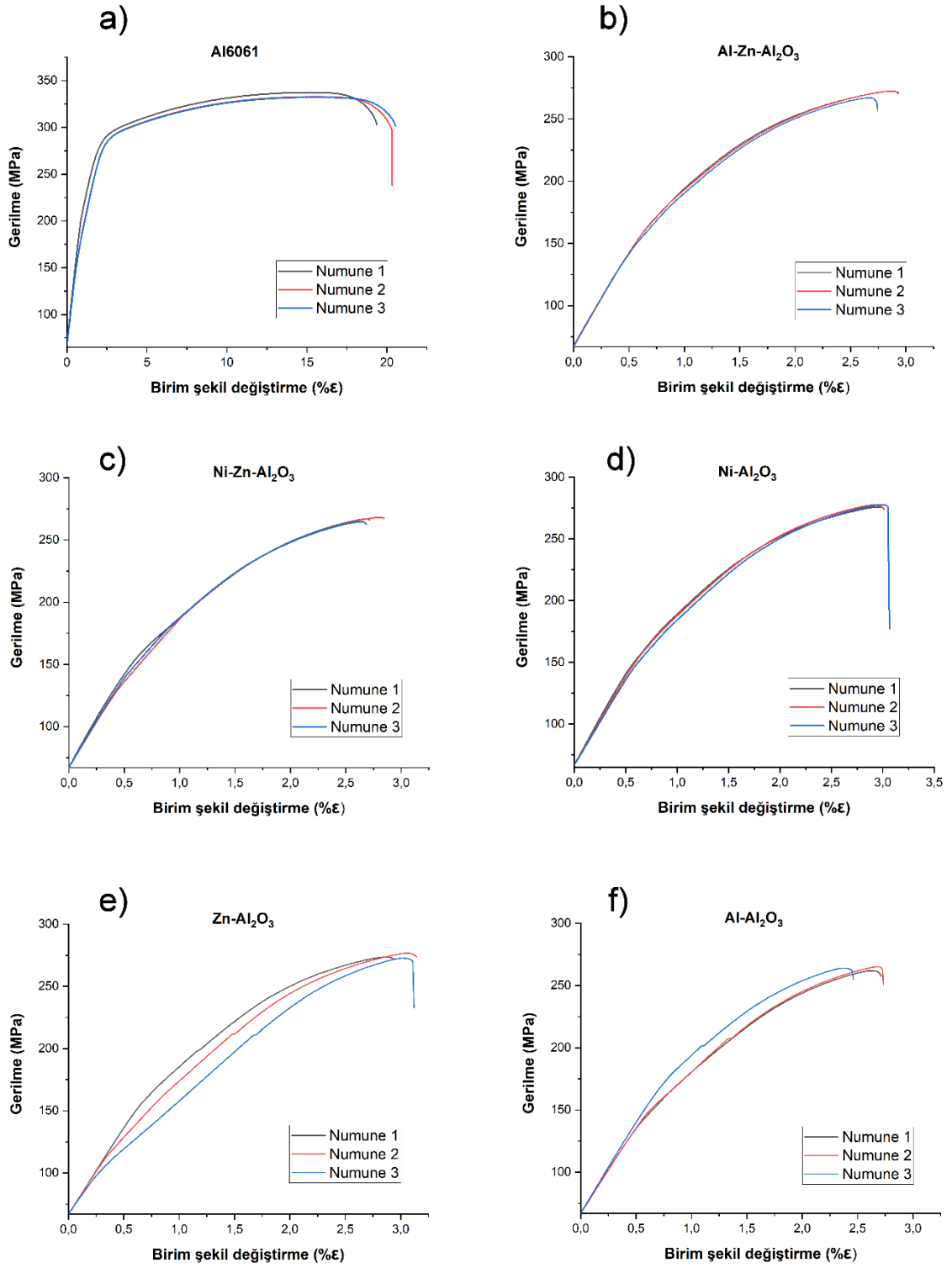
Çizelge 5.4. Onarılan Al6061 numunelerinin çekme deneyi sonuçları.

Numune	$\sigma_{ak,0,2}$ (MPa)	σ_c (MPa)	% ϵ
Al6061	274,2	334,2	20,1
Al-Zn-Al ₂ O ₃	237,9	270,6	3,0
Ni-Zn-Al ₂ O ₃	240,8	266,5	2,8
Ni-Al ₂ O ₃	248,6	277,1	3,0
Zn-Al ₂ O ₃	246,6	274,3	3,1
Al-Al ₂ O ₃	245,3	263,6	2,7

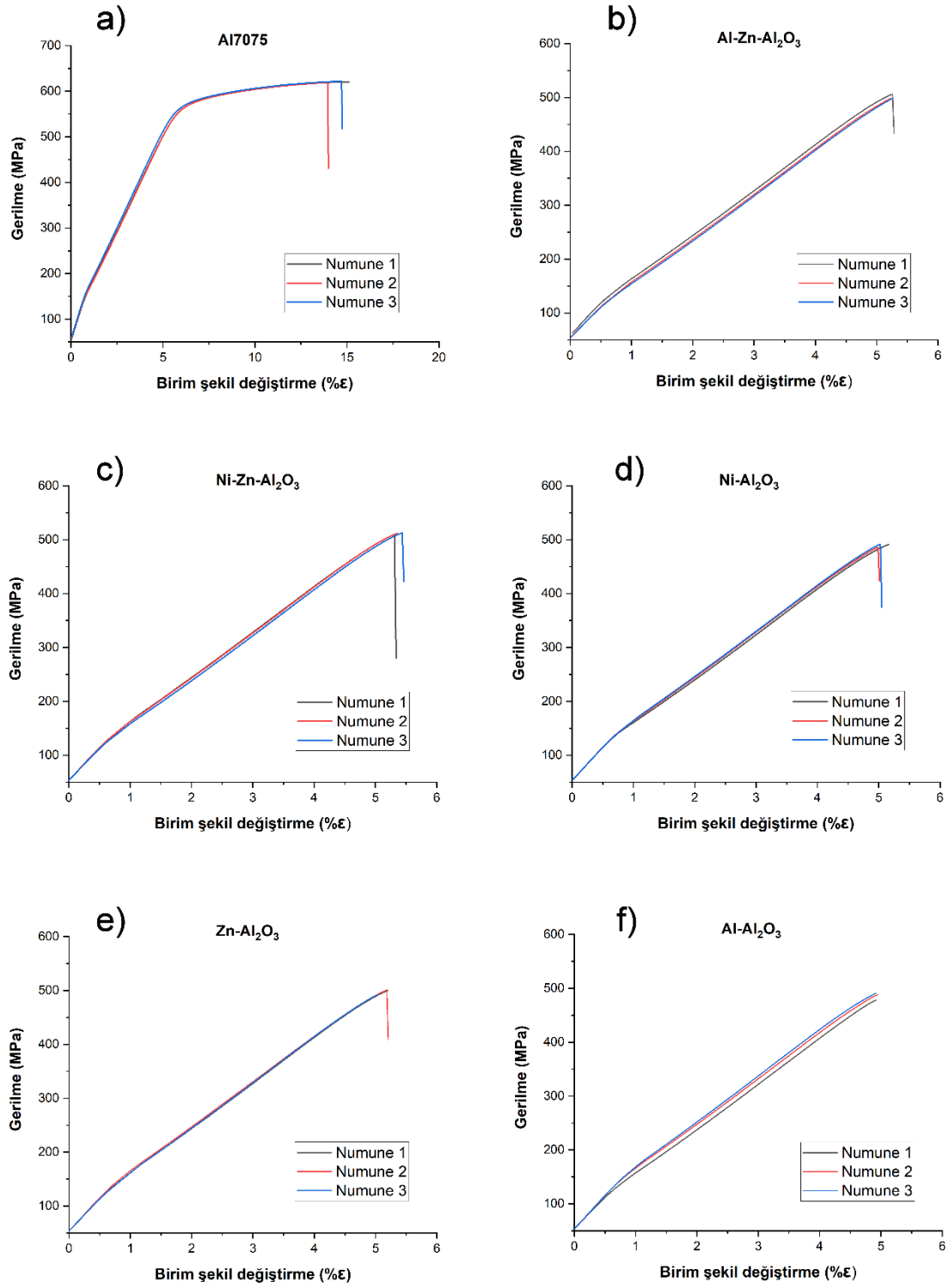
Çizelge 5.5. Onarılan Al7075 numunelerinin çekme deneyi sonuçları.

Numune	$\sigma_{ak,0.2}$ (MPa)	σ_c (MPa)	% ϵ
Al7075	496,7	587,1	14,7
Al-Zn-Al ₂ O ₃	440,0	500,9	5,3
Ni-Zn-Al ₂ O ₃	447,2	511,4	5,4
Ni-Al ₂ O ₃	437,1	489,6	5,1
Zn-Al ₂ O ₃	441,9	498,0	5,2
Al-Al ₂ O ₃	433,3	485,5	5,0

Malzeme tasarım kriterlerinde ilk referans alınan mekanik özellik malzemenin akma gerilmesidir. Bu sebeple onarım işleminden sonra ilk değerlendirme akma gerilmeleri üzerinden yapılmıştır. Tamir edilen parçaların akma gerilmesi değerleri hasarsız Al6061 malzeme ile kıyaslanmıştır. Tamir edilmiş parçaların akma gerilmeleri değerleri Al6061 malzemeden düşük çıkmıştır. Ancak elde edilen değerler hasarsız Al6061 malzemeye oldukça yakındır. Tamir edilmiş numuneler arasında en yüksek akma dayanımı Ni-Al₂O₃ tozu kullanılarak tamir edilen numunelerde elde edilmiştir. Tamir edilmiş numunelerin akma dayanımı hasarsız Al6061 numune ile karşılaştırıldığında Al-Zn-Al₂O₃, Ni-Zn-Al₂O₃, Ni-Al₂O₃, Zn-Al₂O₃ ve Al-Al₂O₃ için sırasıyla yaklaşık olarak %13, %12, %9, %10 ve %11 azaldığı tespit edilmiştir. Tamir edilmiş numuneler arasında en yüksek akma dayanımı Ni-Al₂O₃ tozu kullanılarak tamir edilen numunelerde elde edilmiştir. Tamir edilmiş numunelerin akma dayanımı hasarsız Al7075 numune ile karşılaştırıldığında Al-Zn-Al₂O₃, Ni-Zn-Al₂O₃, Ni-Al₂O₃, Zn-Al₂O₃ ve Al-Al₂O₃ için sırasıyla yaklaşık olarak %11, %10, %12, %11 ve %13 azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca onarılan numunelerin yüzde uzama değerlerinin oldukça azaldığı belirlenmiştir. Bu durumun nedeni olarak tamir edilen bölgelerde soğuk sprey biriktirmenin neden olduğu spreylene tozların altlık yüzeyine çarpması sonucun oluşan yüksek plastik deformasyon olduğu düşünülmektedir. Çekme deneyleri sonucunda benzer azalma çekme mukavemeti değerlerinde de elde edilmiştir. Soğuk spreyleme işlemi kullanılarak tamir edilen Al6061 ve Al7075 numunelerde mekanik özelliklerde önemli bir iyileşme sağlanamamıştır.



Şekil 5.27. Farklı tozlar ile onarılan Al6061 çekme numunelerinin gerilme- yüzde birim şekil değiştirme diyagramları.



Şekil 5.28. Farklı tozlar ile onarılan Al7075 çekme numunelerinin gerilme- yüzde birim şekil değiştirme diyagramları.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Al6061 ve Al7075 alaşımı altlık malzemelerin hasarlı yüzeyleri soğuk spreyci yöntemi ile Al-Zn-Al₂O₃, Ni-Zn-Al₂O₃, Ni-Al₂O₃, Zn-Al₂O₃ ve Al-Al₂O₃ içeriğine sahip 5 farklı toz kullanılarak başarılı bir şekilde onarılmıştır. Çalışmanın genel sonuçları maddeler halinde özetlenmiştir:

- Uygulanan soğuk spreyci işlemi düşük sıcaklıkta gerçekleştirildiğinden dolayı onarılan altlık malzemeye ısı girdi metalürjik özelliklerini değiştirecek seviyede değildir. Dolayısıyla altlık malzemenin mekanik, mikroyapı, fiziksel vb. özelliklerinde önemli bir değişim meydana gelmemiştir.
- Soğuk spreyleme işlemleri tozların ergime sıcaklığından oldukça düşük sıcaklıkta yapıldığı için spreylene toz partikülleri ergimemiştir. Bu nedenle kaplama tabakasında yeni bir alaşım oluşumu gözlemlenmemiş ve spreylene tozlar kimyasal bileşimlerini korumuşlardır.
- Tamir edilen bölgelerde yüksek yoğunluklu, boşluksuz, çatlaksız, gözeneksiz metal matris içine gömülü sert Al₂O₃ seramik partikülleri ile desteklenmiş kompozit mikroyapılar elde edilmiştir. Spreylene toz bileşimine göre metal matris nikel, çinko ve/veya alüminyumdan oluşmuştur. Metal matrisin yüksek sünekliği ve metal matrisin seramik partiküller tarafından artan deformasyonu sayesinde metal matrisli kompozit tamir tabakasında düşük gözeneklilik elde edilmiştir.
- Sert takviye fazı ise başlangıç tozu içinde bulunan Al₂O₃ partiküllerinden oluşmaktadır. Sert Al₂O₃ partikülleri soğuk spreyleme yönteminde yüksek spreyleme hızları sayesinde metal matrisler içinde rastlantısal olarak gömülmüştür. Kırılgan Al₂O₃ parçacıklarının yüzeye yüksek hızda çarptığında meydana gelen parçalanma ve geri tepme nedeniyle seramik parçacıkların birikme verimliliği azalmıştır. Bu nedenle başlangıç toz morfolojisiyle, kaplama katmanına biriktirilmiş tozların boyutu ve şekli farklılık göstermektedir.
- Tamir edilmiş parçaların akma gerilmesi değerleri Al6061 ve Al7075 malzemelerden düşük çıkmıştır. Ancak elde edilen değerler hasarsız Al6061 ve Al7075 malzemelere oldukça yakındır. Tamir edilmiş Al6061 numuneler arasında en yüksek akma ve çekme

dayanımı Ni-Al₂O₃ tozu kullanılarak tamir edilen numunelerde elde edilirken, Al7075 numuneler arasında ise Ni-Zn-Al₂O₃ tozu kullanılarak tamir edilen numunelerde elde edilmiştir. Soğuk spreyleme işlemi kullanılarak tamir edilen alüminyum alaşımlarında mekanik özelliklerde önemli bir iyileşme sağlanamamıştır.

- Onarılmış bölgelerden ölçülen sertlik değerleri Zn-Al₂O₃ toz partikülleri hariç diğer dört toz grubunda Al6061 alaşımı altlık malzemeden yüksek çıkmıştır. Al7075 altlık malzemesinde ise Ni-Al₂O₃ ile onarılan bölgenin sertliği altlık malzemeden yüksek çıkarken diğer toz gruplarında düşük çıkmıştır.
- Onarılmış numuneler arasında en yüksek sertlik değeri Ni-Al₂O₃ tozu ile onarılan numunelerde elde edilmiştir. Bu toz ile tamir edilen bölgenin ortalama mikrosertlik değeri Al6061'den yaklaşık 2 kat ve Al7075'ten yaklaşık 1,3 kat daha yüksektir. Ni metal matrisi, Zn ve Al metal matrisine göre daha yüksek sertlik değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır.
- Tamir edilen parçalarda yüksek sertlik iki mekanizma nedeniyle oluşmaktadır. Birinci mekanizma, kaplama tabakasında dağılan alümina partiküllerinin yüksek sertliği metal matrisli kaplamaların mikrosertlik değerini artırmasıdır. Bu durum sertlik artışının ana nedenidir. İkinci mekanizma ise, soğuk püskürtme işleminde toz partiküllerin altlık yüzeyine çarpması sonucu oluşan yüksek plastik deformasyondur. Bu nedenle işlem sırasında elde edilen matris sertlikleri işlemde kullanılan tozların döküm haldeki başlangıç sertliğinden daha yüksektir. Ayrıca püskürtülen tozlardaki seramik partiküller yüzeye yüksek hızlarda çarptığı için metal matrislerdeki deformasyonun artması sertliğin artmasını destekler.
- Tamir edilmiş numunelerin aşınma oranları karşılaştırıldığında oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Tüm toz gruplarında aşınma oranı Al6061 ve Al7075 altlık malzemelerden düşük çıkmıştır. Bu durum, tamir işlemi sonrası elde edilen aşınma performansındaki artış ile parçaların servis ömrünün artırıldığını göstermektedir.
- Kuru kayma test sonuçlarına göre en yüksek aşınma direnci Ni-Al₂O₃ ile tamir edilen numunelerde belirlenmiştir. Ni-Al₂O₃ tozu kullanılarak tamir edilen bölgenin aşınma direnci Al6061'den yaklaşık 9 kat ve Al7075'ten yaklaşık 7,1 kat daha yüksektir. Bu sonuç Al6061 ve Al7075 alaşımlarından imal edilmiş parçaların Ni-Al₂O₃ tozu ile tamir edilmesi sayesinde, servis ömürlerinin ciddi oranda iyileştirebileceğini göstermektedir.

- Beş farklı toz ile tamir edilmiş numunelerde benzer aşınma mekanizmaları tespit edilmiştir. Aşınma kanallarının FESEM ve EDS analizleri ile incelenmesi sonucunda abrasif aşınma izleri, adhezyon bölgeleri ve yüksek oksijen içerikli tribo-oksit tabakalarının varlığı belirlenmiştir. Ayrıca aşındırıcı karşı cisim olan WC küre üzerinde tamir edilmiş bölgeden geçmiş transfer tabakalarının varlığı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, numunelerde aşınma mekanizması olarak abrasif, adhezif ve oksidasyon aşınma mekanizmalarının oluştuğu belirlenmiştir.
- Tüm sonuçlar incelendiğinde, soğuk gaz dinamik sprej yöntemi ile tamir işleminin endüstriyel uygulamalar için kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Özellikle temas haline çalışan makine elemanlarında Al6061 ve Al7075 altlık malzemeden daha yüksek sertliğe ve yüksek aşınma performansına sahip tamir bölgelerinin servis ömürlerini ciddi şekilde artırabileceği sonucuna varılmıştır. Özellikle Ni-Al₂O₃ ve Ni-Zn-Al₂O₃ tozu kullanılarak elde edilen tamir tabakalarının, Al6061 ve Al7075 malzemelerin tamir işlemlerinde kullanılmasının önemli avantajlar sağlayabileceği belirlenmiştir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Altuncu, E., Üstel, F., 2010, Soğuk sprej (cold spray) teknolojisi ve uygulama alanları, Tmmob Metalurji Mühendisleri Odası Dergisi, 157, 29-40.
- Assadi, H., Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Kreye, H., 2003, Bonding mechanism in cold gas spraying, *Acta Materialia*, 51(15), 4379-4394.
- Assadi, H., Kreye, H., Gärtner, F., Klassen, T., 2016, Cold spraying—A materials perspective, *Acta Materialia*, 116, 382-407.
- Astarita, A., Coticelli, F., Prisco, U., 2016, Repairing of an engine block through the cold gas dynamic spray technology, *Materials Research*, 19, 1226-1231.
- Cai, Z., Deng, S., Liao, H., Zeng, C., Montavon, G., 2014, The effect of spray distance and scanning step on the coating thickness uniformity in cold spray process, *Journal of Thermal Spray Technology*, 23(3), 354-362.
- Candel, A., Gadow, R., 2009, Trajectory generation and coupled numerical simulation for thermal spraying applications on complex geometries, *Journal of Thermal Spray Technology*, 18(5), 981-987.
- Cavaliere, P., Silvello, A., 2017, Crack Repair in Aerospace Aluminum Alloy Panels by Cold Spray, *Journal of Thermal Spray Technology*, 26(4).
- Champagne, V., Helfrich, D., 2015, Critical assessment 11: structural repairs by cold spray, *Materials Science and Technology*, 31(6), 627-634.
- Champagne, V., Helfrich, D., 2016, The unique abilities of cold spray deposition, *International Materials Reviews*, 61(7), 437-455.
- Champagne, V. K., 2007, *The cold spray materials deposition process*, Elsevier,
- Champagne, V. K., Helfrich, D. J., Dinavahi, S. P. G., Leyman, P. F., 2011, Theoretical and experimental particle velocity in cold spray, *Journal of Thermal Spray Technology*, 20(3), 425-431.
- Chen, C., Xie, Y., Verdy, C., Huang, R., Liao, H., Ren, Z., Deng, S., 2017, Numerical investigation of transient coating build-up and heat transfer in cold spray, *Surface and Coatings Technology*, 326, 355-365.
- Chen, C., Xie, Y., Verdy, C., Liao, H., Deng, S., 2017, Modelling of coating thickness distribution and its application in offline programming software, *Surface and Coatings Technology*, 326, 315-325.
- Chen, C., Xie, Y., Yin, S., Planche, M.-P., Deng, S., Lupoi, R., Liao, H., 2016, Evaluation of the interfacial bonding between particles and substrate in angular cold spray, *Materials Letters*, 173, 76-79.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Cong, D., Li, Z., He, Q., Chen, H., Zhao, Z., Zhang, L., Wu, H., 2017, Wear behavior of corroded Al-Al₂O₃ composite coatings prepared by cold spray, *Surface and Coatings Technology*, 326, 247-254.
- Davis, J. R., 2004, *Handbook of thermal spray technology*, ASM international.
- Devenport, W. J., Nozzle Applet, <https://www.engapplets.vt.edu/fluids/CDnozzle/cdinfo.html>, erişim tarihi: 10.10.2021.
- Faccoli, M., Cornacchia, G., Maestrini, D., Marconi, G., Roberti, R., 2014, Cold spray repair of martensitic stainless steel components, *Journal of Thermal Spray Technology*, 23(8), 1270-1280.
- Fleck, N., Hutchinson, J., 1993, A phenomenological theory for strain gradient effects in plasticity, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 41(12), 1825-1857.
- Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Schmidt, T., Kreye, H., 2006, The cold spray process and its potential for industrial applications, *Journal of Thermal Spray Technology*, 15(2), 223-232.
- Gottwald, R. B., Griffiths, R. J., Petersen, D. T., Perry, M. E., Yu, H. Z., 2021, Solid-State Metal Additive Manufacturing for Structural Repair, *Accounts of Materials Research*, 2(9), 780-792.
- Grigoriev, S., Gershman, E., Gershman, I., Mironov, A., 2021, Properties of Cold Spray Coatings for Restoration of Worn-Out Contact Wires, *Coatings*, 11(6), 626.
- Grujicic, M., Zhao, C., DeRosset, W., Helfrich, D., 2004, Adiabatic shear instability based mechanism for particles/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process, *Materials & design*, 25(8), 681-688.
- Huang, P., Yonkers, S. (2019). An experimental investigation on pulsation & noise reduction by shunt pulsation trap with a nozzle for compressors operating in under-compression. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering..
- Jeandin, M., Rolland, G., Descurninges, L. L., Berger, M.-H., 2014, Which powders for cold spray?, *Surface Engineering*, 30(5), 291-298.
- Johnson, G. R., 1983, A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures, *Proc. 7th Int. Sympo. Ballistics*, 541-547.
- Jonas, J., Sakai, T., 1984, Dynamic Recrystallization: Mechanical and Microstructural Considerations [J], *Acta Metall*, 32, 189-209.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Jones, R., Matthews, N., Elston, J., Cairns, K., Baker, J., Wadsley, B., Pitt, S. (2012). SPD repairs to thin aluminium structures. Paper presented at the 28th International Congress of the Aeronautical Sciences. Brisbane, Australia.
- Karthikeyan, J., 2007, The advantages and disadvantages of the cold spray coating process, The cold spray materials deposition process, 62-71.
- Kılıçay, K., 2020, Development of protective MMC coating on TZM alloy for high temperature oxidation resistance by LPCS, Surface and Coatings Technology, 393, 125777.
- Krivina, L., Tarasenko, Y., Levanov, Y., Kirikov, S. (2020). Gas-dynamic spraying, as a method of the component recovery in the power engineering industry. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Lee, H., Shin, H., Ko, K., 2010, Effects of gas pressure of cold spray on the formation of Al-based intermetallic compound, Journal of Thermal Spray Technology, 19(1), 102-109.
- Lee, J., Kang, H., Chu, W., Ahn, S., 2007, Repair of damaged mold surface by cold-spray method, CIRP annals, 56(1), 577-580.
- Li, C., Li, W., Wang, Y., Fukanuma, H., 2003, Effect of spray angle on deposition characteristics in cold spraying, Thermal Spray, 91-96.
- Li, W.-Y., Yin, S., Wang, X.-F., 2010, Numerical investigations of the effect of oblique impact on particle deformation in cold spraying by the SPH method, Applied Surface Science, 256(12), 3725-3734.
- Li, W.-Y., Zhang, C., Guo, X., Zhang, G., Liao, H., Li, C.-J., Coddet, C., 2008, Effect of standoff distance on coating deposition characteristics in cold spraying, Materials & design, 29(2), 297-304.
- Luo, X.-T., Li, C.-J., 2015, Large sized cubic BN reinforced nanocomposite with improved abrasive wear resistance deposited by cold spray, Materials & design, 83, 249-256.
- Lynch, M. E., Gu, W., El-Wardany, T., Hsu, A., Viens, D., Nardi, A., Klecka, M., 2013, Design and topology/shape structural optimisation for additively manufactured cold sprayed components: this paper presents an additive manufactured cold spray component which is shape optimised to achieve 60% reduction in stress and 20% reduction in weight, Virtual and Physical Prototyping, 8(3), 213-231.
- Maev, R. G., Leshchynsky, V., 2006, Air gas dynamic spraying of powder mixtures: theory and application, Journal of Thermal Spray Technology, 15(2), 198-205.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Moridi, A., Gangaraj, S. H., Vezzu, S., Guagliano, M., 2014, Number of passes and thickness effect on mechanical characteristics of cold spray coating, *Procedia Engineering*, 74, 449-459.
- Munagala, V. N. V., Akinyi, V., Vo, P., Chromik, R. R., 2018, Influence of powder morphology and microstructure on the cold spray and mechanical properties of Ti6Al4V coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, 27(5), 827-842.
- Ning, X.-J., Jang, J.-H., Kim, H.-J., 2007, The effects of powder properties on in-flight particle velocity and deposition process during low pressure cold spray process, *Applied Surface Science*, 253(18), 7449-7455.
- Ozdemir, O. C., Widener, C. A., Carter, M. J., Johnson, K. W., 2017, Predicting the effects of powder feeding rates on particle impact conditions and cold spray deposited coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, 26(7), 1598-1615.
- Pattison, J., Celotto, S., Khan, A., O'Neill, W., 2008, Standoff distance and bow shock phenomena in the Cold Spray process, *Surface and Coatings Technology*, 202(8), 1443-1454.
- Pattison, J., Celotto, S., Morgan, R., Bray, M., O'Neill, W., 2007, Cold gas dynamic manufacturing: A non-thermal approach to freeform fabrication, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(3-4), 627-634.
- Peng, D., Jones, R., Matthews, N., CaTang, C., 2021, On the role of the interface on the damage tolerance and durability of cold spray repairs to AA7075-T7351 aluminium alloy wing skins, *Applied Surface Science Advances*, 3, 100044.
- Piwowarczyk, T., Winnicki, M., Małachowska, A., Ambroziak, A., 2014, Casting defects filling by low pressure cold spraying method, *Archives of Foundry Engineering*, 14.
- Poirier, D., Legoux, J.-G., Vo, P., Blais, B., Giallonardo, J. D., Keech, P. G., 2019, Powder development and qualification for high-performance cold spray copper coatings on steel substrates, *Journal of Thermal Spray Technology*, 28(3), 444-459.
- Qiu, X., Qi, L., Tang, J.-r., Wang, J.-q., Xiong, T.-y., 2022, A viable approach to repair neutron shielding B4C/6061 Al composite sheets through cold spray and hot rolling co-treatment, *Journal of Materials Science & Technology*, 106, 173-182.
- Raoelison, R., Verdy, C., Liao, H., 2017, Cold gas dynamic spray additive manufacturing today: Deposit possibilities, technological solutions and viable applications, *Materials & design*, 133, 266-287.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Rech, S., Trentin, A., Vezzu, S., Vedelago, E., Legoux, J.-G., Irissou, E., 2014, Different cold spray deposition strategies: single-and multi-layers to repair aluminium alloy components, *Journal of Thermal Spray Technology*, 23(8), 1237-1250.
- Rokni, M., Nutt, S., Widener, C., Champagne, V., Hrabe, R., 2017, Review of relationship between particle deformation, coating microstructure, and properties in high-pressure cold spray, *Journal of Thermal Spray Technology*, 26(6), 1308-1355.
- Samson, T., MacDonald, D., Fernández, R., Jodoin, B., 2015, Effect of pulsed waterjet surface preparation on the adhesion strength of cold gas dynamic sprayed aluminum coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, 24(6), 984-993.
- Schmidt, T., Assadi, H., Gärtner, F., Richter, H., Stoltenhoff, T., Kreye, H., Klassen, T., 2009, From particle acceleration to impact and bonding in cold spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, 18(5), 794-808.
- Schmidt, T., Gärtner, F., Assadi, H., Kreye, H., 2006, Development of a generalized parameter window for cold spray deposition, *Acta Materialia*, 54(3), 729-742.
- Sevillano, F., Poza, P., Munez, C., Vezzu, S., Rech, S., Trentin, A., 2013, Cold-sprayed Ni-Al₂O₃ coatings for applications in power generation industry, *Journal of Thermal Spray Technology*, 22(5), 772-782.
- Shikalov, V., Ryashin, N., Lapaev, A. (2017). Cold spray repairing corrosively damaged areas on aircraft constructions. Paper presented at the Solid State Phenomena.
- Smith, M., 2007, Comparing cold spray with thermal spray coating technologies, *The cold spray materials deposition process*, 43-61.
- Sova, A., Grigoriev, S., Okunkova, A., Smurov, I., 2013, Potential of cold gas dynamic spray as additive manufacturing technology, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(9), 2269-2278.
- Stier, O., 2014, Fundamental cost analysis of cold spray, *Journal of Thermal Spray Technology*, 23(1), 131-139.
- Tabbara, H., Gu, S., McCartney, D., Price, T., Shipway, P., 2011, Study on process optimization of cold gas spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, 20(3), 608-620.
- Tan, A. W.-Y., Sun, W., Phang, Y. P., Dai, M., Marinescu, I., Dong, Z., Liu, E., 2017, Effects of traverse scanning speed of spray nozzle on the microstructure and mechanical properties of cold-sprayed Ti6Al4V coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, 26(7), 1484-1497.
- Villafuerte, J., 2015, *Modern cold spray: materials, process, and applications*, Springer,

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- White, B., Story, W., Brewer, L., Jordon, J. B., 2020, Fatigue behaviour of fastener holes in high-strength aluminium plates repaired by cold spray deposition, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 43(2), 317-329.
- Widener, C., Carter, M., Ozdemir, O., Hrabe, R., Hoiland, B., Stamey, T., . . . Eden, T. J., 2016, Application of high-pressure cold spray for an internal bore repair of a navy valve actuator, *Journal of Thermal Spray Technology*, 25(1-2), 193-201.
- Widener, C. A., Ozdemir, O. C., Carter, M., 2018, Structural repair using cold spray technology for enhanced sustainability of high value assets, *Procedia Manufacturing*, 21, 361-368.
- Wright, T. W., Wright, T. W., 2002, *The physics and mathematics of adiabatic shear bands*, Cambridge University Press.
- Yin, S., Aldwell, B., Jenkins, R., Liao, H., Li, W., Lupoi, R., 2018, Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications, *Additive Manufacturing*, 21, 628-650.
- Yin, S., Aldwell, B., Lupoi, R., 2018, Cold spray additive manufacture and component restoration, *Cold-Spray Coatings*, 195-224.
- Yin, S., Cavaliere, P., Aldwell, B., Jenkins, R., Liao, H., Li, W., Lupoi, R., 2018, Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications, *Additive Manufacturing*, 21, 628-650.
- Yin, S., Liu, Q., Liao, H., Wang, X., 2014-a, Effect of injection pressure on particle acceleration, dispersion and deposition in cold spray, *Computational materials science*, 90, 7-15.
- Yin, S., Suo, X., Liao, H., Guo, Z., Wang, X., 2014-b, Significant influence of carrier gas temperature during the cold spray process, *Surface Engineering*, 30(6), 443-450.
- Yin, S., Suo, X., Xie, Y., Li, W., Lupoi, R., Liao, H., 2015, Effect of substrate temperature on interfacial bonding for cold spray of Ni onto Cu, *Journal of materials science*, 50(22), 7448-7457.
- Zhang, Z., Sun, X., Huang, S., Han, X., Zhu, P., Shi, C., Zhang, T., 2021, Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of the Aluminum Alloy Components Repaired by Cold Spray with Al-Based Powders, *Metals*, 11(10), 1633.
- Zhao, Z. B., Gillispie, B., Smith, J., 2006, Coating deposition by the kinetic spray process, *Surface and Coatings Technology*, 200(16-17), 4746-4754.